

A ■ ■ ■ ■ ■ I ■ ■ ■ ■ T ■ ■ ■ ■ ■
■ ■ ■ ■ ■ U ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ . ■ .

Innovative Building Envelope & Material Ecology: ricerca e sviluppo di materiali biopolimerici applicabili alla scala edilizia per l'isolamento termico e acustico di organismi ecosostenibili

Dott. Donato Gallo

Università degli Studi della Basilicata

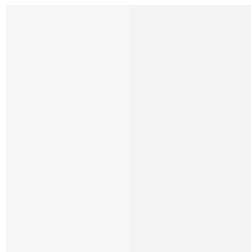
Dottorato di ricerca in:

Cities and Landscapes: Architecture, Archaeology, Cultural Heritage, History and Resources - XXXIV Ciclo

Relatori: **Prof. A.Pagliuca - Prof. A.Lucchini**

Correlatore: **Prof. E.S.Mazzucchelli**

Coordinatore di dottorato: **Prof. M.Fiorentino**



Università degli Studi della Basilicata

Dottorato di Ricerca in
Cities and Landscapes: Architecture, Archaeology, Cultural Heritage, History and Resources

Titolo della Tesi
Architettura e Recupero 4.0. Innovative Building Envelope & Material Ecology: ricerca e sviluppo di materiali biopolimerici applicabili alla scala edilizia per l'isolamento termico e acustico di organismi ecosostenibili

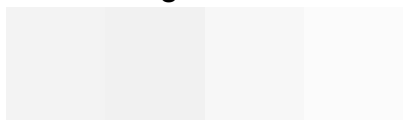
Settore Scientifico-Disciplinare
ICAR/10

Coordinatore del Dottorato
Prof. **Mauro Fiorentino**

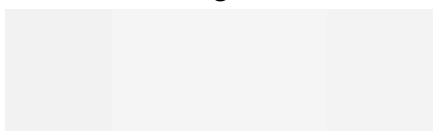
Dottorando
Dott. **Donato Gallo**

Relatori
Prof. **Antonello Pagliuca**

Prof. **Angelo Lucchini**



Correlatore
Prof. **Enrico Sergio Mazzucchelli**



Ciclo
XXXIV

A Marica,
meta della vita presente.
Ai miei figli Edoardo e Vittoria,
volano della vita futura.



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI
DELLA BASILICATA**



**ARCHITETTURA, AMBIENTE
PATRIMONI CULTURALI**
Dipartimento delle Culture
Europee e del Mediterraneo



**POLITECNICO
MILANO 1863**

Borsa di dottorato finanziata da:



COGEM s.r.l.

Università degli Studi della Basilicata

Dipartimento delle Culture Europee e del Mediterraneo

Dottorato di ricerca in:

**Cities and Landscapes: Architecture, Archaeology, Cultural Heritage,
History and Resources - XXXIV Ciclo**

Settore scientifico - Disciplinare:

ICAR/10

Coordinatore del Dottorato:

Prof. Mauro Fiorentino

Relatori:

Prof. Antonello Pagliuca

Prof. Angelo Lucchini

Correlatore:

Prof. Enrico Sergio

Mazzucchelli

Dottorando:

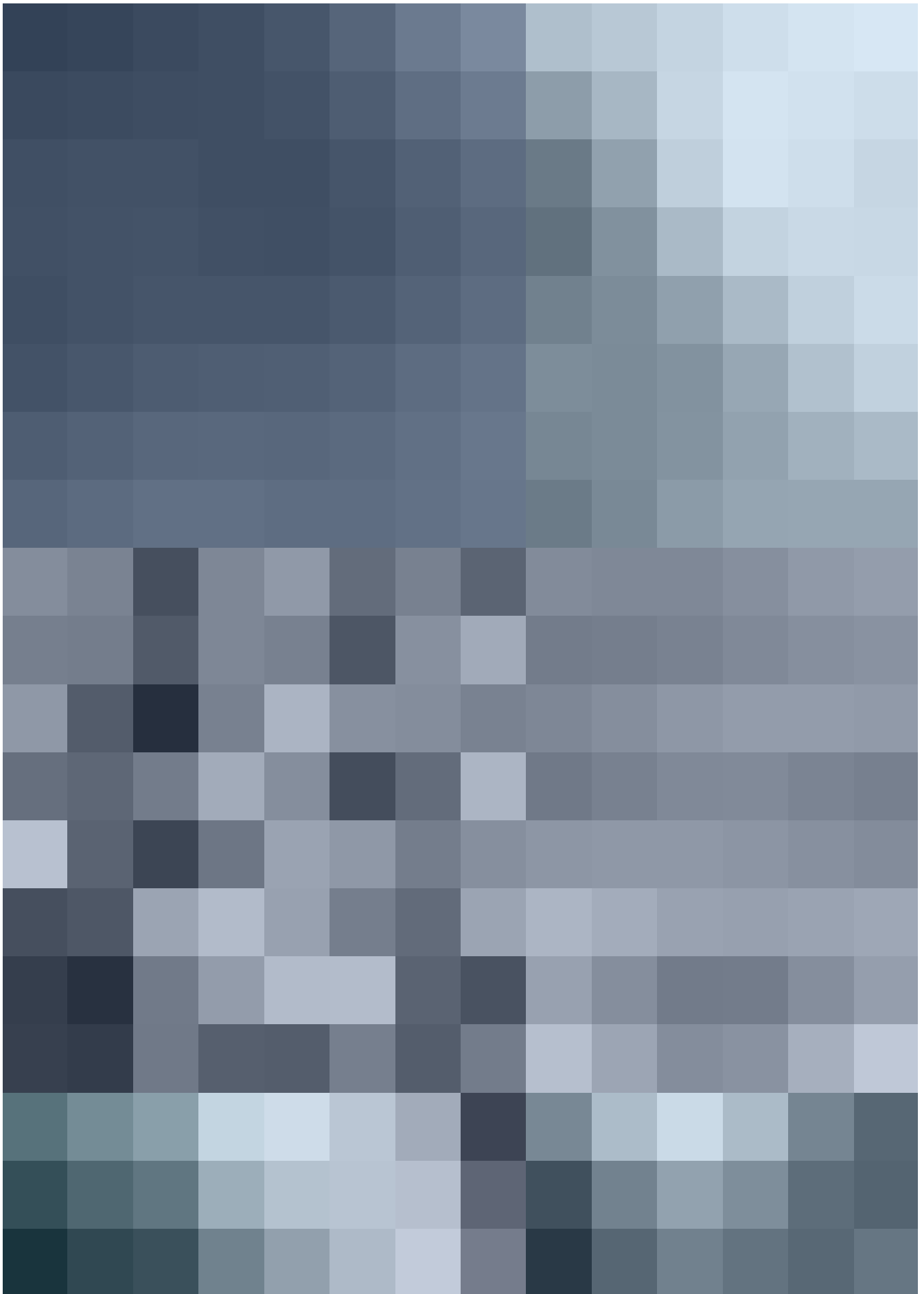
Dott. Donato Gallo

Architettura e Recupero 4.0.

**Innovative Building Envelope & Material Ecology:
ricerca e sviluppo di materiali biopolimerici
applicabili alla scala edilizia per l'isolamento
termico e acustico di organismi ecosostenibili.**

Dott. Donato Gallo





Indice

Introduzione 9

01

Evoluzione storica, architettonica e tipologica del sistema facciata 13

1.1. Il sistema facciata, connettivo tra forme ontologiche e forme rappresentative 14

1.2. La “parete esterna”, evoluzione stereometrica e sintattica del sistema trilitico e del sistema arco-piattabanda 23

- » Architettura e costruzione ctonia, a tenda ed a capanna
- » Architettura di pietra: materiali tradizionali della costruzione massiva
- » Architettura litica attraversata dal vento

1.3. La “facciata”, evoluzione tecnologica della parete esterna e *facies* di una moderna civiltà 96

- » Il disegno formale delle facciate come messaggio semantico e del libero sviluppo delle forme
- » La facciata nel Medioevo, nel Rinascimento e nel Barocco come principio formale, espressivo, funzionale ed iconografico
- » La facciata nel progresso industriale, tra continuità e discontinuità strutturale
- » Dal Postmodernismo alla facciata mediatica contemporanea

02

Il sistema involucro: connettivo tra forme costruttive tradizionali ed innovative strategie di sviluppo prestazionale e sostenibile 310

2.1. L'involucro di edifici complessi: tecnologie innovative e criticità nel progetto contemporaneo 312

- » Il sistema involucro
- » L'involucro di edifici complessi nella contemporaneità

2.2. Principi fisici, tipologici e strutturali del sistema involucro 320

- » Capacità prestazionale del sistema involucro
- » Criteri funzionali e criteri costruttivi fondamentali
- » Morfo-tipologie di superficie del sistema involucro
- » Principi strutturali
- » Involucro e strati

2.3. Il sistema involucro oggi: strategie innovative per lo sviluppo prestazionale e sostenibile 329

- » Il linguaggio e la tecnologia dell'involucro oggi
- » Innovative Building Envelope
- » Verso la sperimentazione: involucri biopolimerici

03

Sperimentazione di una lana isolante a matrice biopolimerica in fibra caseinica applicata per l'isolamento termico e acustico in edilizia 344

3.1. La nuova frontiera dei biopolimeri a base biologica 346

- » Generalità
- » Tipologie tradizionali e innovative dei biopolimeri
- » Economia circolare e sviluppo di processi sostenibili dei biopolimeri
- » Campi di applicazione e settori di mercato dei biopolimeri
- » Applicazione dei biopolimeri nel settore dell'edilizia
- » Normativa ed etichettatura europea dei polimeri a base biologica

3.2. Dai polimeri ai biopolimeri. Verso l'integrazione in architettura del concetto di “Material Ecology” 356

- » L'architettura dei polimeri
- » Polimeri amorfi

» I principali polimeri amorfi	
» Polimeri semicristallini	
» I principali polimeri semicristallini	
» Copolimeri e compositi	
» L'impatto sulla biologia e l'ecologia	
» I biopolimeri. Verso l'integrazione in architettura del concetto di "Material Ecology"	
» L'architettura dei biopolimeri	
» I biopolimeri di condensazione delle proteine	
» I biopolimeri di condensazione dei carboidrati	
» I biopolimeri di condensazione dei lipidi	
3.3. Sperimentazione di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina	382
» Generalità	
» Classificazione merceologica delle fibre naturali e delle tecnofibre	
» Classificazione chimica delle fibre naturali e delle tecnofibre	
» Struttura macromolecolare delle fibre naturali e delle tecnofibre	
» Proprietà delle fibre: caratteri morfologico-organolettici	
» Proprietà delle fibre: caratteri fisico-meccaniche	
» Le fibre artificiali di origine vegetale, animale e inorganica	
» Le fibre artificiali di origine proteica animale	
» La caseina per la produzione di materiali a matrice fibrosa	
» Evoluzione storica e utilizzo delle fibre caseiniche nell'industria: il Lanital e la Merinova	
» Processo di produzione storica delle fibre caseiniche del Lanital e della Merinova	
» Proprietà microscopiche e macroscopiche delle fibre caseiniche del Lanital e della Merinova	
» Processo di produzione sostenibile di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina	
» Proprietà fisiche e chimiche del campione prototipale	
» Introduzione ai processi di produzione sostenibile e Life Cycle Assessment in edilizia	
» Processo di produzione del campione prototipale. Verso l'impiego in edilizia	
» Campione prototipale di un pannello termoisolante in fibra a matrice biopolimerica a base di caseina	
4.1. Il mercato dei materiali isolanti nella transizione del Green Deal	480
» La transizione ecologica	
» Il mercato mondiale dei materiali isolanti	
» Il mercato italiano dei materiali isolanti	
4.2. Analisi matriciale comparativa	490
» Le principali famiglie dei materiali isolanti naturali e sintetici	
» Nomenclatura, norme e proprietà primarie degli isolanti	
» Propensioni funzionali e caratteristiche complementari degli isolanti	
» Sistema tecnologico di applicabilità degli isolanti	
» Sostenibilità e bilancio ambientale degli isolanti	
» Posa in opera e indice di impiego degli isolanti	
» Lettura e layout dell'analisi matriciale comparativa	
05	
Applicazioni sperimentali della fibra a matrice biopolimerica a base di caseina per l'isolamento termico e acustico dell'involucro edilizio	524
5.1. Campioni prototipali e modelli di utilità della fibra a matrice biopolimerica a base di caseina	526
» Sperimentazione 1: pannello isolante acustico bistrato con fibra di caseina e bioplastica in sfere riciclate	
» Sperimentazione 2: pannello isolante con strato monolitico in gesso, fibra di caseina e sughero	
» Sperimentazione 3: blocco in gesso ad alta densità e fibra di caseina termoriflettente	
» Sperimentazione 4: blocco termoisolante in gesso con intercapedine interna e strato termoriflettente in fibra di caseina	
» Sperimentazione 5: blocco modulare in gesso e strato termoriflettente in fibra biopolimerica di caseina	
» Sperimentazione 6: pannello isolante alveolare con crocette poliedriche di caseina espansa e film termoriflettente	
» Sperimentazione 7: blocco isolante in fibra di caseina e resina melamminica e rivestimento domotico in pannelli tessili	
» Sperimentazione 8: stuoia flessibile in fibra caseinica feltrata fonoassorbente e tubi capillari radianti in polipropilene	
» Sperimentazione 9: adesivi a base di caseina	
04	
Analisi matriciale comparativa tra la fibra biopolimerica a base di caseina e gli isolanti convenzionali e di nuova generazione	478

06

Brevettazione, prototipazione e strategie di integrazione della fibra biopolimerica di caseina nel mercato dei materiali a ‘complessità controllata’ e degli innovativi sistemi di involucro architettonico 554

6.1. Brevetto M6-6113: metodo di produzione di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina e pannello isolante termico ed acustico con la medesima fibra 556

- » Criteri di brevettabilità
- » Struttura del brevetto
- » Stato della tecnica e ricerca d’ anteriorità
- » Esposizione del trovato
- » Rivendicazioni e forme di protezione
- » Campo di applicazione e commercializzazione del brevetto

6.2. Sviluppo di una strategia brevettuale: prototipazione e definizione di un modello di business 568

- » Criteri e requisiti per la prototipazione del brevetto
- » Scenari di sviluppo per la fase di prototipazione brevettuale
- » Brevetti +
- » EIC Accelerator
- » PoC – Proof of Concept
- » Trasferimento tecnologico
- » Fondo per la crescita sostenibile
- » Start-up innovative, innovation hub, incubatori e organismi di ricerca
- » Sintesi dei programmi di sviluppo e prototipazione
- » Dal prototipo alla creazione di un modello di business
- » Programmi di sviluppo imprenditoriale

6.3. Nuovi orizzonti: il mercato dei materiali sperimentali a ‘complessità controllata’ 588

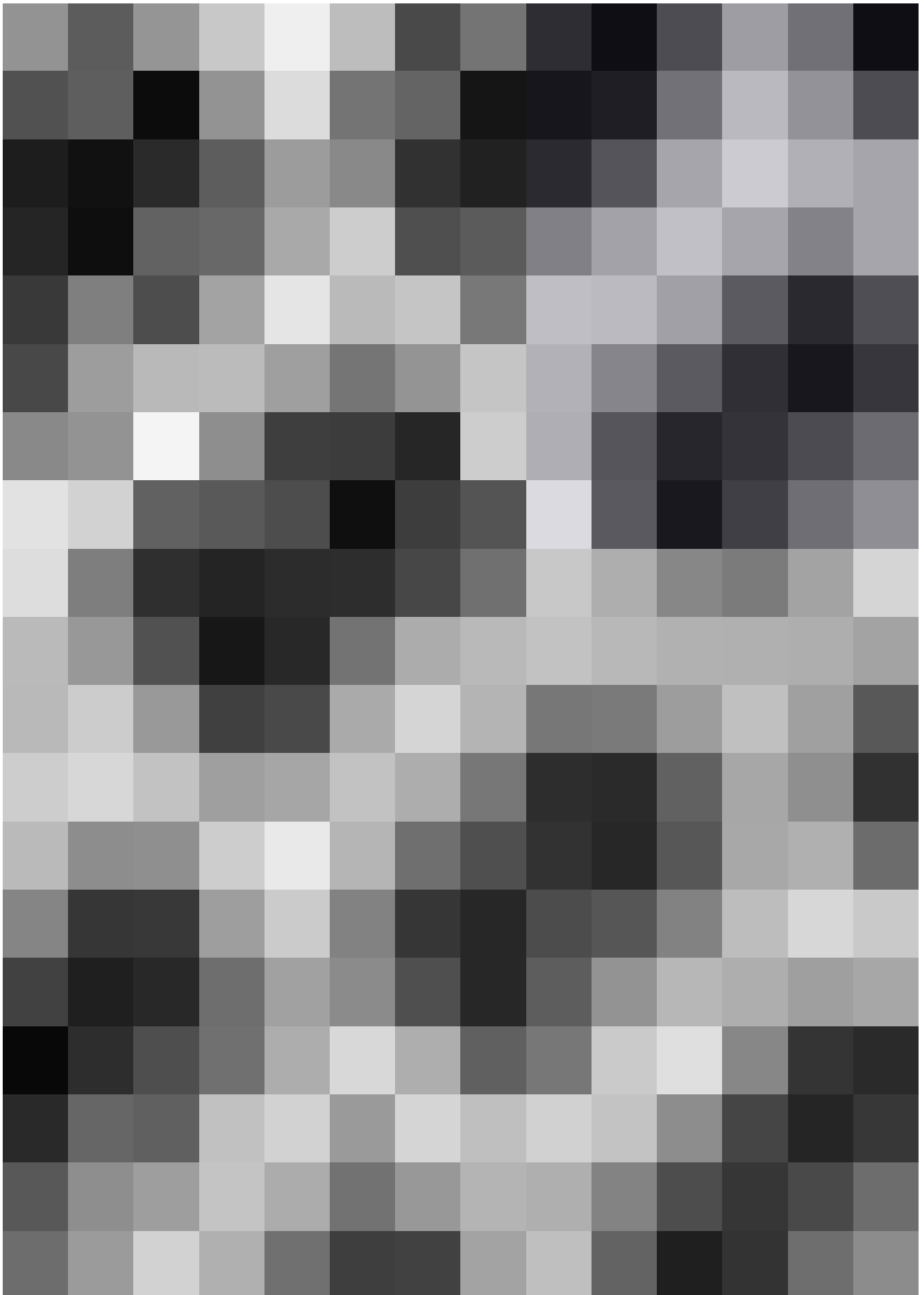
- » La fibra biopolimerica di caseina come materiale a ‘complessità controllata’
- » Progettazione eco-orientata e strategie per la produzione di materiali ecosostenibili
- » Nuovi orizzonti: up-cycling e superuse
- » C&DW – Construction & Demolition Waste
- » Esempi di materiali e tecniche costruttive sperimentali a ‘complessità gestita’

- » GreenBiz: i fanghi inerti
- » Ricehouse: biocomposti di lolla di riso
- » Mogu: fibra di funghi
- » Stonethica: materiali lapidei composti da scarti di lavorazione del marmo e della pietra naturale
- » Clear Wood: il legno trasparente
- » UMMs – Ultralight Metallic Microlattices
- » La Nanocellulosa
- » Slippery Liquid-Infused Porous Surface
- » Il polistirolo ecologico
- » Eco-mattoni di carta e laterizio
- » BioBuild: sistema di facciata autoportante in biocompositi
- » Hydroceramic: parete con sistema di raffrescamento passivo low-tech

Conclusioni 613

Bibliografia 615

Ringraziamenti 629



Introduzione

La tesi si inserisce nel settore scientifico disciplinare ICAR/10 nell'ambito dell'Architettura Tecnica. La tesi è strutturata in sei sezioni corrispondenti ai sei capitoli.

Nel primo capitolo viene approfondita l'evoluzione storica, architettonica e tipologica del sistema facciata attraverso una anamnesi storico-tecnica dei materiali, delle componenti, dei sistemi costruttivi e dei processi di evoluzione culturale e sociale che hanno determinato la trasformazione della chiusura esterna da componente portante a componente perimetrale dell'involucro edilizio. Tale scissione, catalizzata nell'Ottocento con l'introduzione di materiali industriali e con il processo di prefabbricazione, ha dato vita alla progressiva scomposizione delle funzioni del sistema involucro, in parte portanti, in parte di "pelle-filtro", in grado di ottimizzare le interazioni tra ambiente interno e ambiente esterno. Nella contemporaneità è improbabile che strutture omogenee costituite principalmente da un solo materiale soddisfino le esigenze di isolamento termico, così i progettisti sono chiamati ad adattare con precisione il profilo prestazionale dell'involucro per soddisfare determinati requisiti. Rendere modificabili strati o gusci consente alle proprietà dell'involucro edilizio di adattarsi alle condizioni esterne che cambiano gerarchicamente dal punto di vista spaziale e temporale.

Il secondo capitolo descrive il sistema involucro inteso come connettivo tra forme costruttive tradizionali e strategie innovative di sviluppo prestazionale e sostenibile. Dagli anni '50 del Novecento ad oggi, infatti, il sistema edilizio dell'involucro e di facciata è mutato notevolmente: dalle prime sperimentazioni di Le Corbusier la parete perimetrale si è liberata formalmente dalle fatiche strutturali dotandosi di innovazioni delle componentistiche dell'industria e dei nuovi materiali e integrando complessi sistemi impiantistici in grado di accumulare energia migliorando il benessere *in-door* e limitare i consumi energetici.

La produzione tecnologica degli ultimi anni ha favorito un processo di evoluzione del concetto di involucro creando architetture innovative dal punto di vista formale ed energetico. Questo processo ha dato nuovo impulso alla ricerca di soluzioni alternative per l'involucro tanto a livello progettuale quanto a livello produttivo. La sperimentazione di soluzioni stratificate e isolate, infatti, ha trovato un fertile terreno: alle chiusure monolitiche con o senza isolamento termico ed acustico, si sono progressivamente affiancate soluzioni 'a secco' con telai metallici o in legno, pannelli isolanti ad alte prestazioni, rivestimenti leggeri e numerose altre tecnologie. All'involucro opaco si sono affiancate diverse tipologie: *l'involucro trasparente*; *l'involucro misto* e *l'involucro adattivo*. Tra le numerose istanze e campi di sviluppo, la ricerca approfondisce la tematica di involucri innovativi (*innovative building envelope*) mediante l'applicazione di materiali biopolimerici, un settore in continua espansione, soprattutto nell'industria delle costruzioni.

Nel terzo capitolo si indagano le potenzialità di applicazione dei materiali biopolimerici nel settore delle costruzioni, in grado di garantire non solo un processo di dismissione biodegradabile, ma promuovere materiali prodotti da scarti che possano limitare l'utilizzo dei polimeri sintetico-artificiali o comunque, tutti quei materiali altamente inquinanti per l'ambiente e che richiedono un elevato apporto di materia ed energia nell'intero ciclo di vita. L'intento è promuovere - attraverso la sinergia tra architettura e biologia - nuovi materiali naturali per il sistema involucro; materiali che all'attualità sono ancora allo stadio di prototipazione ma che costituiscono le fondamenta per una nuova pratica di progettazione integrata e sostenibile in architettura ed in innumerevoli settori, penalizzati dall'impiego di risorse non rinnovabili e inquinanti e da processi tradizionali obsoleti. Secondo l'anzidetto *diktat*, il *corpus* della seguente ricerca verte sulla sperimentazione di una fibra a ma-

trice biopolimerica a base di caseina (prodotto di scarto dell'industria casearia) per la realizzazione di un pannello isolante termico ed acustico prodotto con detta fibra. Sempre nel terzo capitolo è stata condotta una attenta analisi delle caratteristiche microstrutturali e macrostrutturali dei polimeri, dei copolimeri e dei biopolimeri. Sono stati approfonditi, inoltre, gli aspetti morfologici, chimici e fisici dei biopolimeri di derivazione organico-naturale e quali possono essere i possibili impieghi in un mercato sempre più vocato al concetto di *Material Ecology*. L'analisi ha opportunamente mitizzato l'importanza del ruolo che ricoprono i biopolimeri nell'immediato futuro nei diversi settori che spaziano dal *packaging* all'agricoltura, dall'industria elettrica a quella dei trasporti, dal design alle costruzioni. Questi settori sono anche tra i maggiori responsabili dell'impatto ambientale e dei potenziali danni ambientali prodotti dall'intero ciclo di trasformazione delle materie prime a partire dalla loro estrazione, dal trasporto, dalla trasformazione fino ai possibili effetti derivanti dal loro smaltimento. Per tale motivo, le moderne industrie hanno virato la propria attività produttiva verso modelli di sviluppo economico eco-sostenibili, cercando di innescare un modello virtuoso che permetta di gestire al meglio le risorse, ottimizzando quanto più possibile la produzione, accrescendo il PIL e diminuendo drasticamente le emissioni di CO₂ nell'ambiente preservando ecosistema e biodiversità.

Il quarto capitolo analizza sistematicamente le caratteristiche e le potenzialità commerciali del pannello termoisolante in fibra biopolimerica a base di caseina rispetto ai prodotti appartenenti alle principali famiglie di isolanti (organici-naturali, organici-sintetici, inorganici-naturali, inorganici-sintetici, anche di nuova generazione) sintetizzando i risultati all'interno di un quadro matriciale comparativo. I materiali isolanti sono descritti in apposite schede di riferimento elaborate al fine di creare una inter-

faccia semplice e completa, nonché uno strumento comparativo. In particolare, per ciascun materiale isolante, la ricerca approfondisce il grado di diffusione e di impiego nel mercato italiano, così come la loro sostenibilità ambientale (biodegradabilità, riciclabilità e rinnovabilità), fornendo una panoramica degli aspetti di *Life Cycle Assessment* e del relativo ecobilancio. La sistematizzazione di tali processi ha lo scopo di privilegiare, a parità di prestazioni, la scelta di materiali isolanti a ridotto impatto ambientale (a prescindere dalla natura di derivazione, naturale o sintetica), evidenziando la variabilità di tale parametro in relazione al contesto di impiego, mirando ad una progettazione integrata e oggettiva (non più autoreferenziale) dell'isolamento termico ed acustico. Naturalmente la commercializzazione del prodotto è strettamente correlata ad indagini di mercato, all'analisi costi-benefici, alla definizione di forme di incentivazione nazionali ed europee ed alle prescrizioni in termini di efficientamento energetico, analizzando anche quali possono essere i potenziali rischi connessi all'investimento e alla domanda economica degli isolanti 'green' all'interno di un mercato sempre più frammentato. A questo si aggiunge la crescente attenzione legata alla validazione ed alla certificazione del prodotto, in linea con legislazione ambientale europea, sempre più vocata alla circolarità economica e alla adozione di modelli sostenibili. Per la fibra biopolimerica a base di caseina e per il relativo pannello termoacustico è, quindi, importante valutare la dimensione del mercato degli isolanti per le diverse aree geografiche, i principali operatori del mercato ed il settore di applicazione, soprattutto per una preventiva prototipazione e commercializzazione del campione.

Il passaggio dalla fase sperimentale del campione prototipale alla sua traduzione in forma costruttiva, costituisce un passaggio fondamentale della ricerca, non solo come raggiungimento di una più profonda comprensione del sistema, bensì

come una fase di completamento di modelli di utilità reali su cui effettuare validazioni tecnico-scientifiche e definirne il comportamento e le modalità di impiego e posa in opera della fibra biopolimerica a base di caseina. Le istanze teoriche e sperimentali raggiungono così il loro senso più compiuto nella fase finale indirizzata all'attività pratica e operativa, che costituisce l'essenza della ricerca, a corredo di un approccio metodologico valido di analisi e progetto, all'interno di un ambito complesso come quello della progettazione di sistemi di involucro "a secco" per l'ottimizzazione prestazionale ed energetica del patrimonio edilizio storico e di nuova costruzione.

Il quinto capitolo è incentrato sulla progettazione di nove sistemi costruttivi sperimentali che oltre a recepire istanze tecnologiche e materiche tipiche della tradizione, introduce al loro interno l'innovativo pannello termoisolante in fibra di caseina. Lo scopo è valutare le proprietà del materiale, la compatibilità, le caratteristiche strutturali e morfologiche, le problematiche dei metodi di posa in opera e la flessibilità operativa, al fine di ipotizzare possibili stratigrafie di facciate per la realizzazione di un involucro 'attivo', capace di interagire con l'ambiente interno ed esterno, attraverso l'interoperabilità dei suoi componenti di facciata, in relazione alla variabilità e alla flessibilità delle sue prestazioni, alle specifiche caratteristiche costruttive dell'edificio oggetto di intervento e delle esigenze di riqualificazione energetica ed architettonica.

Nel sesto e ultimo capitolo viene descritta la struttura del trovato e l'iter che ha portato al deposito del brevetto avvenuto in data 8 Giugno 2021 congiuntamente con l'Università degli Studi della Basilicata e il Politecnico di Milano. Perché possa fornire un beneficio, un brevetto deve essere sfruttato efficacemente; in linea di massima esso produrrà profitti solo se il prodotto incontrerà i favori del mercato oppure se aumenterà la forza ed il potere contrattuale dell'impresa

stessa. In merito sono state analizzate alcune opzioni per l'eventuale immissione sul mercato dell'invenzione brevettata (commercializzazione diretta, cessione a terzi, concessione in licenza, *joint venture*, etc.). Inoltre, in linea con l'ambito della ricerca sono stati definiti i criteri e i requisiti per la prototipazione del brevetto e quali possono essere gli scenari di sviluppo più confacenti (PoC- *Proof of Concept*, Trasferimento tecnologico, Fondo per la crescita sostenibile, start-up, spin-off universitari, etc.) e quali sistemi possono garantire la fruizione a incentivi nazionali (Brevetti+) o europei (EIC Accelerator, Horizon 2020, etc.).

La ricerca, in conclusione, rappresenta un formidabile strumento che consente attraverso l'innovazione di acquisire risorse economiche supplementari da investire in modelli di business e/o di ricerca. Con lo sviluppo della fibra biopolimerica a base di caseina, inoltre, è possibile dedurre come le tecniche industriali innovative potrebbero disporre oggi di impianti sempre più flessibili e sostenibili che consentono cicli di produzione brevi (*lean production*) riducendo al minimo l'apporto di materiali ed energia durante le fasi di produzione e limitare gli impatti sull'ecosistema (*Cradle to Cradle*). Inoltre, la sperimentazione e brevettazione della fibra di caseina, vuole dimostrare come l'uso ciclico di materiali di scarto e di demolizione in edilizia non prescinde, però, dall'impiego di risorse provenienti da altri settori produttivi proponendo l'adozione di modelli di consumo dediti alla riduzione degli sprechi di materia ed energia (*up-cycling* e *superuse*), soprattutto quelli derivanti dal settore delle costruzioni. Affine a questa ricerca oltre all'aver indagato e sperimentato un materiale prodotto a partire da uno scarto (caseina), è quello di fornire un presupposto per cui diviene essenziale eliminare il concetto stesso di rifiuto partendo dalla progettazione e impiegando strumenti innovativi di digitalizzazione, sostenibilità, interoperabilità, costruzione 4.0. e *Building Information Modeling*.

01

01 Evoluzione storica, architettonica e tipologica del sistema facciata

Sinòpsi Nella plurimillennaria storia dell'attività dell'uomo sulla terra si è da sempre manifestata la volontà di procacciare i viveri necessari per il sostentamento individuale e collettivo. La scoperta del fuoco, la sapiente modellazione di frammenti di pietra per la realizzazione di armi primitive e la nascita dell'agricoltura, rappresentano le fondamenta del progresso della civiltà umana. Da sempre, però, l'uomo ha manifestato la naturale volontà di proteggersi dalle condizioni climatiche esterne che tanto più rigide proliferavano, tanto più era lo sforzo tecnico per poter raggiungere le condizioni di ideali negli ambienti abitativi. Per tale motivo, si assiste alla istintiva ricerca dei luoghi già esistenti in grado di ospitare uomini e animali come, per esempio, sono le cavità ipogee naturali costituite da rocce tenere o poco compatte quali le sedimentarie clastiche (areniti, calcareniti, etc.) e le vulcanoclastiche (tufi, peperini, etc.) modellate dalla costante e iterata azione del vento e dell'acqua. «Ogni civiltà, per insediarsi, ha scelto i luoghi "elettivi" che le corrispondevano e le forme degli insediamenti hanno esaltato i caratteri originari di quei luoghi»¹. Tuttavia il carattere nomade dell'uomo preistorico necessario per cercare regioni più ospitali o, in tempi successivi, per praticare la pastorizia, lo hanno portato a procurarsi un riparo plasmato o costruito artificialmente utilizzando materiali locali, essenzialmente di natura vegetale. Nasce, quindi, il concetto archetipico di "capanna" definita nel 1753 dall'abate Marc-Antoine Laugier in "Essai d'architecture", il fondamento della composizione di un ordine architettonico di chiaro riferimento dei dettami vitruviani. La capanna, quindi, rappresenta il primo segno antropico dell'architettura abitativa dopo le grotte. È in questo contesto che avviene «la produzione di calore e di cibi caldi - e quindi l'elemento del focolare; di difesa dall'esterno - e quindi l'elemento della recinzione; dalle intemperie - e quindi il tetto; di difesa dalle inonda-

zioni - e quindi il terrapieno. Da questi elementi si sviluppano con necessità scientifica tutti gli altri»². La necessità scientifica, quindi, sfocia nella costruzione subordinata alla intelligenza dell'uomo, dal "genio", etimologia latina definita da Quatremère de Quincy nel "Dizionario storico di architettura" come «"ingenium", formata dal verbo "gignere" che significa in senso naturale generare, produrre, a cui deriva quella di "genio", che indica quella facoltà morale dell'uomo di cui è proprio il produrre, l'inventare»³. Si sviluppa il fenomeno della dimensione tangibile della tecnica, la "tèchne" che lavora sulla concretezza costruita, sulla possibilità di elaborare, plasmare e misurare lo spazio umano, ma anche l'identificazione precisa degli obiettivi e dei mezzi più opportuni al suo raggiungimento. Nascono, quindi, la copertura e le pareti esterne, con la funzione di proteggere dalle intemperie e dalle aggressioni oltre che di riparo di scorte e provviste, rappresentando la prima e la più importante ragione del costruire. «Le masse di pietra o di terra che delimitavano le cavità naturali vengono ridotte a uno strato relativamente sottile, che ha però il carattere di struttura creata dall'uomo. A questo punto l'edificio ha uno spazio interno e uno esterno di uguale importanza»⁴. Nel principio epistemologico della capanna e della sua evoluzione tipologica e costruttiva è possibile, inoltre, sottolineare anche la teoria di Gotfried Semper (Amburgo, 1803 - Roma, 1879) sulla definizione di "rivestimento". Egli afferma che le pareti della capanna erano formate non da muratura o legno, ma da tappeti o pelli, tessuti stesi che dividevano le stanze. Tali elementi sono sempre stati dipinti perseguendo echi winckelmanniani secondo il quale «il colore contribuisce alla bellezza, ma non è bellezza, bensì esso mette soprattutto in risalto questa e le sue forme»⁵. Questo dimostra quanto gli antichi perseguivano oltre all'aspetto funzionale e statico delle pareti e dell'involucro, anche la ricerca del

1. Zavarchitects, Abvarzan office building, Tehran, 2013, © Zavarchitects.

bello e del vero. Walter Benjamin in *«Le Affinità elettive»* definisce che «la bella apparenza è l'involucro di ciò che è necessariamente più velato. Cos'è, dunque, il bello se non l'insieme inseparabile e indecibile di oggetto e involucro, di velato e velo? Se ci si provasse a togliere il velo o comparirebbe un velo più profondo col suo oggetto velato o il nulla. [...] Né l'involucro, né l'oggetto è il bello, ma l'oggetto nel suo involucro. Disvelato, esso si rivelerebbe infinitamente inappariscente. Su ciò si fonda l'antichissima idea che nel disvelamento il velato si trasforma, che esso rimarrà uguale a se stesso solo sotto l'involucro. Così, di fronte a tutto ciò che è bello, l'idea del disvelamento diventa quella della sua indisvelabilità»⁶. Dunque l'involucro rappresenta nella sua definizione teorica e architettonica un tutt'uno con la struttura ed è qui che si cela il bello.

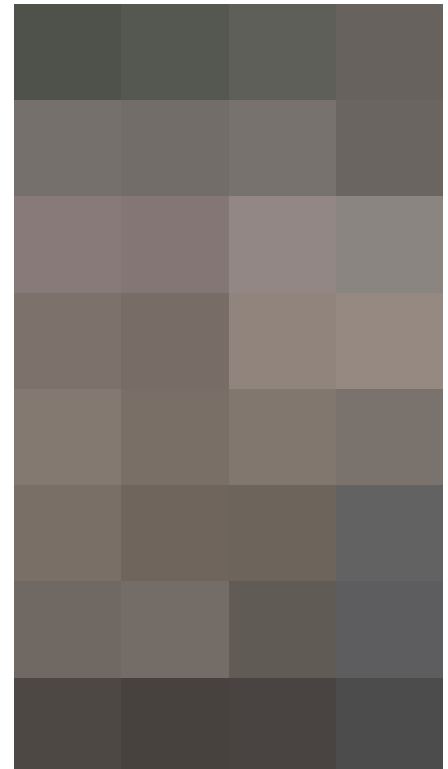


2

1.1. Il sistema facciata, connettivo tra forme ontologiche e forme rappresentative

È consuetudine nella produzione architettonica contemporanea omettere la logica e il sapere millenario della costruzione e dell'anima vitruviana dell'*ars costruendi* sottostando a ciò che Rem Koolhaas definiva già negli Anni '90 *«Bigness»*, un architettura estrema figlia del mercato, della pubblicità e del design, dove si smaterializza e diviene immagine di stravaganza, eccentricità e seduzione nonché apparenza di un oggetto della città. La verità strutturale si smaterializza scindendo definitivamente la struttura dall'involucro che diviene un sistema tecnologico a se stante, non rispondendo più al ruolo di costruzione. Per poter indagare nella presente ricerca la corretta individuazione e distinzione dei diversi sistemi tecnologici di involucro, parete e facciata, può essere utile una riflessione sul ruolo della costruzione all'interno dell'architettura, partendo dalla natura del termine *«tettonica»* e rapportandola con la *«stereotomia»*, attraverso lo studio delle connessioni che tengono insieme le modalità di costruzio-

ne dell'architettura e le procedure compositive, ovvero: quella *sintattica*, per elementi distinti, e quella *paratattica additiva* o *ipotattica* che lavora per masse giustapposte. Il termine tettonica (dal latino tardo *tectonīcus* e dal greco *τεκτονικός* «che riguarda l'arte del costruire», der. di *τέκτων -ονος* «costruttore») è lo studio della sintassi della costruzione dell'arte del comporre che trova nella sua accezione più ampia il significato fornito tra il 1844 e il 1852 da Karl Gottlieb Wilhelm Bötticher (Nordhausen, 1806 - Berlino, 1889) ne *«La tettonica dei Greci»*⁷ nel quale riferendosi all'architettura greca, definì *Kernform* (nucleo interno - funzione strutturale), e *Kunstform* (forma artistica). È da sottolineare l'importanza che Bötticher dava alla *Junktur* (giuntura) e alla *Fügung* (la disposizione finale, l'organismo edilizio) in cui si cela il legame tra concetto di stratificazione e concetto di tettonica. Partendo dalla definizione di *Junktur* è possibile individuare nel ruolo delle modanature dell'architettura ellenica, la giunzione tra struttura portante e portata, tra struttura e facciata. Anche Luigi Moretti (Roma, 1906 - Capraia Isola, 1973) assegnerà alle giunture delle modanatu-



2a

Né l'involucro, né l'oggetto è il bello, ma l'oggetto nel suo involucro.

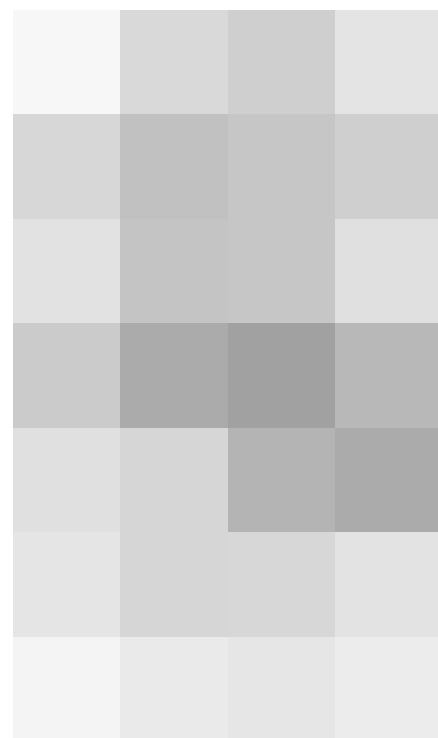


Il rapporto tra struttura e modanatura sta nella *junktur*, la connessione archetipica tra struttura e involucro.

re il ruolo di scandire i singoli elementi di una struttura in una legge spaziale comune: «le modanature apposte agli elementi architettonici discontinui – pilastri, colonne, portali, finestre – assolvono la funzione di precisare, di scandire l'individualità dei singoli elementi e di coordinarli in una legge spaziale comune. Se si immagina un edificio classico spoglio di sagome nelle sue membrature cade il suo ordine armonico in confusione plastica e costruttiva. E il discorso o il canto di una superficie di architettura antica si concentra, tra le pause dei quieti spazi, nelle modanature e in quei corrugamenti geometrici, come le scanalature di un fusto dorico, o di forme liberissime quali le bugne, ove la materia corrusa s'agita come torrente scuro»⁸ (fig.3). Anche altri successori di pensiero come per esempio Schinkel definiscono la modanatura come elemento in grado di supportare o collegare sistemi dell'organismo edilizio. In una lettura più ampia e contemporanea, nella giunzione (*junktur*) è possibile rinvenire il rapporto archetipo tra struttura e involucro. Inoltre, la conoscenza approfondita dell'utilizzo di grappe, zanche e piastre metalliche per le costruzioni

antiche e moderne, restituisce all'architettura ellenistica il principio tettonico di connessione, dove il giunto «che concretizzava la "legatura" era, in alcuni casi, elemento di raccordo, formale e strutturale, tra le parti dell'ordine architettonico, altre volte esso assumeva invece un ruolo esclusivamente strutturale ed era celato dall'apparecchiatura muraria»⁹.

In epoca coeva all'architetto tedesco Bötticher, un altro architetto a lui contemporaneo, Gottfried Semper, pubblica «I quattro elementi dell'Architettura» in cui elenca gli archetipi fondamentali - il focolare, il tetto, il recinto e il terrapieno - classificando l'*ars costruendi* secondo due processi fondamentali: la tettonica, che corrisponde, nella capanna caraibica all'intelaiatura lignea che ne racchiude la matrice spaziale e la stereotomia corrispondente, invece, al basamento costituito di elementi massivi (fig.4). «Attorno al focolare si raccoglievano i primi gruppi, si strinsero le prime alleanze, le primitive concezioni religiose si codificarono in consuetudini culturali. In tutte le fasi dello sviluppo della società esso costituisce il centro sacro, attorno al quale tutto si ordina e si configura. È il primo e principale, l'elemento morale dell'architettura»¹⁰.



2. Il «Cristo velato» e dettaglio (2a), opera scultorea di G. Sanmartino, Cappella Sansevero - Napoli, 1753.
3. Bötticher K., «Tectonique des Hellènes», Atlas, 1873, p.XVII.
4. «La capanna caraibica nella Grande Esposizione del 1851», in Semper G., «Der Stil in den technischen und tektonischen Künsten», vol.2, Edinburgh University Library, 1878, p.263.

La stereotomia è un termine coniato nel 1644 da Jacques Curabelle e deriva da *stereo-*, dal greco *στερεός* cioè “fermo, solido” e *-tomia*, dal greco *Τομή* ossia “taglio” definisce l’insieme di regole geometriche per la sezione in forma compiuta dei conci di una struttura muraria in pietra o altri materiali da taglio. Per Curabelle la stereotomia rappresentò l’astrazione dell’arte della rappresentazione geometrica e del tracciato per mezzo di regole proiettive delle sagome in vera forma delle facce dei conci di un sistema voltato per consentirne il corretto taglio¹¹ (fig.5). Mentre alla tettonica è affidata la sintassi compositiva attraverso elementi definiti per morfologia e materiale accostati tra loro per rendere evidente il sistema statico delle forze orizzontali e verticali; nella composizione stereotomica l’espressività è affidata al valore di superficie, dell’apparecchiatura muraria e della tessitura dei relativi conci, degli elementi di discontinuità come paraste, lesene o marcapiani e al rapporto tra pieno e vuoto mediante la sottrazione di materia dalla continuità della massa muraria che per sua natura è oggetto esclusivamente a sforzi di compressione. In questa sottile - ma evidente - differenza è presente il valore sintattico che trasforma la banalità costruttiva del sistema trilitico o del sistema arco/piattabanda, nella poeticità del tempio greco o della maestosità dell’acquedotto romano.

Nell’architettura romanica è possibile riconoscere tutti i proto-modelli stereotomici che raggiungono, nel Rinascimento, il pieno compimento teorico e pratico attraverso l’evoluzione delle tecniche rappresentative e razionali del disegno e delle metodologie di costruzione. Il rinvigorismento delle tecniche costruttive ha apportato il continuo affinamento della stereotomia che vede una sua declinazione nel Gotico in cui si perde il concetto di continuità della massa muraria a favore di tecnicismi strutturali quali costolonature, contraforti e pilastri polilobati per risolvere problemi legati alla staticità globale. Nel Settecento, con lo sviluppo della trattatistica e dello studio della ge-

ometria descrittiva, la stereotomia da originaria “arte del taglio delle pietre” si trasforma in “scienza del taglio delle pietre”, ovvero uno strumento di mera rappresentazione grafica a supporto degli antichi maestri costruttori. Alla luce della rivoluzione innescata dai nuovi materiali della Seconda Rivoluzione Industriale, quali ghisa, acciaio, vetro e di nuovi sistemi costruttivi a scheletro con materiali metallici e conglomerati cementizi, la stereotomia muraria entrerà in disuso, sancendo la nascita di nuovi sistemi costruttivi più confacenti agli standard abitativi richiesti dalla modernità.

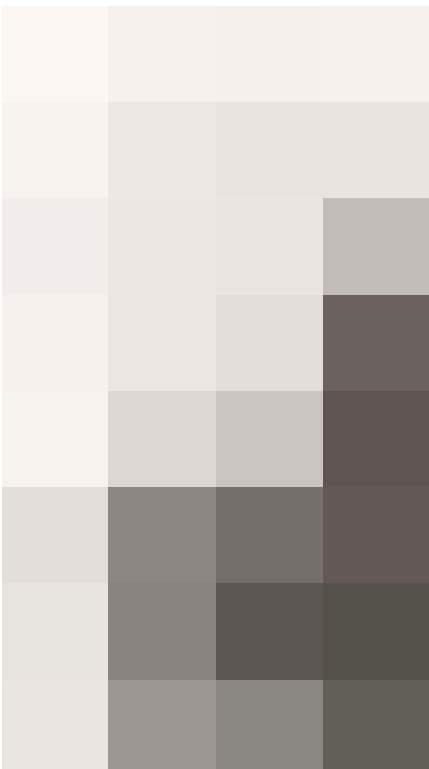
5. Esempio di metodo di taglio stereometrico par *équarrissement* (Frézier A.F., “*La Théorie*”, vol.1, glossario - voce *trait*, pp.408-409) e strumenti per la lavorazione dei conci, Trevisan C., “*Per la storia della stereotomia. Geometrie, metodi e costruzioni*”, Aracne, Roma, 2011, pag.12. L’operazione consisteva nell’estrazione di un blocco lapideo contenente idealmente il concio da realizzare. Successivamente si asportavano le parti superflue individuate applicando le proiezioni del concio alle facce del parallelepipedo.





6

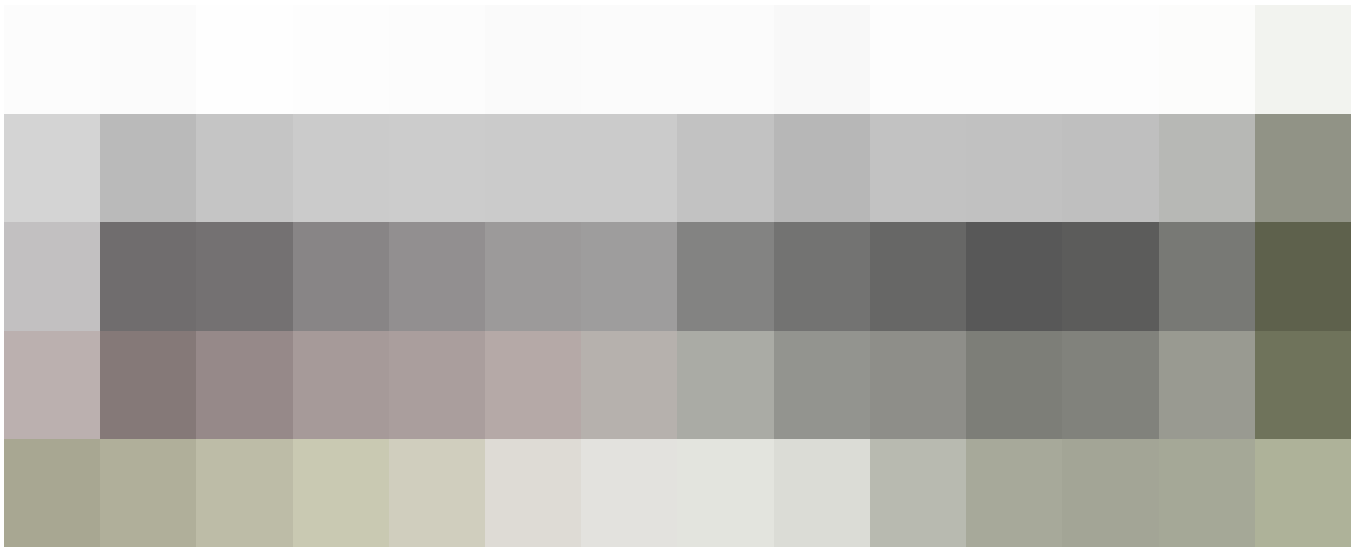
6. Sezione e dettaglio (6a) della Biblioteca Sainte-Geneviève di Henri Labrouste, in Labrouste H., *Plans et dessins relatifs à la construction et au décor de la bibliothèque Sainte-Geneviève*, Parigi, 1838-1850.



6a

È nel corso dell'Ottocento, quindi, che con lo sviluppo di nuove tecniche costruttive e la nuova disponibilità di materiali inconsueti, vocati alla nascente prefabbricazione industriale, giungono per mettere in crisi la tradizionale coincidenza di struttura e involucro nella muratura massiva, tra forma nucleare (*Kernform*) e forma artistica (*Kunstform*). Questo processo di scomposizione della costruzione nei suoi elementi fondamentali si interseca con la ricerca di un nuovo stile appropriato alle rinnovate tecniche costruttive ed agli innovativi materiali. La teoria semperiana del telaio ligneo a cui è demandata la funzione di sorreggere la copertura e della recinzione dello spazio di natura muraria stereotomica trova ulteriori corrispondenze nelle opere ottocentesche di Pierre-François Henri Labrouste e in modo particolare nella sua opera più celebre, la Biblioteca di Saint-Geneviève in cui introduce nell'architettura rappresentativa la distinzione tra struttura intelaiata in ferro e ghisa, che sostiene la copertura a velario della sala di lettura e il

recinto stereotomico murario (fig.6). La ricerca di una nuova identità, una nuova chiarezza concettuale degli elementi e della costruzione sono al centro del *fundamentum* dell'Architettura Moderna. Tra i grandi maestri del Movimento Moderno, Ludwig Mies van der Rohe (Aquisgrana, 1886 - Chicago, 1969) è fra gli architetti più influenti del Novecento. Sin dalla giovane età entrò nella bottega del padre dove apprese l'arte degli scalpellini e successivamente specializzandosi come ebanista. Questo fece della sua figura un profondo conoscitore degli antichi materiali, instaurando una certa affinità nella loro lavorazione che gli permisero l'applicazione di nuove tecniche strutturali. Il legame e l'influenza di architetti come Peter Behrens, Hendrik Petrus Berlage e Karl Friedrich Schinkel, gli permisero di sviluppare un deciso senso di monumentalità e l'ambizione di capire il reale compito dell'architettura che non era solo quello di inventare forme. «*Cercai di capire quale fosse allora il suo compito. Lo chiesi a Peter Behrens, ma egli non fu in grado di rispondermi.*



7

Semplicemente non si era mai posto la questione. Gli altri dicevano: “ciò che costruiamo è architettura”, ma non eravamo soddisfatti da questa risposta [...] dal momento che sapevamo che si trattava di una questione di verità, ci sforzammo di scoprire che cosa fosse in realtà il vero. Provammo un grande piacere nel trovare la definizione del vero in San Tommaso d'Aquino: “Adequatio intellectus et rei” o, secondo un filosofo moderno, che si esprime nel linguaggio attuale: “La verità è l'espressione della realtà”¹². Tale espressione sembra concretizzarsi nell'opera conclusiva della sua attività, la Neue Nationalgalerie di Berlino del 1968 in cui la struttura portante in acciaio è la parte propriamente tettonica, mentre le pareti atettoniche che danno forma allo spazio interno e all'involucro, risultano indipendenti dalla struttura stessa. La copertura cassettonata metallica trova continuità nel nodo trave-pilastro di sezione cruciforme le cui flange, oltre alla funzione strutturale, hanno il ruolo di enfatizzare le scanalature della colonna antica attraverso l'ombra portata. Questo processo fornisce una prima ipotesi miesiana di definizione del paradigma costruttivo adeguato al nostro tempo: la componente tettonica si è ormai emancipata dal recinto-rivestimento nella parete atettonica attraverso dematerializzati schermi marmorei, trasparenti o traslucidi, come i già citati tappeti colorati della capanna caraibica di Semper. È possibile, infatti, fornire una sempe-

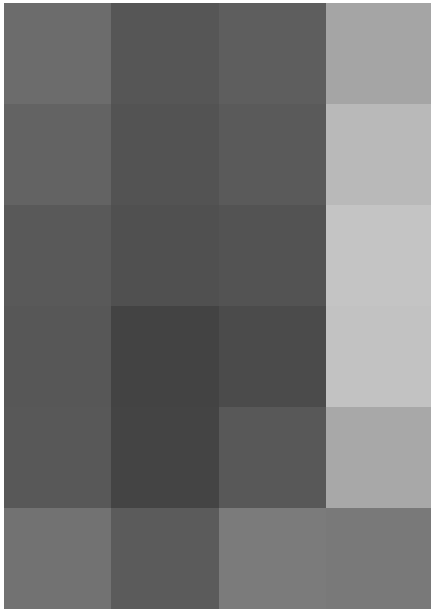
riana lettura nei progetti degli Anni '30 di Mies, soprattutto nelle case a corte, nel cui interno di un cortile delimitato da murature continue (recinto) è incluso un telaio tettonico in carpenteria metallica, a sostegno della copertura, mentre al podio-pavimentazione è demandata la natura stereotomica del progetto. Distinte sono, invece, le pareti trasparenti che rappresentano l'involucro dell'edificio e gli schermi marmorei atettonici che dividono la pianta libera, individuando il focolare, centro allusivo e simbolico della casa (figg.7-8).

7. Elaborazione grafica dell'Altes Museum di Berlino, opera dell'architetto Karl Friedrich Schinkel e della Neue Nationalgalerie di Berlino, opera dell'architetto Mies van der Rohe.
8. “Court House project (perspective)”, van der Rohe L. M., Mies van der Rohe Archive, © Artist Rights Society (ARS), New York - VG Bild-Kunst, Bonn.



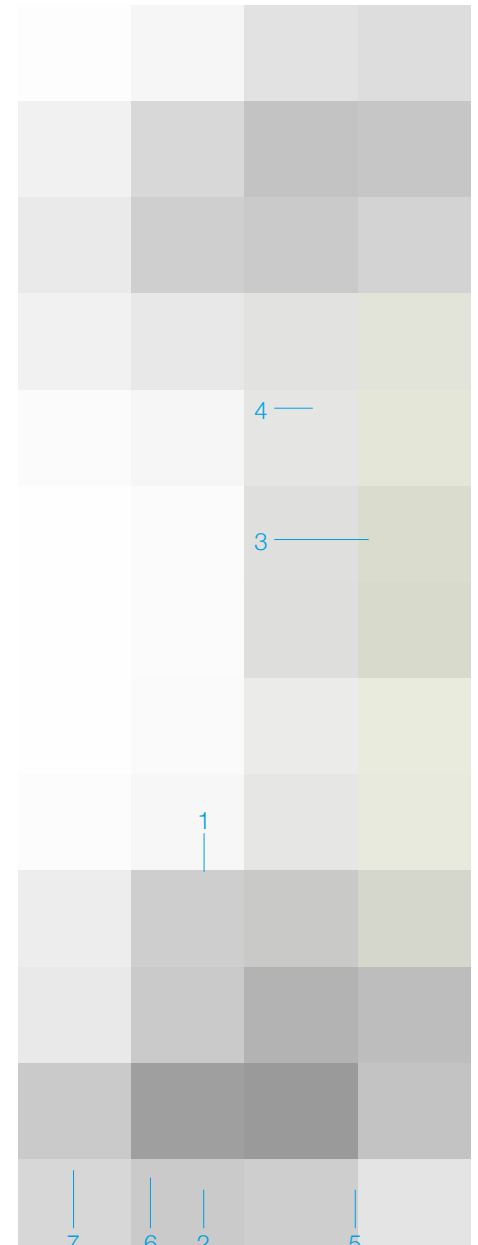
8

In queste architetture, soprattutto nelle pittoresche asimmetrie degli spazi come il progetto emblematico del padiglione di Barcellona, si ha un disvelamento parziale della costruzione e della struttura. Infatti, la copertura funge da velario atettoni-



co continuo consentendo una libera composizione degli spazi sottostanti. Questa ricerca trova compimento con il trasferimento di Mies van der Rohe negli Stati Uniti nel 1938 in cui si apre una nuova fase sperimentale al fine di rendere compiutamente comprensibile la parte tettonica e stereotomica della costruzione. A tal proposito egli tende nuovamente ad assimilare ed inglobare le componenti verticali nello spessore murario tradizionale scindendo il confronto tra spazio e involucro e puntando la ricerca verso una staticità classica. Questa progressiva idealizzazione deriva dalla sostituzione della generica sezione cruciforme del pilastro di Mies dei primi anni Trenta con la

trave a doppia T standardizzata in uso in America. Lo sviluppo di questa linea di pensiero di ritorno alla stereotomia e alla tettonica, trova compimento nel progetto dell'Alumni Memorial Hall presso l'Illinois Institute of Technology di Chicago, in cui l'idealizzazione del profilo a doppio T, culminerà con pilastri in acciaio inglobati nel calcestruzzo per una migliore resistenza al fuoco (fig.10). La verità e la chiarezza strutturale si mostrano in corrispondenza dell'angolo dell'edificio, in cui si svela come il pilastro a doppio T si inserisce nella muratura ed in che modo i montanti angolari si trovano sui centri delle colonne in entrambe le direzioni (figg.9-9a).



9. Immagini fotografiche della soluzione angolare dell'Alumni Memorial Hall presso l'Illinois Institute of Technology di Chicago progettato da Ludwig Mies van der Rohe, in Serrano Avilés R., "Mies van der Rohe's Illinois Institute of Technology: Analysis and History of a Composite Development", ETS Arquitectura (UPM), pag.252.

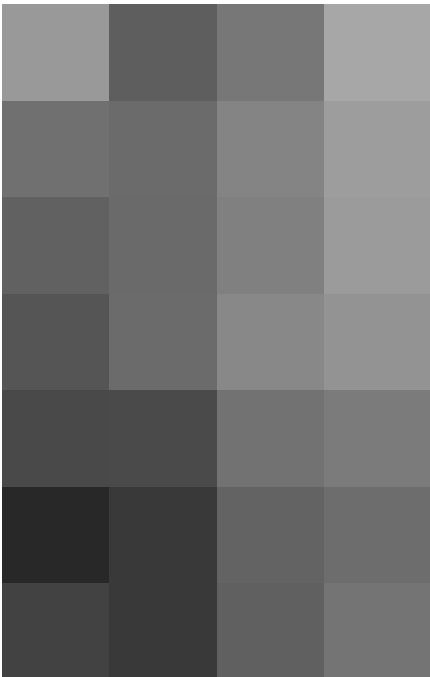
10. Particolare tecnologico in pianta (scala 1:10) dell'Alumni Memorial Hall presso l'Illinois Institute of Technology di Chicago progettato da Ludwig Mies van der Rohe. Legenda: 1 pilastro in calcestruzzo armato con profilo metallico a doppio T

inglobato; 2 montante in profilato d'acciaio a doppio T; 3 montante trasversale in profilato d'acciaio a T; 4 muratura in blocchi lapidei squadrati; 5 piastra metallica basamentale; 6 telaio dell'infisso in profilato metallico; 7 finestra in ferro con singolo vetro.

Tra il 1952 e il 1956, la ricerca di Mies sulla possibile dissoluzione tra struttura e involucro, trova un momento di assoluta conflittualità quando affronta il tema della grande aula senza sostegno. Come afferma Colin Rowe, l'evoluzione dell'International Style è stato profondamente «influenzata da un frattura concettuale tra spazio centripeto e spazio centrifugo, l'uno derivante dal palladianesimo e l'altro che trae origine sostanzialmente dall'anti-monumentalismo dell'ampliamento operato da Wright sulla pianta dell'English Free style. Questo scisma, afferma Rowe, è ben espresso nella Crown Hall, dove la scatola di vetro della luce di 67x37 metri non può in alcuno modo offrire una lettura univoca della sua composizione centrale»¹³.

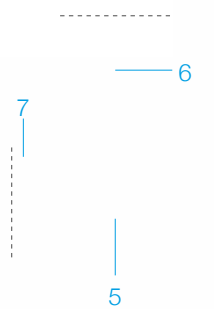
La connotazione del luogo è fornita, quindi, dalla copertura e dal perimetro, il recinto realizzati con due sistemi formali distinti. «Il recinto si costruisce attraverso la successione di due ordini di pilastri. Il maggiore che stabilisce la relazione con le travi della copertura, il minore che si succede lungo l'intero perimetro dell'aula. Il tetto è costruito dalle grandi travi in acciaio poste a coronamento, cui è attribuito il ruolo espressivo prevalente, e dal piano di copertura che appare sospeso all'intradosso delle travi. Le travi estradossate si legano ai pilastri di sostegno che si trovano in primo piano sulla facciata e, insieme, stabiliscono la relazione tra le fronti lunghe e dai pilastri che si succedono con un intervallo ampio, disponendosi trasversalmente al lato lungo dell'edificio»¹⁴ (figg.11-12).

12. Particolare tecnologico in pianta della Crown Hall presso l'Illinois Institute of Technology di Chicago progettato da Ludwig Mies van der Rohe nel 1952. Legenda: 1 montante perimetrale in acciaio; 2 pilastro in acciaio; 3 piastra perimetrale di raccordo in acciaio; 4 finestra in ferro con singolo vetro; 5 arcareccio di copertura in acciaio; 6 trave di copertura estradossata in acciaio; 7 lamiera ondulata di copertura.



11

11. Soluzione angolare e strutturale della Crown Hall presso l'Illinois Institute of Technology di Chicago progettato da Ludwig Mies van der Rohe nel 1952.

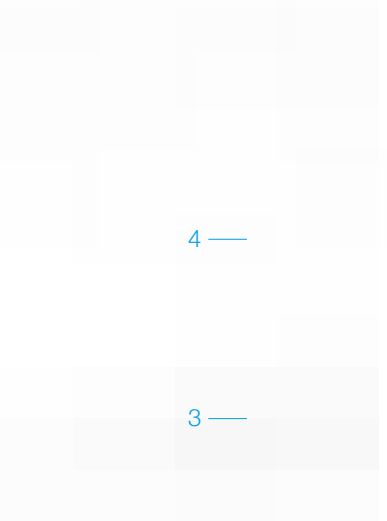


1



2

1



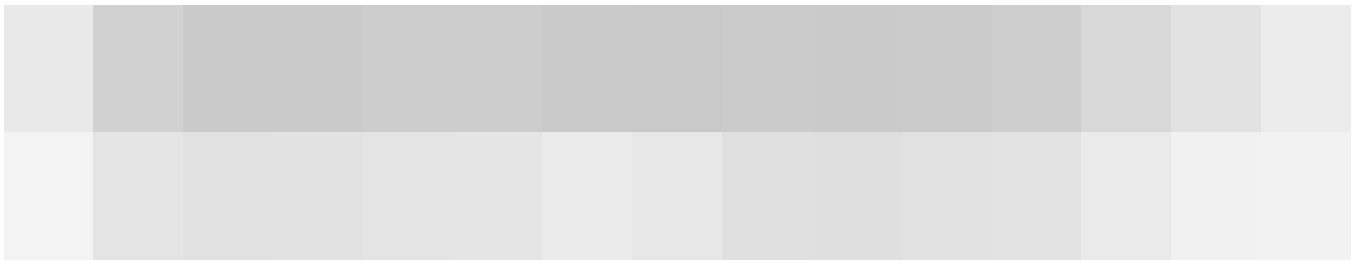
4

3

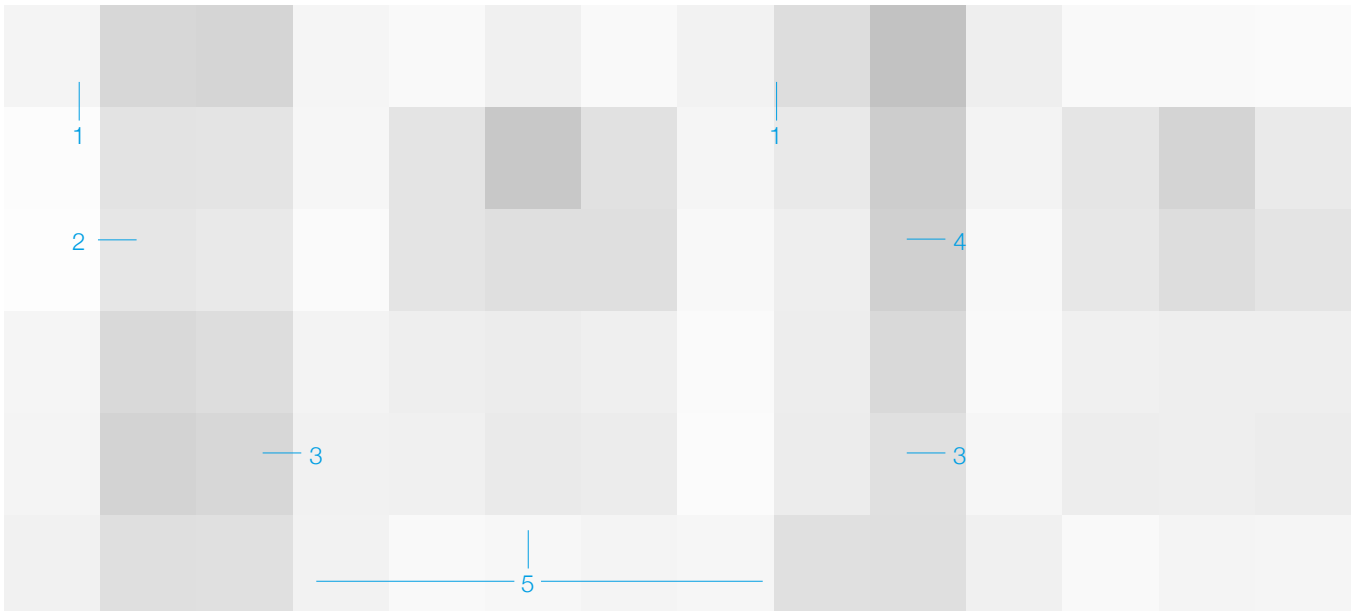
6

5

2



13

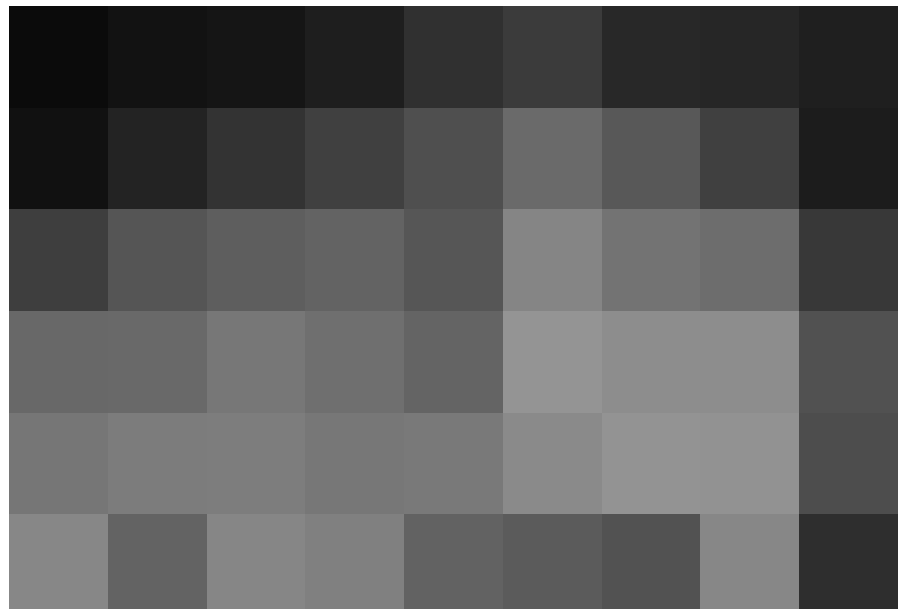


14

13. Sezione prospettica della struttura metallica della Convention Hall di Chicago progettata da Ludwig Mies van der Rohe nel 1953, Mies van der Rohe Archive, © Artist Rights Society (ARS), New York - VG Bild-Kunst, Bonn, © MoMA, New York.
14. Particolare tecnologico della doppia versione del pilastro in calcestruzzo armato progettato da Ludwig Mies van der Rohe. Legenda: 1 struttura tralicciata di elevazione rivestita in lastre di marmo; 2 pilastro cuneiforme in calcestruzzo armato; 3 plinto di fondazione in calcestruzzo armato; 4 pilastro in acciaio (seconda versione); 5 palificata sospesa.
15. Modello architettonico della Convention Hall di Chicago progettato da Ludwig Mies van der Rohe nel 1953.

L'espressione più monumentale della grande aula è nel progetto mai realizzato delle Convention Hall di Chicago, progettata nel 1953 e considerata l'ultima affermazione suprematista di Mies. L'enorme edificio, alto 18 metri e con una struttura metallica a traliccio, era sopraelevato rispetto alla linea di terra di 6 metri e avrebbe dovuto ospitare una sala per

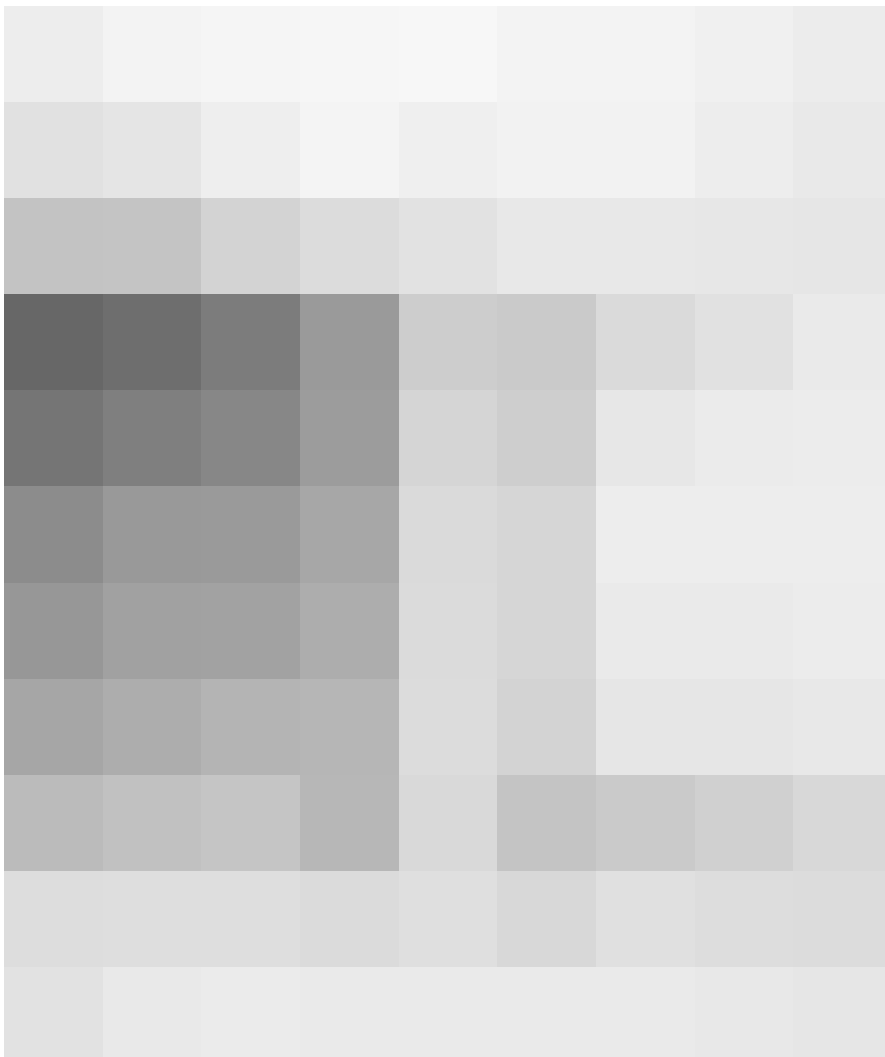
le assemblee coperta da una struttura dalla luce colossale di 220 metri sostenuta da 24 pilastri (6 per lato) cuneiformi in calcestruzzo armato e plinti di fondazione poggianti su una palificata (figg.13-14). Ancora più ardito è l'involucro dell'edificio, rivestito interamente in lastre di marmo, che si estendono indifferentemente su facciate e copertura (fig.15).



15

Nella Neue Nationalgalerie di Berlino il tempio moderno di Mies, retaggio delle visioni shinkeliane, e nel progetto del 1957 dell'edificio amministrativo di Ron Bacardi y Compagnia a Santiago de Cuba (fig.16), si completa la visione dell'architettura di Mies da cui poter ripartire per cercare e sperimentare nuove direzioni dell'arte del costruire del nostro tempo. L'eliminazione del controsoffitto nel nuovo museo di Berlino, comporta lo svelamento di tutte le componenti e le articolazioni strutturali dell'edificio in cui la copertura a cassettoni si presenta come un piano continuo sospeso e il recinto spaziale rimane un involucro dematerializzato, distanziato dallo scheletro strutturale. Questo equilibrio dialettico, tendente ad un ritorno alla classicità, instaura un reciproco collegamento tra tutti gli elementi della costruzioni, quali la terrazza stereotomica, lo scheletro tettonico

e le pareti tessili semperiane, tramutate in superfici di marmo e vetro. L'evoluzione storica, architettonica e costruttiva del sistema facciata e degli involucri che la compongono è particolarmente complessa, caratterizzata da avvicendamenti teorici e di fatti pratici, una evoluzione strettamente collegata alla evoluzione delle tecniche costruttive, dei materiali e dei relativi processi di produzione e dei nuovi sistemi edilizi, in particolar modo della struttura a telaio che sarà destinata a produrre profonde trasformazioni nello sviluppo successivo dell'architettura. Tale fenomeno si pone come fattore determinante della scissione tra struttura e involucro edilizio, della loro reciproca interdipendenza e delle rispettive funzioni: al telaio il compito di sostenere; all'involucro quello di rappresentare nella *facies* esterna, le ragioni dell'architettura, le gerarchie, il "carattere" dell'edificio.



16. "Ron Bacardi y Compania, S.A., Administration Building, project, Santiago, Cuba, Elevation of column with roof and glass wall, final version", van der Rohe L. M., Mies van der Rohe Archive, © Artist Rights Society (ARS), New York - VG Bild-Kunst, Bonn.



17

17. Fasi costruttive per la realizzazione della yurta, la tenda tradizionale dei nomadi dell'Asia centrale, particolarmente diffusa in Mongolia, Kirghizistan e Kazakistan. In questa antichissima tipologia architettonica è già possibile ravvisare la separazione tra struttura portante (ottenuta dall'intreccio di elementi vegetali) e involucro (realizzato con rivestimenti tessili in feltro di pecora o cammello, pellami, etc.).

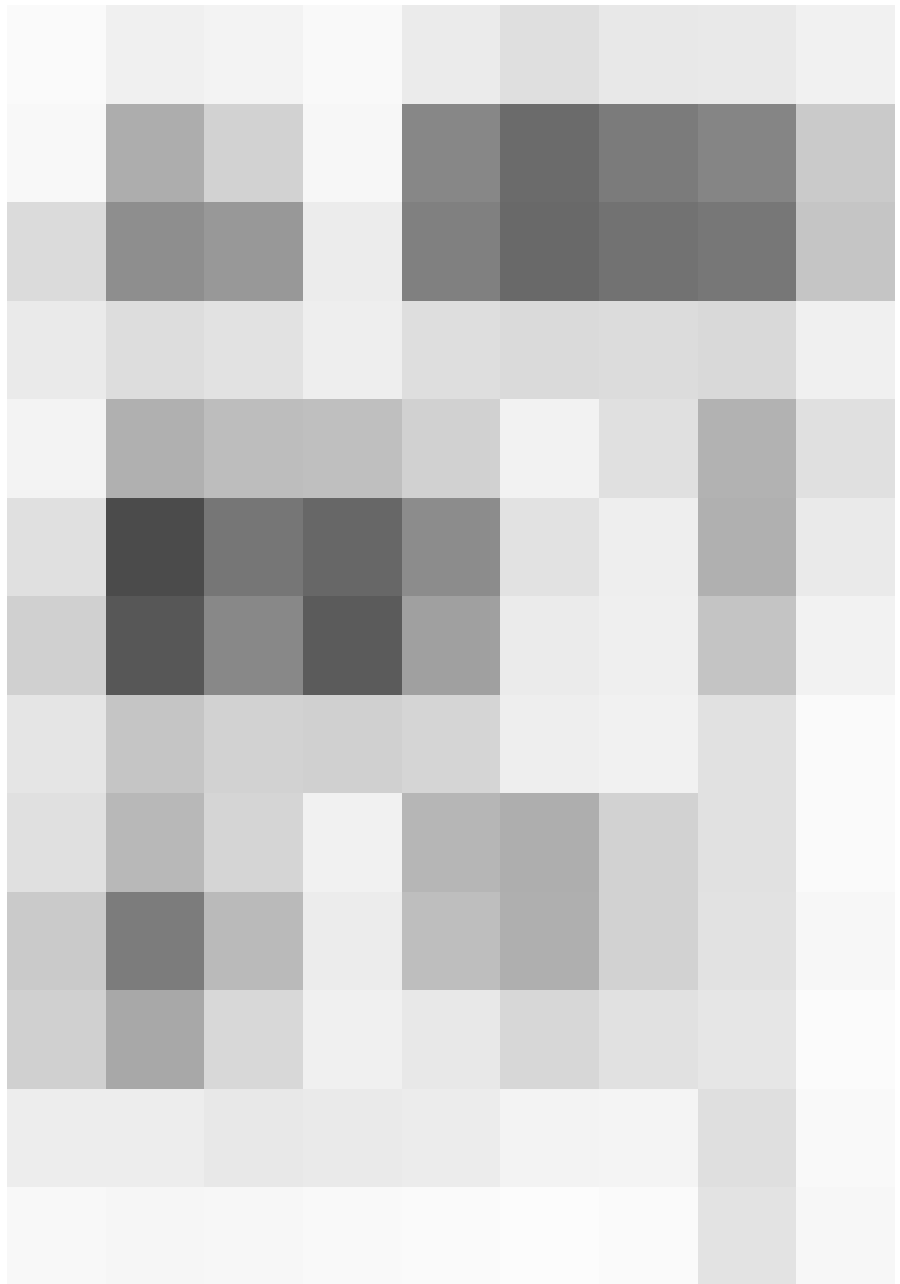
1.2. La “parete esterna”, evoluzione stereometrica e sintattica del sistema trilitico e del sistema arco-piattabanda

La definizione di “parete esterna” può essere astratta nelle sue componenti essenziali tanto nella posizione rispetto all’ambiente esterno, quanto come sottosistema edilizio. Infatti, le pareti non sono semplicemente una delimitazione dello spazio antropico e dello spazio naturale, ma è anche una componente essenziale della struttura portante. Per questo motivo al concetto di parete viene spesso associato il comportamento di robustezza, di massività stereometrica o addirittura quello di chiusura, in grado di definire l’identità del costruito nei confronti del mondo esterno. L’uomo costruisce il primordiale ambiente domestico come protezione dal vento, dalla pioggia, dal caldo e dal freddo, nonché dalle aggressioni esterne delimitandosi in una sfera privata che rappresenta la più importante ragione del costruire. «Allora, da dove prendere origine la copertura o la parete? In maniera simile all’oziosa questione dell’uovo e della gallina, ci si domanda se gli

involucri edilizi sono nati anzitutto come chiusure del tetto a protezione dalle intemperie o come recinto per tenere lontani animali feroci»¹⁵. Sempre in riferimento alla *disquisitio* di Gottfried Semper nel secondo volume di *Der Stil*¹⁶ la nascita dello spazio architettonico vede nel processo di intreccio di rami e ramoscelli l’antesignano della parete. Egli lo definisce «*l’anima di qualsiasi opera architettonica*»¹⁷ in grado di recepire in relazione all’aspetto sociale, agli influssi climatici, della natura del territorio e dei popoli, combinazioni differenti¹⁸. Ancora oggi sopravvivono le *jurte* (in turco: *yurt*), tende circolari in materiale tessile e pellame di alcuni popoli nomadi delle etnie turche o mongole (in questo caso definite “*ger*”); tipologie costruttive che distinguono coerentemente l’involucro e la struttura portante (fig.17). Dalla notte dei tempi della storia umana, sono state erette anche pareti esterne portanti piene, il cui sviluppo tipologico-costruttivo varierà in relazione alle materie prime disponibili in loco ed alla capacità tecnica delle diverse civiltà, in modo particolare quella greca (promotrice del sistema trilitico) e romana (fioriera del sistema arco-piattabanda).

Architettura e costruzione ctonia, a tenda e a capanna

Un pensatore dell'architettura che cercava di trovare un punto di incontro tra i dogmi del classicismo con il nuovo afflusso di conoscenze empiriche fu *Antoine-Chrysostome Quatremère de Quincy* (Parigi, 1755 - Parigi, 1849). Profondamente influenzato dall'abate Marc-Antoine Laugier (Manosque, 1713 - Parigi, 1769), Quatremère descrisse la sua opera di una vita come uno sforzo per formulare una «teoria del principio originario da cui nasce l'arte»¹⁹. La nozione dei "principi originari", tuttavia, non aveva più lo stesso significato che aveva per Laugier: più che il principio universalizzante della capanna primitiva, Quatremère - come Charles-Louis de Secondat, barone di Montesquieu (La Brède, 1689 - Parigi, 1755)- ha presentato l'origine dell'architettura come un principio storicamente e geograficamente differenziato. Quatremère, infatti, distingue tre tipi di comunità umane: cacciatori e raccoglitori, pastori nomadi e popoli agricoli. Mentre il primo gruppo non possedeva le conoscenze tecniche per la realizzazione di opere costruite (utilizzando, difatti, cavità naturali come riparo), le società nomadi svilupparono tende e altre strutture trasportabili. Solo la comunità agricola, tuttavia, si può affermare che abbia sviluppato un'architettura propriamente detta, sotto forma di capanna in legno. Queste tre manifestazioni primordiali dell'architettura - la grotta, la tenda e la capanna, costituiscono tre distinti tipi di origine, ciascuno corrispondente, come afferma Quatremère: «nella loro architettura, che ripercorre questa prima origine»²⁰. Come il carattere della tenda è mantenuto oggi nelle strutture a padiglione dell'architettura nomade asiatica, così la grotta (o comunque ambienti ctoni - sotterranei) può ancora essere individuata nelle antiche cavità rocciose mentre, nelle massive costruzioni egiziane e nei templi greci continua a riecheggiare l'origine archetipica della struttura trilitica della capanna in legno (fig.18).



18

Rifiutando l'assioma di Laugier, Quatremère sostituì l'*uniformitarismo illuminista* al *determinismo geografico* di Montesquieu. La forma era un prodotto - non di un principio universale, ma piuttosto delle condizioni particolari da cui ha avuto origine. Ogni area geografica aveva il suo tipo di origine che ha continuato a condizionare la sua espressione architettonica nel corso della storia. Quatremère ha etichettato questa espressione *caractère relatif*²¹, con cui egli comprese la particolare capacità dell'architettura di riflettere la geografia e il clima del suo ambiente, nonché le tradizioni delle persone che l'hanno creata.

18. Chambers W., *The Primitive Buildings, A Treatise of Civil Architecture*, Glasgow University Library, Department of Special Collection, 1759.



19

19. **Matera, città dei Sassi, Patrimonio Mondiale UNESCO.** Il nucleo originale si è sviluppato a partire da insediamenti rupestri scavati nella roccia calcarenitica e successivamente modellato con strutture sempre più complesse.

Con questa teoria dell'origine tripartita, Quatremère radicalizza il sogno di Laugier di una teoria dell'architettura autonoma e laica. L'origine dell'architettura, dal suo punto di vista, si trova né come ordine trascendentale né come legge universale, ma piuttosto nella condizione 'naturale' di ogni area geografica. Come ha osservato Sylvia Lavin: «*d'ora in poi, qualsiasi architettura - buona o povera che sia - potrebbe essere vista come rivelatrice della civiltà umana e quindi come un fenomeno profondamente sociale*»²². La riformulazione di Quatremère avrebbe implicazioni radicali per il discorso architettonico del XIX secolo. Lottando per sostenere l'autorità del classicismo, la linea di argomentazione di Quatremère ha anche permesso di vedere gli stili storici come fenomeni relativi, potenzialmente disponibili per la scelta. Trasformando il principio dell'origine di Laugier in un tipo convenzionale, Quatremère ha inconsapevolmente aperto la strada allo storicismo radicale che tutta la sua carriera ha cercato di limitare. Questo relativismo sarebbe stato colto con entusiasmo dalla generazione che si ribellò contro di lui

all'*Ecole de Beaux-Arts* negli anni Venti e Trenta dell'Ottocento, per il quale la storia dell'architettura era, come scrive Barry Bergdoll nel suo libro "European Architecture, 1750-1890", «*nient'altro che una lezione [...] specifica al tempo e al luogo*»²³.

Architettura ctonia

Osservando il progredire della storia si assiste ad una attività antropica dedicata alla ricerca di spazi già esistenti in grado di ospitare e proteggere uomini e animali, come le cavità nel terreno o nella roccia o le aree di vegetazione più folta. «*Una forma insediativa in continuità morfologica con le preesistenze fisiche, con il sito geografico, con i caratteri topografici, con gli assetti morfologici del territorio. Il tema dell'architettura di sottrazione è oggi di fondamentale importanza, in quanto permette di affrontare questioni come la comprensione del luogo e delle sue caratteristiche geomorfologiche, la sua traduzione formale e tipologica nelle costruzioni e nell'abitare, e nelle regole di corrispondenza tra architettura e sistema costruttivo, compresi uso dei materiali messi a disposizione e della luce naturale*»²⁴ (fig.19).

Anticamente il sapere costruttivo era sempre guidato da regole empiriche ed organiche, prive di codificazioni e dettami. Per architettura "ctonia" (definita anche "scavata", "sottrattiva", "negativa", "vernacolare" o "ipogea") si intende uno spazio modellato dall'uomo all'interno di una massa solida con lo scopo di trovare un riparo dall'ambiente esterno. Ben presto l'uomo imparò ad eseguire ampliamenti e prolungamenti verso l'esterno utilizzando il materiale lapideo ricavato dal processo di sottrazione della materia rocciosa.

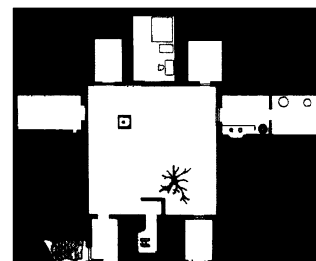
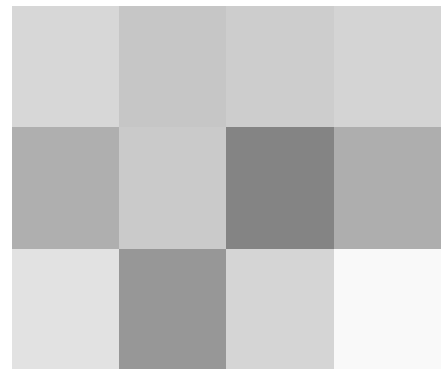
Questo processo costruttivo non richiedeva un grande impiego di materiali aggiuntivi e rappresenta ancora oggi il primo esempio di architettura bioclimatica. Il benessere abitativo, infatti, era garantito da una serie di accorgimenti empirici basati sull'osservazione del luogo e dallo sfruttamento delle risorse naturali (acqua, sole, terra). Il considerevole involucro murario o la massa rocciosa che inglobava l'ambiente interno riduceva al minimo le escursioni termiche sia in estate che in inverno, grazie al principio fisico dell'inerzia termica, ovvero la capacità di un materiale o di un sistema costruttivo di variare più o meno la propria temperatura al mutare della temperatura ambientale.

L'utilizzo di ambienti ipogei naturali o scavati nel sottosuolo è un fenomeno attestato fin dalla comparsa delle prime civiltà. Numerose sono le testimonianze in cui sono manifeste le volontà umane di una ricerca spaziale-architettonica nel sottosuolo e numerose sono anche le diverse funzioni che questi luoghi hanno rappresentato: non solo luoghi dell'abitare, ma anche luoghi con funzioni religiose, funerarie, militari, artigianali, spesso arricchite da apparati artistici e decorativi, la cui lettura ha permesso lo studio di diverse culture, tradizioni, usi e costumi dell'attività umana.

Tra questi il culto della Madre Terra praticato nel neolitico in Cina ha determinato il gran numero di abi-

tazioni scavate nel *loess* del Fiume Giallo, un deposito formato da sedimenti di sottile sabbia calcarea trasportata nei secoli dal vento e limo ed il cui nome deriva dall'Altopiano del Loess nella Cina centrale²⁵. In questa regione l'uomo ha sfruttato le caratteristiche del loess (estrema erosione e facilità di lavorazione del suolo) per la costruzione di abitazioni ipogee utili per ripararsi dall'escursione termica giornaliera, che può superare i 20°C. Nell'Altopiano del Loess, infatti, il clima è di tipo continentale con inverni secchi e molto rigidi ed estati torride.

Le tipologie di abitazioni più rudimentali, prima dell'impiego di elementi lignei, sono quelle denominate "a tasca", semplici ambienti scavati nel suolo profondi circa 3 metri risalenti al periodo della dinastia Xia in Cina, circa 4000 anni fa. L'impianto ipogeo era ottenuto scavando orizzontalmente quattro pareti per formare un cortile centrale da cui si innestavano le abitazioni (costituite da uno o più ambienti voltati a botte) e la rampa (o corridoio) sotterranea per il superamento del dislivello (figg.20-21).



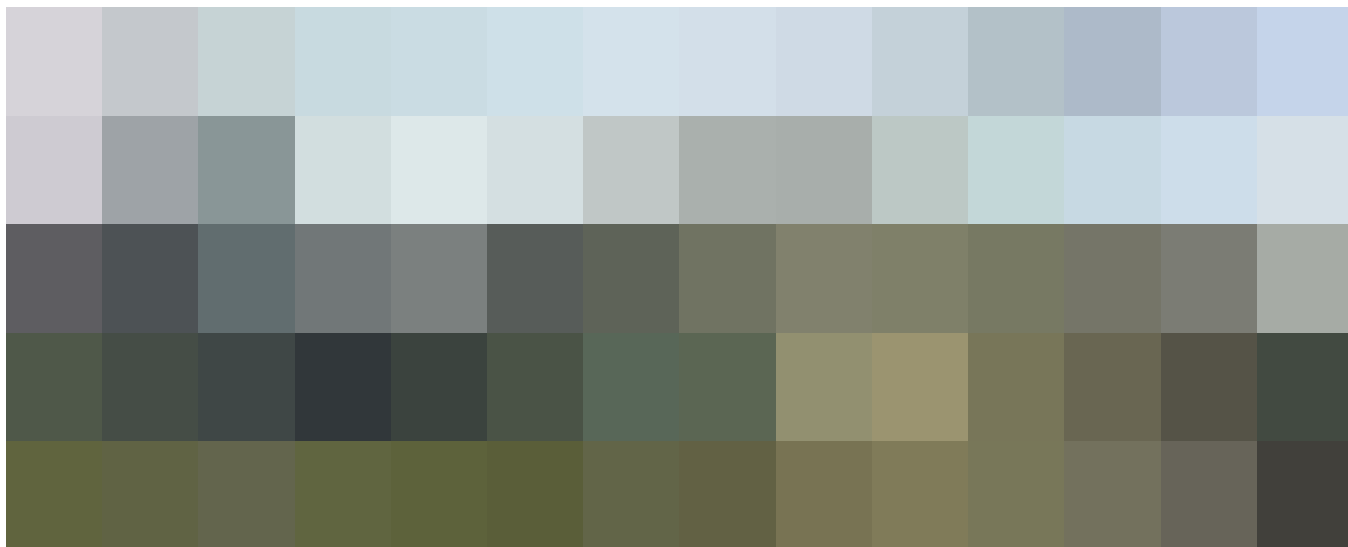
21

20. Abitazioni sotterranee a Yaodong, nell'Altopiano del Loess in Cina, © IMAGO/VCG.

21. Schema planimetrico e assonometrico di una abitazione scavata nel loess.



20



22

- 22. Grotte di Barabar, India, in www.hisour.com.
- 23. Complesso di grotte Bhaja Caves, India, © Saurabh, Flickr.
- 24. La stupa, oggetto della devozione buddhista, © Elroy Serrao, Flickr.

La tradizione delle dimore rupestri ed ipogee è presente anche presso altre popolazioni: gli Uros, antica popolazione preincaica delle rive del Titicaca, in Bolivia scavano abitazioni sotterranee per una memoria che ha radici nei miti della loro storia.

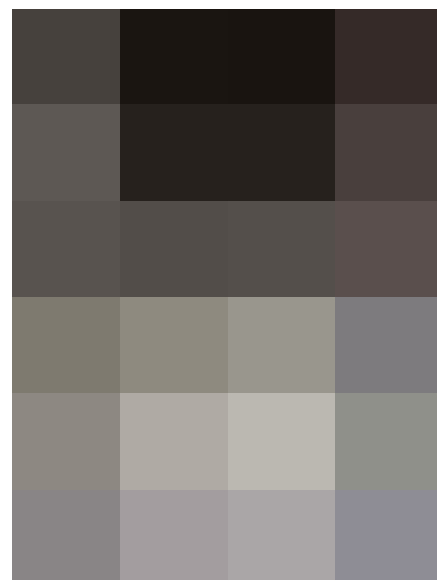
«Gli Uru si considerano gli ultimi rappresentanti di una pre-umanità che sarebbe stata distrutta dal Dio Sole e, per evitare di essere nuovamente colpiti da questo inesorabile nemico, hanno interrato le loro dimore»²⁶.

In India, invece, la popolazione praticava il processo di sottrazione della roccia per realizzare ambienti architettonici di natura religiosa. La più antica architettura scavata nella roccia si trova nelle Grotte di Barabar e Nagarjuni, risalenti all'impero Maurya (322-185 a.C.) (fig.22). La maggior parte degli ambienti ipogei sono costituiti da due camere scavate interamente nel granito con la superficie interna levigata con lo smalto mauryano²⁷.

Sempre in India, un esempio pregevole di tempio realizzato con la tecnica della sottrazione è rappresentato dal complesso di grotte Bhaja Caves (fig.23) in cui è possibile ravvisare il monumentale arco d'ingresso del grande santuario - chaityagriha²⁸ (fig.24).



23



24

I templi sono la maggiore e più costante espressione della cultura fiorita nel mondo. Lo studio di questi primi esempi di architettura vernacolare permette di scoprire il concetto dello spazio scavato in cui «affiorano elementi indicanti la presenza di una stratificazione gerarchica della società, con a capo una casta che presumibilmente riteneva il potere temporale come quello religioso»²⁹.

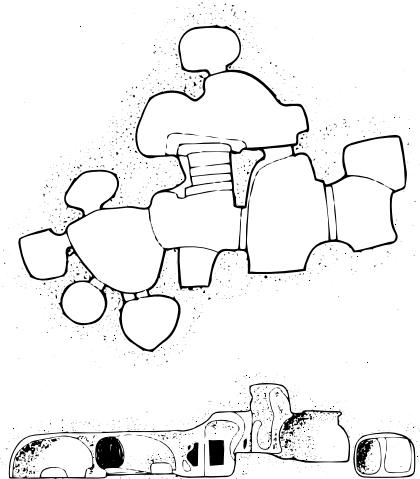
Nell'area del Mediterraneo si conoscono numerose tombe a grotticella e luoghi di culto scavati: tra questi, il sito più grandioso è l'ipogeo di Hal-Saffieni a Paola nell'isola di Malta, luogo di culto e sepoltura costituito da camere interconnesse scavate nella *globigerina*³⁰ e disposto su tre livelli.

Una delle caratteristiche singolari del complesso rupestre riguarda il modo in cui la maestria degli scarpellini ha riprodotto nell'ambiente vernacolare colonne, triliti, architravi, pilastri, volte e absidi a imitazione delle costruzioni murarie, testimoniando l'evoluta conoscenza dei sistemi costruttivi anche da parte delle popolazioni ctonie (fig.25).

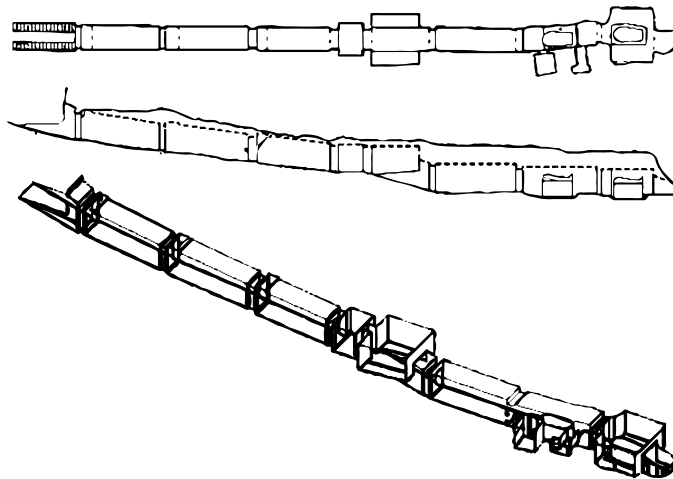
È sorprendente come queste architetture 'amniotiche' siano sta-

te interamente scavate utilizzando strumenti rudimentali come la selce, l'ossidiana ed il corno osseo animale³¹.

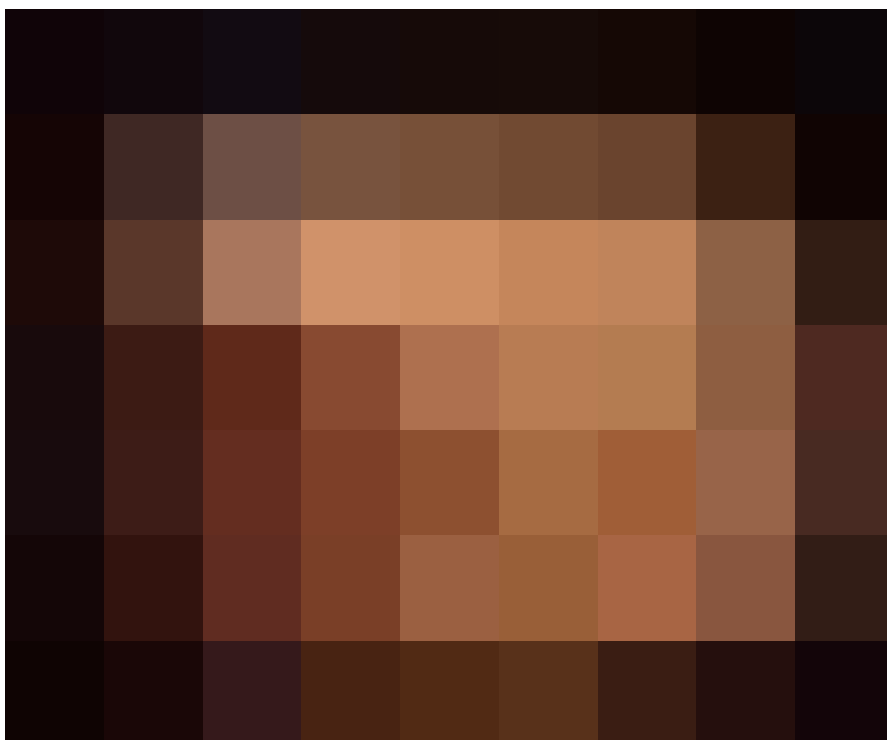
Tra le numerose civiltà del Mediterraneo, quella Egiziana ha sempre perseguito un particolare interesse per i luoghi ctoni destinati, anche in questo caso, a funzioni di rito religioso. Tra gli esempi più significativi è senza dubbio il maestoso tempio di Mentuhotep II e la tomba della regina Tausert, una delle più estese della Valle dei Re a Tebe con i suoi 160 m di lunghezza (fig.27). Le tombe sono generalmente articolate lungo un corridoio scandito da un anticamera per ciascuna camera sepolcrale.



26



27



25

25. Interno dell'ipogeo di Hal-Saffieni a Paola nell'isola di Malta, in www.viaggimalta.it.

26. Schema planimetrico dell'ipogeo di Hal-Saffieni a Paola nell'isola di Malta. Elaborazione grafica del primo rilievo planimetrico tracciato nel 1903 da Padre Manuel Magri della Compagnia di Gesù.

27. Schema planimetrico della tomba della regina Tausert nella Valle dei Re a Tebe.



28

28. Tomba dei Leopardi, Tarquinia, © Soprintendenza Archeologica del Lazio e dell'Etruria Meridionale, fotografia di Matilde Marzullo, 2015.

29. Schema planimetrico della Tomba François o dei Saties a Vulci.

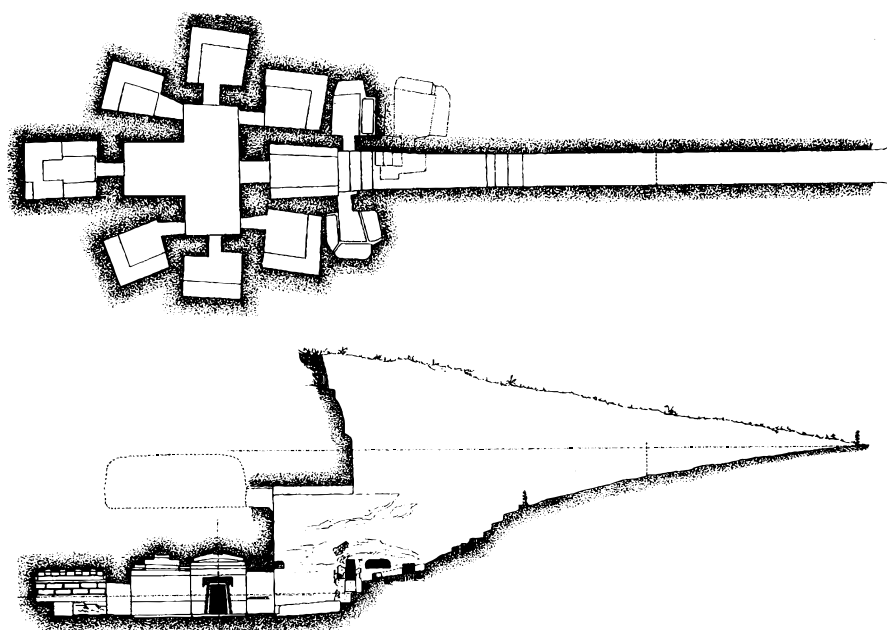
30. Pittura murale nella Tomba François rappresentante la lotta tra la città di Vulci e altre città etrusche.

Anche popolazioni pre-romane presenti tra l'età arcaica (VI secolo a.C.) e quella ellenistica (IV-II secolo a.C.), come gli Etruschi hanno lasciato la testimonianza tangibile di numerosi complessi cimiteriali, come quelli di Cerveteri, Blera e Norchia. La struttura tipologica delle tombe etrusche è ancora oggi oggetto d'indagine.

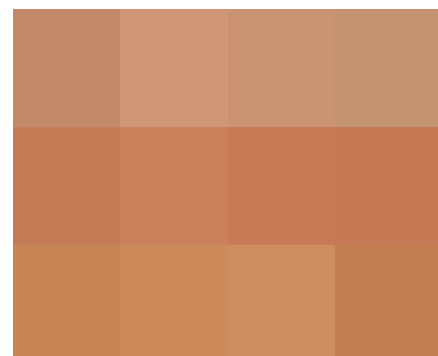
Prevalentemente il culto funerario avveniva all'esterno del *sepulcrum*³² a cui si accedeva attraverso il *dromos*, l'area attigua all'ingresso, quale po-

teva essere la calotta del tumulo o la piattaforma delle *tombe a dado*, l'edificio a blocco destinato ad accogliere i cippi e allo svolgimento del culto, reso accessibile mediante rampe di gradini affiancate alla costruzione.

Le *tombe a camera*, invece, erano tutte o quasi sotterranee, generalmente introdotte da un lungo corridoio (*dromos*) con pendenza variabile. La camera sepolcrale erano a pianta rettangolare e morfologicamente allungate con sezione voltata, quadrata o trapezoidale. La necropoli di Tarquinia (fig.28) e la *tomba François* o dei *Saties* a Vulci (figg.29-30) sono sicuramente uno dei più importanti esempi di monumento funebre etrusco, soprattutto per il sublime apparato decorativo che adorna l'involucro scavato di *siltite*³³, un *quid unicum* della manifestazione straordinaria della pittura etrusca.



29



30

Anche Greci e Romani non si prostrarono nello sfruttamento del sottosuolo sia per la realizzazione di opere infrastrutturali e civili, come acquedotti e criptoportici, sia come luoghi culturali (ninfei) o di carattere funerario. I criptoportici (dal greco κρυπτός "nascosto" e dal latino porticus) sono una invenzione prettamente romana in parte costruiti con opera muraria voltata a botte, in parte seminterrato. La funzione di questi luoghi era di assicurare un passaggio fresco durante l'estate e riparato durante l'inverno, sfruttando il principio fisico dell'inerzia termica per mantenere costante la temperatura interna. In alcuni casi i criptoportici venivano utilizzati come mercato coperto della città, quali il *criptoportico forense* di Aosta (fig.31). L'ambiente ipogeo era illuminato per mezzo di feritoie ricavate nel fianco delle volte, spesso decorate con pitture e mosaici.



31

Oltre alla realizzazione di abitazioni o luoghi di culto sotterranei, esistono numerosi esempi di insediamenti umani ricavati nel sottosuolo attestati fin dall'età neolitica in diversi paesi del Mediterraneo e dell'Estremo Oriente.

In Tunisia ed in Libia, territorialmente formate da steppe e deserto, il bisogno di difendersi e mimetizzarsi in un paesaggio dove una costruzione in elevazione si vede da chilometri di distanza, portò la popolazione (Berberi e Arabi) a scavare insediamenti anziché edificarli.

Altri fattori che influirono sulla scelta di un'architettura sottrattiva furono sicuramente la particolare conformazione del terreno, la scarsità di materie prime come il legno e la necessità di abitazioni isotermitiche in cui le forti escursioni termiche (dagli 0°C invernali ai 50°C estivi) erano la norma. Queste architetture trogloditiche sono classificate in quattro tipologie, individuate dal Despois³⁴:

- *grotte elementari*: si tratta di un semplice scavo utilizzato come dimora temporanea per la semina ed il raccolto;

- *abitazioni scavate orizzontalmente*: ambienti scavati con impianto più complesso, costituito da uno o più ambienti di forma rettangolare e coperture a volta paraboloidiche. Il materiale lapideo estratto veniva utilizzato per la realizzazione di murature di cinta, granai (*ghorfa*)³⁵ e per la *gela'a*, una fortezza rifugio costruita nell'area orograficamente più elevata (figg.32-33).

31. Criptoportico forense di Aosta, © Fondazione Film Commission Vallée d'Aoste.

32. Abitazioni trogloditiche della tipologia a scavo orizzontale dell'insediamento di Ksar Guermezza, Tataouine, Tunisia. Sull'altura si eleva la *gela'a*, una fortezza rifugio.



32



33

- 33. Insedimento troglodita nella zona del Maghreb, in cui sorgono gli *ksour*, abitazioni e granai scavati nelle sommità delle colline rocciose.
- 34. Insedimento troglodita a Matmatah (Tunisia) della tipologia a scavo verticale o "a pozzo" con gran corte centrale, in Opera Ipogea, n.2, Besana E., Mainetti M. (a cura di), Architetture trogloditiche del Mediterraneo. Il Villaggio di Douiret, jbel tunisino-tripolitano, Genova, 2000, pag.14.
- 35. Elaborazione grafica della "camera di manovra o di guardia" come sistema difensivo dell'insediamento troglodita di Aydıntepe.

- *abitazioni scavate verticalmente a gran corte o case a pozzo*: si accede alla corte tramite un passaggio coperto e irregolare (per disorientare gli invasori) scavato nel terreno composto da argilla e sabbia. Le abitazioni erano sempre poste al piano terra, mentre un secondo piano era costituito da grotte-magazzino accessibile tramite una corda o una scala in legno di palma³⁶.

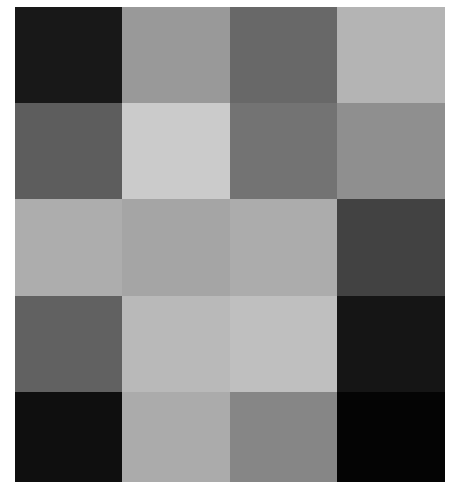
Le popolazioni troglodite prediligevano l'architettura vernacolare an-

che per scopi meramente difensivi, soprattutto nei confronti delle costanti incursioni arabe. Nel rifugio sotterraneo di Aydıntepe, in Turchia sono presenti dei lunghi e stretti corridoi ad andamento irregolare. Le ridotte dimensioni limitavano i movimenti da parte dell'invasore. Di particolare interesse è la "camera di manovra o di guardia" in cui una porta in pietra bloccava il passaggio alla suddetta camera, permettendo ai difensori - protetti dalla massa rocciosa - di attaccare indirettamente gli assalitori mediante una lancia passante attraverso un foro di mira (fig.35).

Gli insediamenti ipogei più maturi sono senza dubbio rappresentati dalle città cappadocie in Turchia e dagli insediamenti rupestri distribuiti nel vasto comprensorio apulo-lucano che si estende fino alla città dei Sassi di Matera. Entrambi i luoghi, ottenuti dal processo di sottrazione della roccia di natura sedimentaria presentano molteplici analogie, così come descritto dal Tommaselli: «*le comunità religiose conferirono alla Murgia e a Matera, sul piano della storia umana e civile, un carattere unico ed originale, paragonabile, sotto molteplici aspetti, al fenomeno molto più ricco ed esteso della Cappadocia, sia per l'uso e l'adattamento della struttura geologica alle esigenze abitative e culturali, sia per gli eventi storici, politici, religiosi di cui le due regioni furono protagoniste, sia per i modelli di architettura e di iconografia rupestri nei quali i monaci si manifestarono maestri*»³⁷.



34



35



36

Straordinarie analogie, infatti, sono deducibili dalla iconografia religiosa in grado di legare gli affreschi della cripta di San Nicola dei Greci a Matera con le due crocifissioni poste nelle chiese rupestri d'Elmalı e Karanlık nella valle di Göreme in Cappadocia; una somiglianza che lascia intuire un'influenza artistica, proveniente dalla lontana regione anatolica, sulle comunità monastiche del Materano (fig.36).

Oltre le analisi comparative dell'apparato artistico, in Cappadocia, così come nell'areale murgico e materano, esistono insediamenti ipogei che risalgono a circa un migliaio di anni, scavati nel tempo grazie ad un suolo roccioso di natura sedimentario che - oltre alla estrema friabilità - si prestava anche come base per pitture murali. Anche in questo caso esistono evidenti analogie degli impianti rupestri. A titolo d'esempio è possibile paragonare la summenzionata chiesa rupestre di San Nicola dei Greci, a due navate, con la chiesa rupestre scavata nella imponente falesia presso il villaggio di Tatlarin in Cappadocia (fig.37).

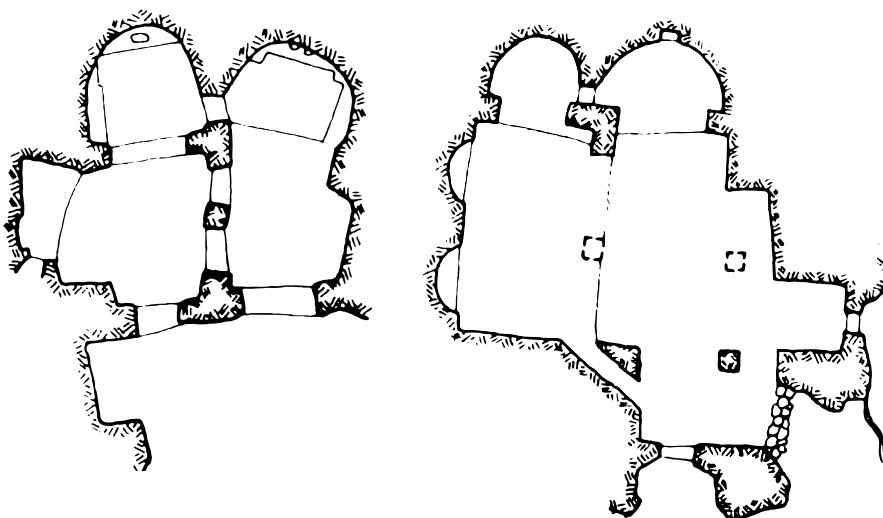
Negli insediamenti rupestri della Cappadocia e dell'areale materano si evidenzia quella straordinaria civiltà che nel corso di almeno un

millennio ha intelligentemente sfruttato le caratteristiche litologiche e morfologiche del proprio territorio producendo un esteso e articolato sistema di strutture sotterranee.

Si aggiunge, quindi, un ulteriore elemento che è possibile definire come «*sistema ipogeo integrato*»³⁸ dove gli insediamenti sotterranei di tipo residenziale o religioso sono completati da annessi della stessa natura, cioè scavati nella roccia, quali sepolture, magazzini, fosse granarie, canali di emunzione, *trappeti* (frantoi), cisterne, ricoveri per animali, *avucchiare* (apiari rupestri), colombaie, neviere, etc.

36. Confronto tra la crocifissione presente nella chiesa rupestre della Karanlık nella valle di Göreme, Cappadocia (a sinistra) e la crocifissione presente nella chiesa rupestre di San Nicola dei Greci a Matera (a destra).

37. Confronto tra l'impianto della chiesa rupestre di San Nicola dei Greci a Matera (a sinistra) e la chiesa rupestre nella falesia presso il villaggio di Tatlarin.



37

- 38. Dettaglio della parete-diaframma della Grotta del Sole a Matera, adibita come *avucchiara* (apiario rupestre).
- 39. Elaborazione grafica della parete-diaframma della Grotta del Sole a Matera, adibita come *avucchiara* (apiario rupestre), in in *Mathera - Rivista trimestrale di storia e cultura del territorio*, anno III, n.8, Antros, Matera, 2019.
- 40. Elaborazione grafica della parete-diaframma in sezione della Grotta del Sole a Matera, adibita come *avucchiara* (apiario rupestre), in op. cit.

Un caso interessante di utilizzo funzionale delle cavità sotterranee è quello denominato *apiario rupestre* (nel materano declinato come *avucchiara*), in cui si assiste per la prima volta nella lavorazione delle pareti scavate a costituire un insieme di alveari per l'inserimento delle *arnie*³⁹. La parete, quindi, da semplice elemento naturale di protezione dall'ambiente esterno, diviene un elemento in grado di rispondere a delle esigenze funzionali, come nel caso della produzione del miele e di altri derivati (cera, propoli, etc.).

A Matera, così come in Cappadocia è possibile rintracciare numerose cavità con la funzione di apiario rupestre, identificate dalla particolare conformazione delle pareti-diaframma forate secondo dei tagli circolari o lineari passanti per tutto lo spessore del banco roccioso. Ad esempio, presso la Grotta del Sole a Matera è presente un tipologia di apiario inedito. In questo caso la parete-diaframma con fori circolari e quadrati non costituiva solo un elemento di decorazione, aerazione e schermatura, ma era funzionale alla destinazione di apiario (fig.38). I fori quadrati dalla profondità di circa 10 cm rappresentavano l'alloggiamento delle arnie e assolvevano alla funzione di "posatoi", ovvero dei predellini per facilitare l'approdo delle api cariche di nettare, in attesa del loro turno di entrata attraverso i piccoli fori della propria arnia; i fori circolari, invece, garantivano sia la ventilazione naturale della "camera di servizio" sia l'ingresso e l'uscita delle api ("fori di volo") (figg.39-40).

Non è da escludere la possibilità che i fori circolari venissero chiusi con paglia mista a terra per le operazioni tecniche di *fumigazione* con il quale le api venivano allontanate dai favi⁴⁰.



38



39



40

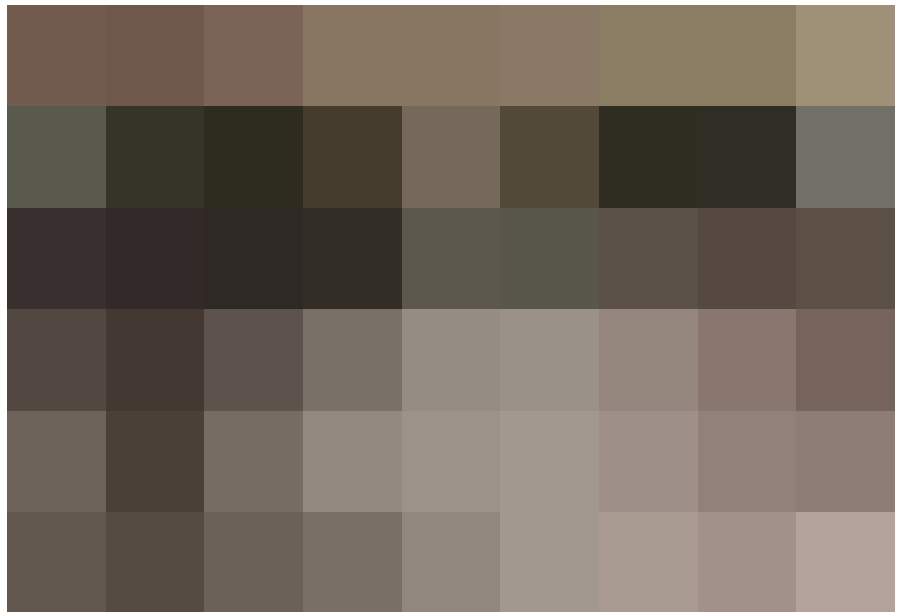
Analogamente al caso materano, in Cappadocia troviamo innumerevoli casi di apiari rupestri identificati dalla particolare conformazione della parete-diaframma, come la facciata esterna dell'alveare rupestre nel vallone di Kizil Çukur caratterizzata da una serie di feritoie verticali e piccoli fori praticati ai lati della porta di accesso (fig.41).

Altre nicchie ricavate nella massiva roccia, non in connessione con l'esterno, rappresentano un altro annesso analogo tra la Cappadocia e l'areale materano-murgico. Sono le *colombaie*, piccole cellette che ospitavano i columbidi per il loro allevamento (figg.42-43).

La proprietà fisica dell'inerzia termica, molto elevata nel suolo, fa sì che gli ambienti sotterranei risentono poco delle fluttuazioni termiche giornaliere e stagionali. Questa proprietà ha permesso in passato di adottare tecniche tradizionali per la conservazione degli alimenti. In passato, infatti, l'esigenza di trovare refrigerio e di godere di cibi e bevande fredde (soprattutto nei mesi estivi) era assicurata utilizzando ciò che la natura forniva: la neve. Essa, oltre all'utilizzo alimentare e di refrigerio, era impiegata come riserva di acqua potabile nei periodi di siccità e nel campo medico per curare febbri e sofferenze fisiche. La conservazione della neve avven-



42



43



41

- 41. Apiario rupestre nel vallone di Kizil Çukur in Cappadocia.
- 42. Complesso rupestre con ambienti destinati a colombaia nella valle di Göreme in Cappadocia.
- 43. Colombaia rupestre relativa al casale di Masseria del Monte a Matera, in *Mathera* - Rivista trimestrale di storia e cultura del territorio, anno III, n.10, Antros, Matera, 2019.

44. Neviera-tipo a Matera nella stagione estiva (in alto) e nella stagione invernale (in basso), in Gallo D., Fontana A., Foschino F., Paolicelli R., *Le neviere di Matera*, in *Mathera - Rivista trimestrale di storia e cultura del territorio*, anno III, n.9, Antros, Matera, 2019.

niva in appositi ambienti chiamati *neviere* (o «*niviera*», evoluzione semantica più vicina all'étymos latina), luoghi costruiti o ipogei, esposti a nord ed essenzialmente scavati per sfruttare al meglio la capacità termica della roccia. Sempre nel materano è emerso che la neviera tipo presenta i seguenti caratteri: ottenute scavando la roccia calcarenitica, esse hanno la forma di un parallelogramma con il piano di calpestio planare o con lieve pendenza per il deflusso e lo scolo delle acque di scioglimento e la parte sommitale voltata "a botte" o "a schiena d'asino". Esse, inoltre, presentano una o due aperture laterali (murate durante i pe-

riodi di inutilizzo delle neviere) funzionali al prelievo della neve in risposta alle esigenze, mentre una bocca posta in sommità serviva per l'immissione della neve raccolta in superficie. In corrispondenza delle aperture laterali, era consuetudine ricavare nella roccia una 'canaletta' per favorire il ruscellamento dell'acqua alimentata da una cisterna (solitamente annessa), utile alla stagionale pulizia della neviera. Il parallelismo con le antiche cisterne ipogee è pressoché identico; la differenza è nel trattamento della superficie: mentre le cisterne sono impermeabilizzate con una malta del tipo cocciopesto per impedire l'acqua di disperdersi, le neviere sono lasciate con la roccia viva a vista. L'espedito evitava, quindi, l'eventuale ristagno di acqua sul fondo che ne avrebbe catalizzato il processo di fusione della neve. A tal proposito, inoltre, il fondo veniva ricoperto con uno strato isolante di paglia, foglie secche e *sarmen-te* (o *sarmenti*), tralci secchi di vite evitando così il contatto del ghiaccio con l'acquitrino sottostante. La neve raccolta in superficie veniva trasportata con i traini o sui *vaiardi* (portantine in legno a quattro assi) oppure, laddove l'orografia del terreno lo permetteva, si formavano grandi palle di neve e si lasciavano 'rotolare' sino al punto di immissione della neviera. Una volta all'interno della neviera, la neve veniva compressa e costipata mediante battitura in strati successivi, intervallati ogni circa 25 cm da strati di paglia (spessore variabile dai 5 ai 10 cm). Tale separazione, oltre ad assicurare la conservazione della capacità termica e dell'isolamento della neve, era necessaria per favorire la successiva divisione dei blocchi in fase di distribuzione. Tale operazione era demandata agli *insaccaneve* che calzavano sopra le scarpe e pantaloni dei sacchi di canapa legati all'altezza delle cosce per evitare di sporcare il prodotto durante il lavoro. Questi erano muniti di appositi attrezzi di legno detti *paravisi* aventi una forma rettangolare, con uno spessore di cir-



ca 40 cm, una larghezza di 30 cm, ed una lunghezza di 50 cm, molto pesanti e dotati di un manico alto circa un metro infisso al centro. Raggiunta la capacità massima di riempimento della nevieria (circa 250-300 metri cubi), lo strato finale di paglia era di spessore maggiore; si procedeva, quindi alla chiusura degli ingressi laterali in attesa del periodo commerciale di vendita della neve. Con l'arrivo della stagione estiva, il ghiaccio veniva estratto dalla nevieria in blocchi con accette e seghe e successivamente, avvolti in paglia di qualità e estrema finezza (o eventualmente sacchi di canapa), venivano caricati sui traini e avviati al consumo⁴¹ (figg.44-45).

Un altro interessante luogo di produzione in spazi vernacolari nel materano è quello delle cantine dedicato alla trasformazione e alla conservazione del vino. La particolare conformazione della città dei Sassi, con le verticali sponde rocciose del Sasso Barisano e del Sasso Caveoso ha permesso la realizzazione di scavi orizzontali per la creazione di ambienti adatti al processo di trasformazione del vino. L'esposizione a Nord era una caratteristica ubiqua e fondamentale in quanto la conservazione del vino, in apposite botti in legno, necessitava di una condizione di isotermità, cioè di temperatura costante. L'accesso alla cantina-tipo del ma-

45. Quadro sinottico dei caratteri tipologici, costruttivi e funzionali della nevieria-tipo a Matera, in Gallo D., Fontana A., Foschino F., Paolicelli R., *Le neviere di Matera*, in *Mathera - Rivista trimestrale di storia e cultura del territorio*, anno III, n.9, Antros, Matera, 2019.



46. Quadro sinottico dei caratteri tipologici, costruttivi e funzionali della cantina-tipo a Matera, in Gallo D., Foschino F., *Appendice all'articolo: Alla conquista del freddo, guidata dalla luce: l'architettura delle cantine di Matera*, in Mathera - *Rivista trimestrale di storia e cultura del territorio*, anno IV, n.13, Antros, Matera, 2020.

terano avveniva attraverso l'unico varco praticato nella parete rocciosa, opportunamente chiusa con un portone a 'grata' per facilitare la ventilazione naturale degli ambienti interni e l'esalazione esterna dell'anidride carbonica prodotta dal processo di fermentazione. Superato il varco di accesso, una serie di gradini immettevano al primo vano diversamente denominato (*nave, stanza dei palmenti, tinaia, cantina di fermentazione, cellaio, celliere*), posizionato ad una quota inferiore rispetto al piano stradale esterno per raggiungere una profondità maggiore nei sotterri e per aumentare l'altezza interna atta a favorire l'utilizzo dei palmenti e del torchio. Il palmento materano è usualmente in opera muraria e a forma quadrangolare, delimitato da tre lati dalle pareti perimetrali into-

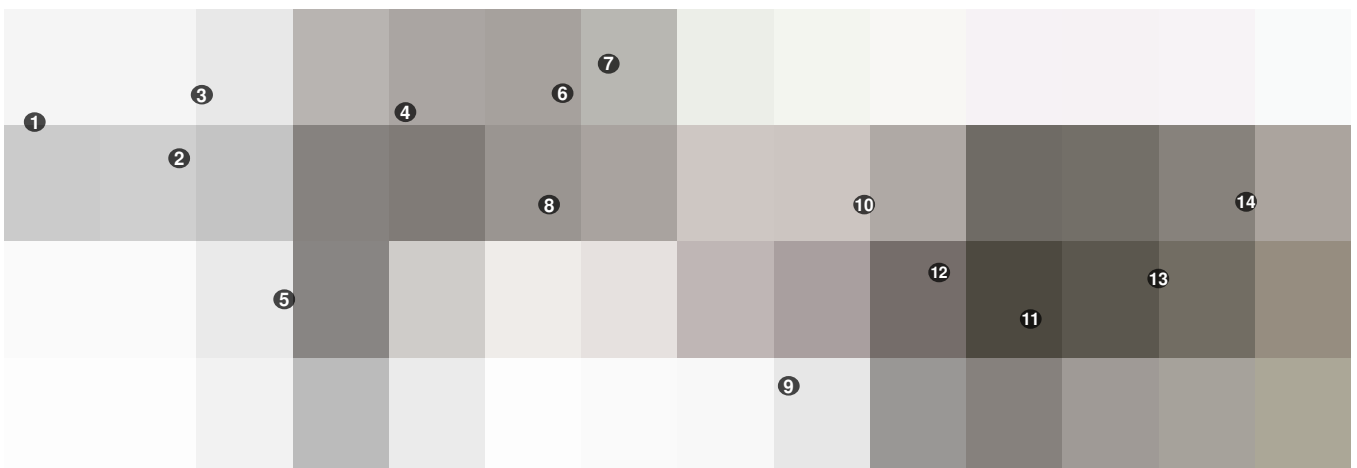
nacate in cocciopesto. Sul fronte è presente la *bocca*, un concio di calcarenite forato utilizzato come gocciolatoio del succo d'uva ricavato dalla processo di pigiatura. Una scala intermedia (chiamata "*tromba*") ricavata nella roccia collega il primo ambiente destinato alla trasformazione ai livelli inferiori, chiamati "*sotterri*" o "*sterni*". Tali ambienti sono destinati alla fermentazione e conservazione del vino in apposite botti allocate su travi in legno poggiate su delle banchine in opera muraria, conservate in una condizione microclimatica isotermicamente costante. Lungo le pareti della scala una piccola nicchia assolveva il duplice scopo di illuminare l'ambiente e di segnalare per indicare, spegnendosi, la saturazione dell'ambiente di anidride carbonica, letale per l'uomo (fig.46).

- **Ambiente esterno - Ingresso**

- Esposizione verso Nord per raggiungere una situazione di isotermità;
- Atrio esterno per operazioni logistiche e di torchiatura;
- Alto portone di ingresso con grata realizzata con assi di legno per agevolare l'aerazione e scongiurare il pericolo di asfissia da anidride carbonica prodotta durante la fermentazione;

- **Scale di collegamento - «Tromba»**

- «Tromba», ossia la rampa di scale che collega la «nave» al «sotterro», dotata di nicchia per l'alloggiamento di una candela per fornire una fioca illuminazione, specie per le operazioni notturne e fungere da spia per l'eventuale presenza di anidride carbonica;
- Una cisterna, usualmente senza canalette di adduzione, si apre sulla parete sinistra, poco prima dell'ambiente del «sotterro».



- **Legenda**

- 1. Traino;
- 2. «Frizzola»;
- 3. Torchio esterno;
- 4. Portone d'ingresso;
- 5. Prima cisterna;
- 6. Palmento;
- 7. Torchio interno;
- 8. Tino;
- 9. Seconda cisterna;
- 10. Candela;
- 11. Banchina laterale;
- 12. Travi lignee;
- 13. Botti in legno;
- 14. Nicchia di fondo

- **Primo ambiente: «Nave» - Cantina di Fermentazione**

- «Nave» che accoglie la Cantina di Fermentazione;
- Temperatura minima/massima annuale: 7-24°C;
- Ambiente più basso rispetto alla quota di calpestio esterno, per agevolare la diffusione di luce nel sotterro;
- Palmenti: luogo della pigiatura dell'uva con i piedi e della successiva «fermentazione tumultuosa»;
- I palmenti sono intonacati in cocciopesto, e spesso dotati di finestrella-sfiatatoio per agevolare l'uscita di anidride carbonica derivante dalla fermentazione;
- I palmenti sono collocati a circa 1,3 m da terra in modo da favorire il posizionamento di un ampio tino utile alle operazioni di travaso verso le botti.

- **Secondo ambiente: «Sotterro» - Cantina di Conservazione**

- «Sotterro» che accoglie la Cantina di Conservazione;
- Temperatura minima/massima annuale: 12-15°C;
- Si raggiunge la condizione di isotermità, temperatura costante tutto l'anno;
- Nel sotterro, il vino viene depositato per le ultime fasi della fermentazione o per l'invecchiamento;
- Due banchine laterali presentano due travi disposte tra loro parallelamente e sulle quali venivano collocati le botti, a circa 60 cm dalla quota di calpestio per agevolare le operazioni di travaso;
- Non vi giunge mai il Sole, l'ubicazione delle banchine laterali e della nicchia di fondo sono determinate dalla proiezione prospettica della luce d'ingresso.

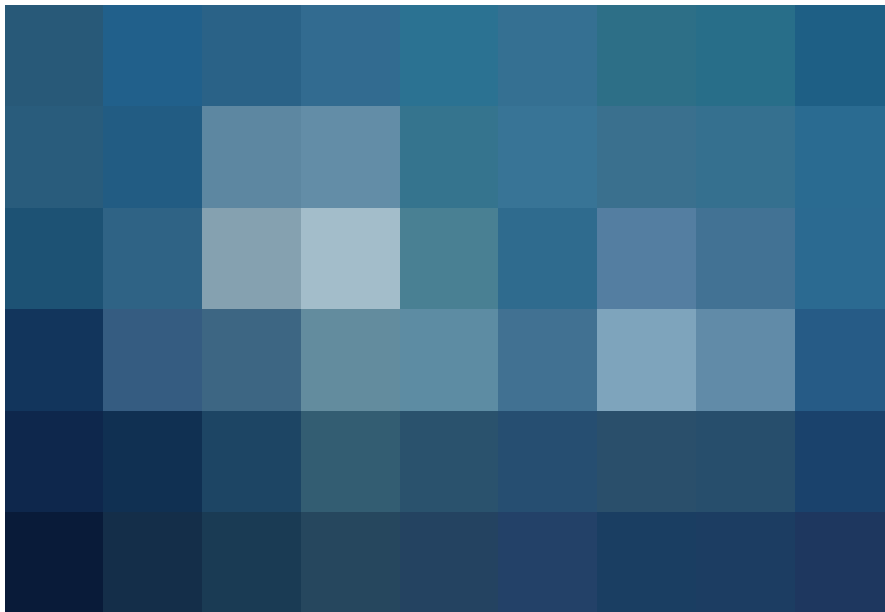
Costruzione a tenda

Oggi è possibile notare come recenti innovazioni architettoniche siano state impiegate per millenni dalle popolazioni nomadi che identificavano nella tenda la loro architettura dell'abitare le cui caratteristiche principali sono la trasportabilità, leggerezza e flessibilità. Tali caratteristiche sono oggi alla base di una nuova architettura della leggerezza che ci collega ad un passato dimenticato per un modo più sedentario di abitare. L'involucro a guscio triangolare collegato alla struttura regolare su cui si basano le tensostrutture è analogicamente una evoluzione dello *yaranga* siberiano e dello *yurt*.

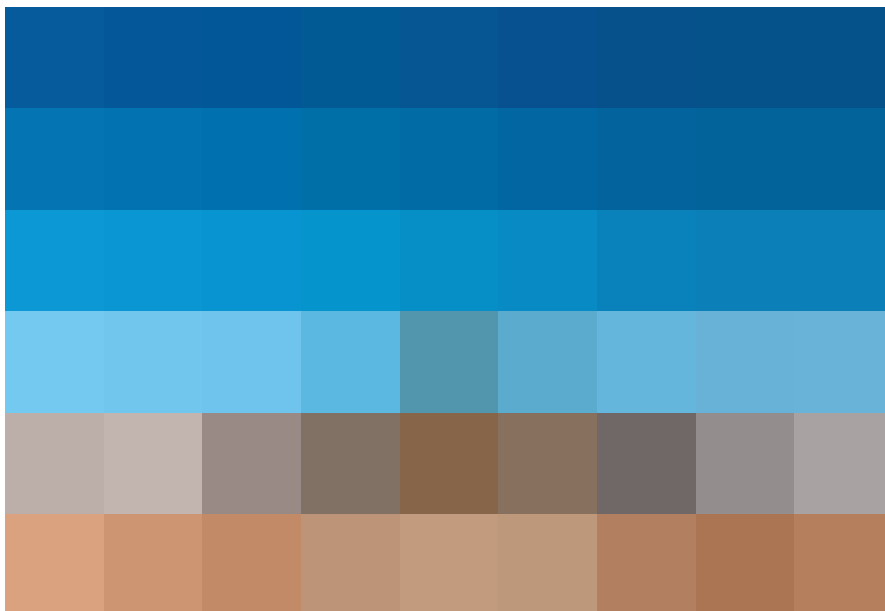
Infatti, le tensostrutture estensibili dell'architetto Frei Otto (Chemnitz, 1925 – Leonberg, 2015) trovano una estrema conformità con le *tende nere*⁴² del Medio Oriente (figg.47-48).

La tenda è la sua semplice architettura affondano le radici nella notte dei tempi, annoverata in antiche scritture veterotestamentarie e nella genesi umana. Il fenomeno di nomadismo si è sviluppato in quei luoghi - tundra artica, taiga, steppa e deserto - in cui la mancanza di acqua ha impossibilitato l'uomo di praticare l'agricoltura. Le prime forme di nomadismo ebbero origine in Asia medio-orientale con l'addomesticamento della pecora e della capra e con gli spostamenti assicurati dall'asino, dal dromedario, dal cammello bactriano e dal cavallo.

La gerarchia sociale nomade vede nella donna l'architetto a cui è demandato il compito di tessere, lavorare il cuoio e lavorare la corteccia per allestire la tenda. Il processo di tessitura della lana di capra avviene attraverso la filatura con un semplice fuso a goccia, composto da un sottile bastone e da un disco che viene fatto ruotare. Questo rappresenta il più antico metodo di filatura e costruzione. La tenda, quindi viene montata applicando essenzialmente tensioni tramite tiranti e poggiandola su pochissimi elementi lignei⁴³.



47



48

Questo espediente strutturale e pressoché involontario praticato dalle popolazioni nomadi ha rappresentato - a partire dal secondo dopoguerra - il filone di ricerca del *form-finding*. Sviluppatosi a partire dagli anni Cinquanta del Novecento, il *form-finding* si contrappone alla scienza delle costruzioni (il cui compito è sempre stato la verifica di un elemento o sistema strutturale morfologicamente definito) per incentivare un nuovo approccio al problema strutturale secondo modelli fisici complessi, in modo particolare di strutture a membrana o a guscio costituite da elementi soggetti a diversi gradi e tipologie di sollecitazione. Uno dei primi esempi, nonché il più

47. Frei Otto, Expo 1967 di Montreal, © Atelier Frei Otto Warmbronn

48. Tenda nera dei nomadi nel Medio Oriente.

celebre è forse quello dell'architetto spagnolo Antoni Gaudì (Reus, 1852 – Barcellona, 1926), ovvero del progetto per la Chiesa della Colonia Güell a Santa Coloma de Cervelló, nei pressi di Barcellona, commissionato da Eusebio Güell nel 1898 (fig.49).

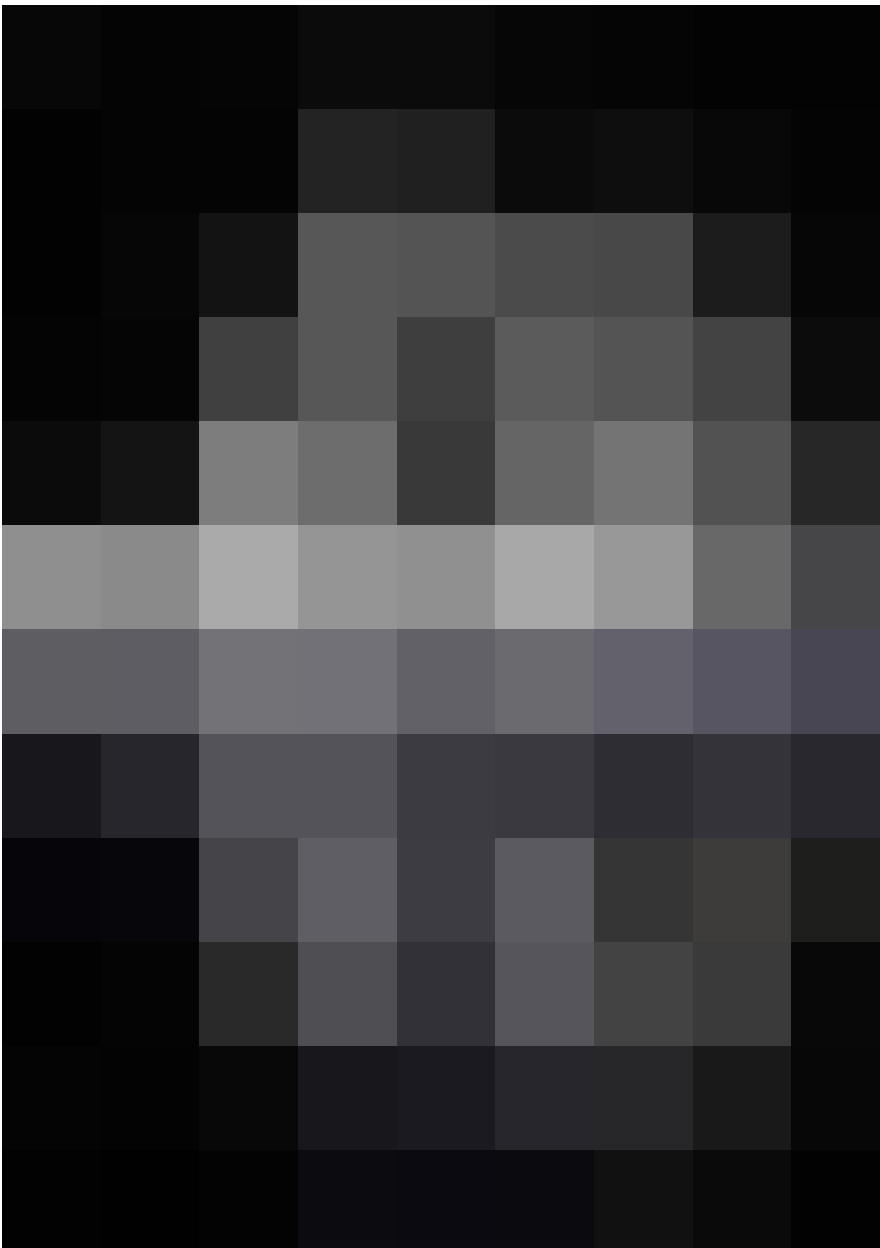
Il progetto sperimentale che durò circa dieci anni, prevedeva lo studio di un *modelo colgante*⁴⁴, ovvero un modello sospeso di fili e piccole zavorre che perseguivano il principio già noto della catenaria invertita, già sperimentata alla fine del Seicento da Christopher Wren per la definizione strutturale della cupola della St. Paul's Cathedral di Londra, con il supporto del poliedrico Robert Ho-

oke che nella frase anagrammata «*Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum*»⁴⁵ nascose il segreto del principio costruttivo della cupola londinese. Secondo le conoscenze dell'epoca, già mature nel settore della statica, il modello di Gaudì rappresenta il primo prototipo di edificio sospeso che però non riuscì a sviluppare per le capacità limitate dell'ingegneria dell'epoca. Solo successivamente i suoi studi divennero la base di partenza delle grandiose tensostrutture in cavi e membrane polimeriche di Frei Otto che riconobbe la paternità gaudiana nel processo statico di scarico delle forze di compressione attraverso la trasmissione orizzontale ottenuta mediante l'aggiunta di pesi su delle strutture elastiche. Così facendo ribaltando di 180 gradi la catenaria, si ottiene un sistema strutturale soggetta a soli sforzi di trazione.

Esperimenti simili vennero condotti anche prima della celebre opera di Gaudì in modo particolare nel Settecento, al fiorire dell'età della ragione, della razionalità e della matematica. È il secolo della trattatistica scientifica, come il famoso *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir* (Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare) di Jean-Baptiste Rondelet (Lione, 1743 – Parigi, 1829) in cui elaborò numerose teorie sul comportamento statico delle murature e delle volte sferiche, sperimentò sistemi di rinforzo strutturale mediante l'impiego di leghe metalliche e realizzò numerose macchine per la misurazione della resistenza dei materiali lapidei e delle pietre artificiali in conglomerato cementizio.

In parallelo si svilupparono anche testi trattatistici sull'impiego di geometrie tensive, conosciuti come modelli funicolari studiati e approfonditi dall'architetto tedesco Heinrich Hübsch (1795 - 1863) e successivamente applicati non solo dal punto di vista sperimentale - come nel caso di Antoni Gaudì - ma realmente adottati per la costruzione o il recupero di edifici staticamente compromessi.

49. Sperimentazione del modelo colgante di Antoni Gaudì per la realizzazione della Chiesa della Colonia Güell a Santa Coloma de Cervelló, nei pressi di Barcellona, University of Stuttgart, University of Innsbruck.



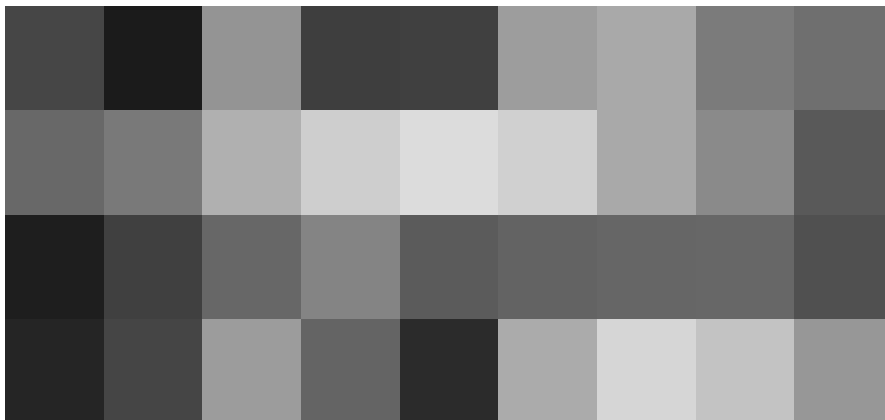
Un esempio interessante è l'ardito progetto di recupero strutturale della cupola di San Pietro in Vaticano promosso dal matematico e ingegnere Giovanni Poleni (Venezia, 1683 – Padova, 1761). Lo studio del Poleni fu commissionato da papa Benedetto XIV per porre rimedio ad un esteso quadro fessurativo della calotta interna dovuto a forze di schiacciamento sviluppatesi a seguito dell'intervento di completamento della stessa realizzato dall'architetto comacino Giacomo della Porta (Porlezza, 1532 – Roma, 602) che successe a Michelangelo dopo la sua morte. L'intervento di consolidamento progettato dal Poleni contemplò la fasciatura della cupola con anelli di confinamento trasversale in ferro secondo uno schema funicolare dei carichi (fig.50).

Il form-finding si sviluppa anche agli albori del Novecento con l'introduzione di nuovi materiali - di natura cementizia, metallica e soprattutto polimerica - forieri della ormai consolidata attività industriale. Oltre alle ben note attività sperimentali di Frei Otto, al fine di governare membrane sottili, strutture pneumatiche e tensostrutture⁴⁶, di grande interesse sono gli esperimenti condotti tramite prototipi in scala ridotta da Heinz Isler (1926-2009) nel campo

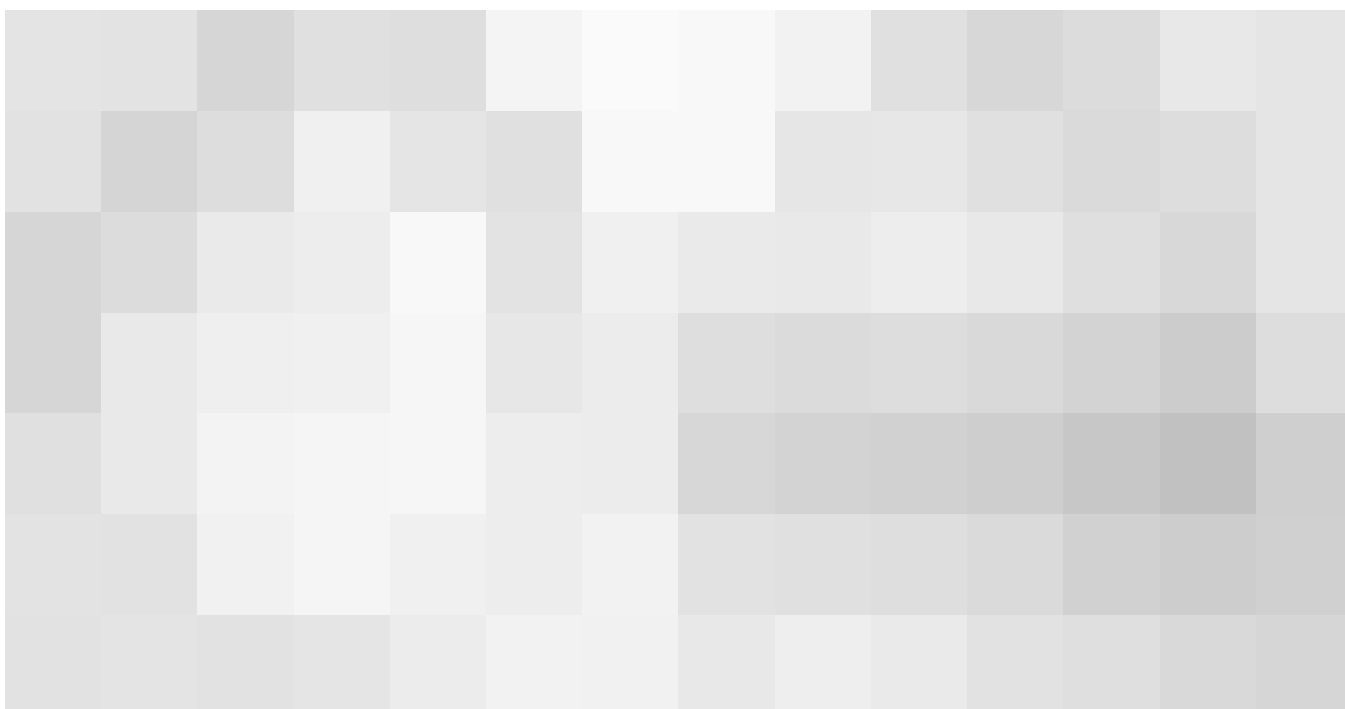
delle volte sottili in cemento armato⁴⁷ con l'obiettivo di creare una genealogia di *idea shells*. «A partire dagli anni Cinquanta, Isler sondò numerose tecniche sperimentali: il primo metodo, definito "preistorico", consisteva nel dare forma a una piccola collina artificiale lasciando che la terra si disponesse liberamente secondo il proprio peso, fino a ottenere un profilo ottimale. Un secondo sistema prevedeva esperimenti fatti con membrane messe in tensione da un congegno pneumatico: fissando a un piccolo telaio a pianta rettangolare una membrana di gomma e insufflando aria dal basso, essa infatti diviene soggetta soltanto a sforzi di tensione (fig.51). Una volta sottile della stessa forma sarà quindi soggetta solo a sforzi di compressione, relativi al peso proprio

50. Intervento di consolidamento della cupola di San Pietro in Vaticano progettato dal matematico Giovanni Poleni.

51. Modello pneumatico di Heinz Isler per la determinazione di forme strutturali, © Archivio, ETH Zurigo, fondo Heinz Isler.



51



50



nica raccontando dell'esperimento da lui fatto nel gelido febbraio del 1957, quando appese in giardino un telo sottile a un incrocio di pali, lo spruzzò con acqua e ne attese l'indurimento causato dalla temperatura invernale. Una volta "congelata", la forma ottenuta fu ribaltata: "Thus I got a very elegant and light shell structure, resting on four points and being in equilibrium. It had obtained its perfect and natural shape by its own weight. In its final position the dome part had only compressional forces, as the cloth itself, when hanging, evidently had only tensional forces"⁵¹ (fig.52).

Anche l'Italia si distinse in questo filone sperimentale attraverso la figura dell'ingegnere e accademico Sergio Musmeci (Roma, 1926 – Roma, 1981) autore della celebre opera del ponte sul Basento a Potenza (1967-1975). Per ricavare una forma strutturale sottilissima (30 cm) della membrana in calcestruzzo armato, Musmeci condusse innanzitutto esperimenti su una «soluzione saponata fatta formare tra fili di cotone e filo di ferro»⁵² (fig.53) in cui immaginò la superficie sottoposta a compressione uniforme ma non isotropa; successivamente realizzò un modello in neoprene e poi in *perspex*, molto più stabili del modello precedente, che gli permisero di applicare tensioni differenziate in due direzioni perpendicolari su una griglia quadrata della superficie (fig.54). Attraverso il metodo grafico e il calcolo scientifico, Musmeci dispose di una vera e propria superficie di progetto, dalla quale procedere con calcoli e verifiche più specifiche.

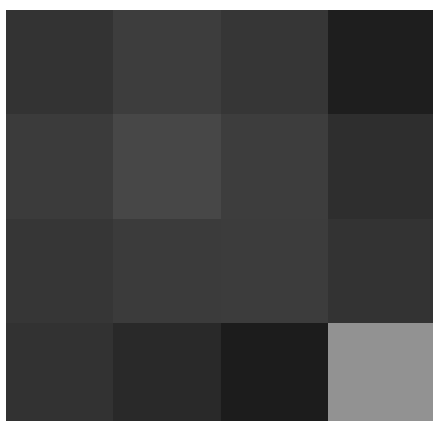
52

52. Esperimento di Heinz Isler con membrane appese e congelate, © Archivio, ETH Zurigo, fondo Heinz Isler.

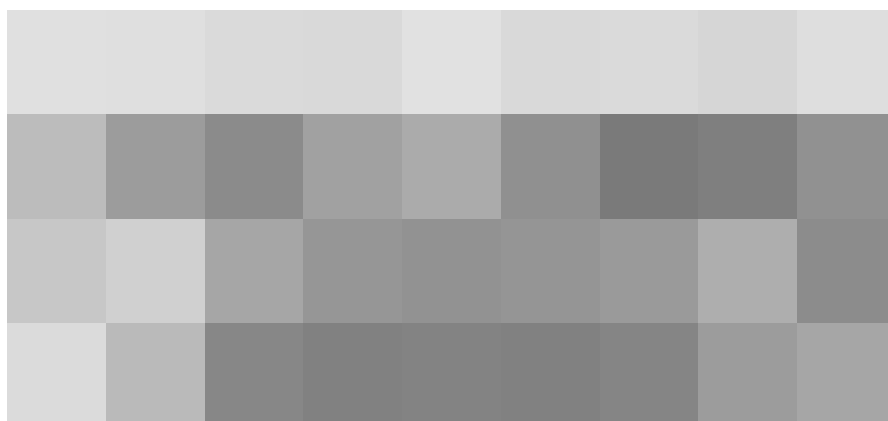
53. Sergio Musmeci, modello di soluzione saponata e fili di cotone per una prima determinazione della forma del Ponte sul Basento, in "L'industria italiana del Cemento, n.2, febbraio 1977.

54. Sergio Musmeci, modello in neoprene del Ponte sul Basento, messo in tensione con uno speciale dispositivo di prova, in L'industria italiana del Cemento, n.2, febbraio 1977.

e all'eventuale carico della neve⁴⁸. Le coordinate della forma ottenuta grazie alla pressione dell'aria venivano quindi misurate, e lo schema era pronto per essere rifinito in base agli altri dati del problema statico e funzionale⁴⁹. Una terza tecnica si affidava al cosiddetto *flow method*, che consisteva nell'ottenere forme strutturali dall'espansione e dall'indurimento di una schiuma poliuretana costretta in un contenitore cavo. Poiché la velocità di espansione della schiuma è variabile da un minimo in corrispondenza dei bordi a un massimo nel centro del contenitore, ciò che si ottiene è una cupola»⁵⁰. Un'altra sperimentazione dell'ingegnere svizzero è quella definita *hanging reversed membrane*. «Isler era solito spiegare questa tec-



53



54

La ricerca ostinata della forma strutturale di Musmeci e prima ancora del suo maestro Pier Luigi Nervi sarà spiegata negli anni Settanta, quando scriveva: «Il fatto che il calcolo sia in genere impiegato solo nella fase di verifica, fa sì che esso possa essere di aiuto solo quando le decisioni veramente importanti sono ormai prese. Quando le prende, il progettista è in realtà solo con la sua esperienza individuale, fondata su fatti non quantizzabili e che difficilmente possono essere posti fra loro in un rapporto dialettico.

Ed è così che può succedere che tutte le nostre raffinate e approfondite conoscenze di scienza delle costruzioni non ci siano di alcuna utilità, se non indiretta, quando si tratta di dare una forma alle nostre strutture. La materia viene formata con un atto che è, in ultima analisi, una versione superficiale di quello con cui agisce uno scultore, senza avere di questo né il programma né l'intenzione; che si usi o no la creta, l'atto mentale è sempre, più o meno, quello che corrisponde a dare forma a della creta. In tal modo i fatti più propriamente strutturali restano fuori dalle nostre possibilità, prima ancora che di controllo razionale, di immaginazione e di scelta inventiva»⁵³.

Dal processo descrittivo di Musmeci è possibile cogliere non solo una evoluzione ingegneristica della costruzione a tenda, ma la separazione del modello strutturale (incentivato dalla scienza e dallo spirito dell'ingegnere Arturo Danusso) e il calcolo elettronico mediante gli strumenti informatici, oggi base fondante della modellazione parametrica e dei metodi di analisi come il *Finite Element Method* (FEM) che sostituiscono le pratiche sperimentali fisiche come quelle di Frei Otto, Heinz Isler e dello stesso Musmeci.

Se dal punto di vista ingegneristico-strutturale, la costruzione a tenda ha rappresentato il punto di partenza per lo sviluppo di tensostrutture, membrane e costruzioni a guscio, dal punto di vista epistemologico, la costruzione a tenda può considerarsi

il primo esempio di rivestimento e di separazione tra involucro e struttura.

«In principio fu il rivestimento», scriveva Adolf Loos nel 1898. «Anche se per l'artista tutti i materiali sono ugualmente preziosi, non tutti sono ugualmente adatti ai suoi obiettivi. Le necessità statiche e costruttive di un edificio richiedono spesso l'uso di materiali che non si accordano con la sua finalità. L'architetto, mettiamo, ha il compito di creare uno spazio caldo, accogliente. Caldi e accoglienti sono i tappeti. Egli decide di conseguenza di stendere un tappeto sul pavimento e di appenderne quattro alle pareti. Ma non si può costruire una casa con i tappeti. I tappeti, che li si tengano stesi sul pavimento o appesi alle pareti, richiedono una struttura che li mantenga nella giusta posizione. Inventare questa struttura è il secondo compito dell'architetto. Questa è la via giusta, logica, che si deve seguire in architettura. Ed è così, secondo questa successione che l'uomo ha imparato a costruire. In principio fu il rivestimento. L'uomo cercava rifugio dalle intemperie, protezione e calore durante il sonno. Cercava di coprirsi. Il tetto è il più

“L'architetto, mettiamo, ha il compito di creare uno spazio caldo, accogliente. Caldi e accoglienti sono i tappeti. [...] I tappeti, che li si tengano stesi sul pavimento o appesi alle pareti, richiedono una struttura che li mantenga nella giusta posizione. Inventare questa struttura è il secondo compito dell'architetto. [...] Ed è così, secondo questa successione che l'uomo ha imparato a costruire. In principio fu il rivestimento.”

- Adolf Loos

antico elemento architettonico. Dapprima esso era costituito da pelli o da prodotti dell'arte tessile. Questo significato della parola è ancora oggi riconoscibile nelle lingue germaniche. Il tetto doveva essere sistemato in modo tale da fornire riparo sufficiente all'intera famiglia! Furono perciò aggiunte le pareti che offrivano nel contempo riparo sui lati. È in questo modo che si è sviluppato il pensiero architettonico tanto nell'umanità che nel singolo»⁵⁴.

A partire dalle parole di Loos è chiaro come egli enunciava il principio del rivestimento, inteso come elemento più antico della costruzione.

Tradizionalmente gli aspetti rappresentativi di un edificio coincidevano con il disegno del rivestimento della facciata, ma con l'avvento della facciata libera, effetto di quella rivoluzione dell'acciaio e del calcestruzzo armato, le pareti perdono quel ruolo diventando a-tettoniche per limitarsi con un processo di ipertrofia alla mera comunicazione dell'immagine esteriore e della società che lo rappresenta.

La teoria del rivestimento porta Semper a confrontarsi con un quesito fondamentale dell'estetica riproposto -

come già detto a inizio del presente capitolo - da Karl Gottlieb Wilhelm Bötticher e precisamente del rapporto tra forma strutturale (*Struktur*) e nucleare (*Kernform*) e la forma artistica o decorativa (*Kunstform*). Mentre per Semper è fondamentale la convergenza organica tra i principi strutturali e gli aspetti decorativi, per Bötticher esiste una frattura tra i due aspetti. Semper, infatti, per avvalorare la sua tesi illustra tre diverse modalità di coesione tra struttura e decorazione:

- *arte asiatico-assira*: questo contesto è caratterizzato dalla tendenza di caricare la forma artistica tramite la funzione strutturale. «Il rivestimento metallico adoperato inizialmente come decorazione, ad esempio di un utensile o di un divisorio spaziale, da semplice forma artistica, da manto ornamentale passa gradualmente ad assumere la funzione strutturale del nucleo. Il nucleo ligneo trasferisce le proprie funzioni all'involucro che lo avvolge e scompare. Quest'ultimo congiunge in sé ambedue, la componente strutturale e quella formale»⁵⁵;

- *arte egizia*: nell'arte faraonica si ha la tendenza di occultare attraverso la decorazione la forma nucleare. La decorazione superficiale assume un linguaggio simbolico e come supporto alle iscrizioni geroglifiche (fig.55);

- *arte greca*: così come l'arte micenea si tende a smaterializzare la funzione del nucleo. Nell'architettura greca, infatti, non vi è alcuna separazione tra forma strutturale e artistica, «ma una loro unità organica, un profondissima fusione»⁵⁶. Attraverso la decorazione e la policromia, l'architettura greca assunse «una specie di vita plastica, il cui scopo era di raccontare la propria storia attraverso un linguaggio particolare, [...] quello simbolico»⁵⁷. Egli considera la pittura e la scultura non come rappresentazione della natura, ma come trasposizione dell'arte del tessere. In questo

55. Nell'arte egizia è riscontrabile la tendenza ad occultare attraverso la forma artistica la funzione della forma nucleare. Rivestimento con geroglifici del tempio di Hathor, Complesso del tempio di Dendera, © Jon Berghoff, Dendera, 2018.



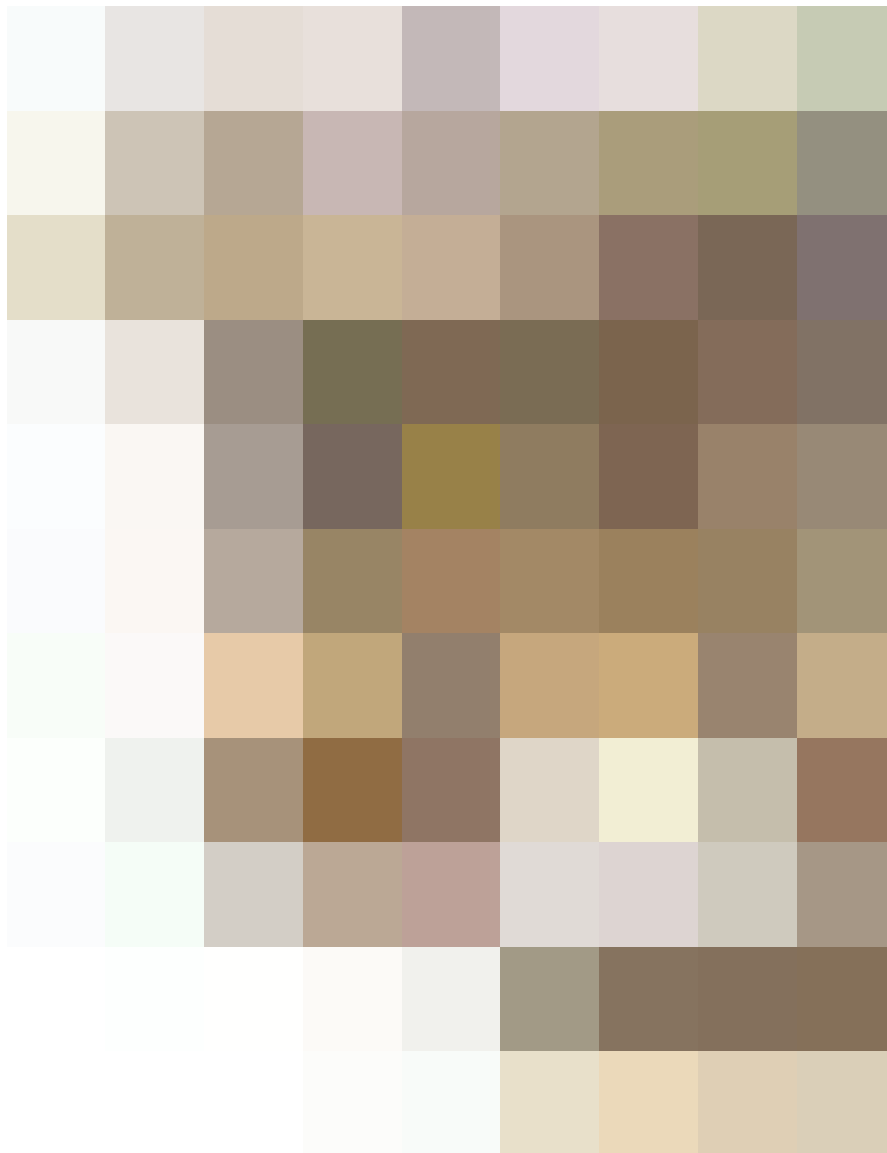
modo, dipingere le colonne di un tempio dorico di rosso, oppure scolpire l'acroterio da inserire sulla cimasa del tempio, significa effettuare una trasposizione simbolica e analogica dell'arazzo e del tappeto che perimetrava la primitiva abitazione dell'uomo nei nuovi materiali (fig.56).

Sempre in un manoscritto di Semper, egli accenna all'«*importante influsso avuto dal tappeto nella sua funzione di parete [...] e sullo sviluppo di alcune forme architettoniche finanche sulla formazione di arti figurative*»⁵⁸ citando esplicitamente un completo capovolgimento dei primitivi rapporti tra arte e industria.

Nell'interpretazione strumentale che Semper porta in atto, in primo luogo la parete viene intesa come elemento di chiusura, di delimitazione spaziale e di protezione dagli agenti atmosferici e non come apparato strutturale; come l'abito, oltre alla funzione di protezione, ha anche quella di decorazione, così come la parete della cella del tempio greco. Come il vestito è costituito da fili tessuti, così la parete ha nell'intreccio di rami o canne prima, e tappeti poi, la sua origine.

Le tesi di Semper furono messe in discussione dagli studiosi, primo dei quali Alois Riegl (Linz, 1858 – Vienna, 1905) che con la sua *Kunstwollen*⁵⁹, condanna le tesi di Semper come emblematiche di un ingenuo materialismo tecnicistico. Per lui i materiali hanno una predominante importanza, ma devono essere al servizio dell'idea, definita come «*la qualità del contenuto e del fine*»⁶⁰.

È lo stesso Semper che nei *Prolegomena* in *Der Stil* stigmatizza gli equivoci teorici dei materialisti e dello stesso Alois Riegl, con una diretta affermazione: «*Il punto debole di questa teoria è di aver stabilito un legame troppo stretto tra il mondo creativo e il materiale adoperato. [...] Un esempio su tutti: le pareti delle celle dei tempi greci in struttura portante di pietra da taglio mediatamente sbozzata, venivano intera-*

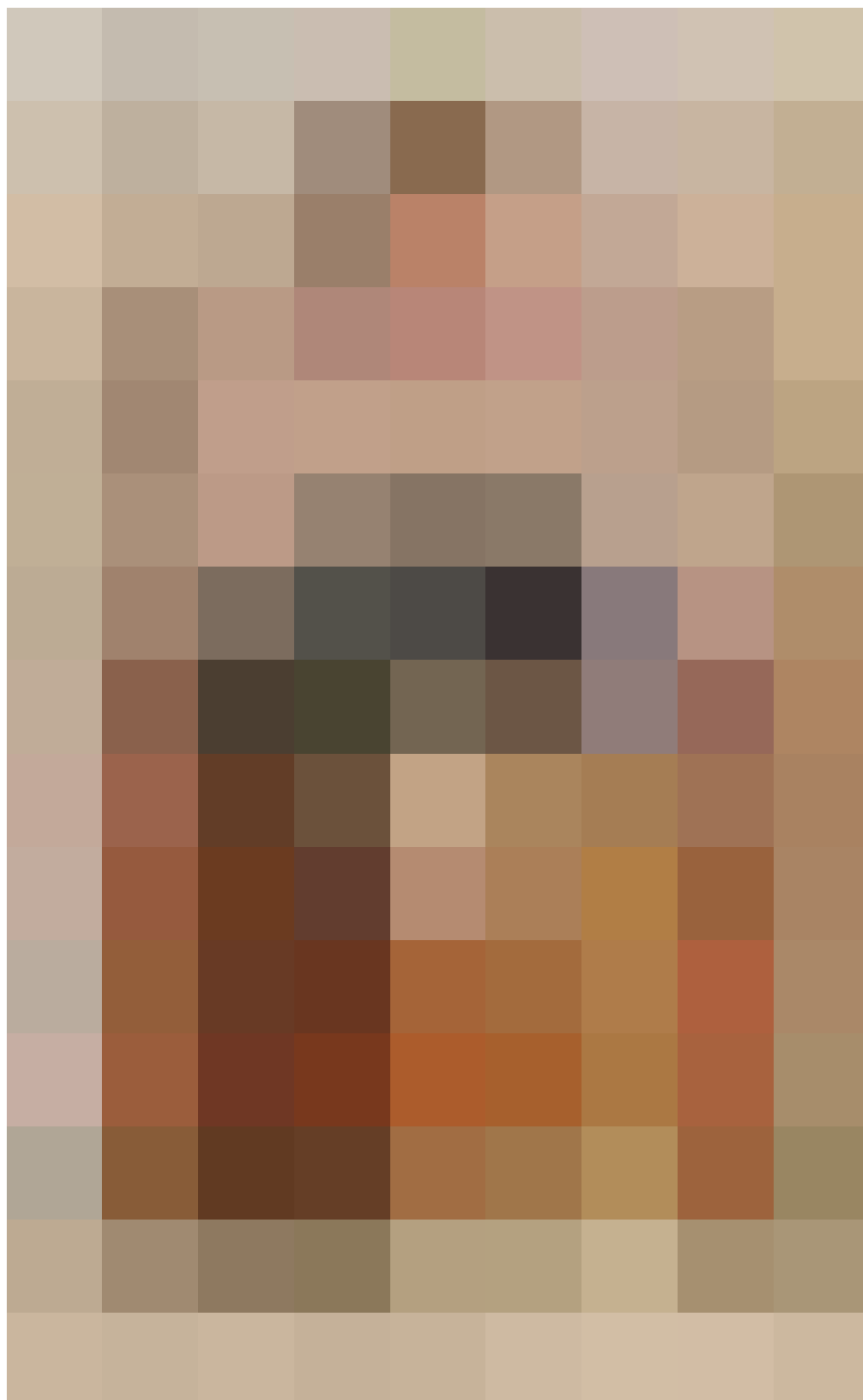


56

mente ricoperte da uno strato di stucco di calce, noto fin dal tempo del popolo Assiro, che rende omogenea tutta la parete diventando la base per la raffigurazione pittorica. Nell'architettura dei Greci quindi, quello che appare a noi oggi era volutamente celato; lo stucco nascondeva le fughe dei vari conci di pietra; si perde così il valore prettamente statico della parete e di protezione del materiale rivestito. [...] Lo scopo era di rappresentare in veste simbolica, mediante i caratteri morfologici della superficie coprente, l'essenza del sottostante corpo materico; la funzione della parete muraria era quella di delimitare lo spazio da un punto di vista fisico mentre da un punto di vista simbolico rappresentava la trasposizione dell'archetipo della parete: il tappeto»⁶¹.

56. Ipotesi ricostruttiva della policromia del Partenone di Atene realizzata da Gottfried Semper, 1836.

57. Ipotesi ricostruttiva della pittura parietale della nicchia per il *labrum* (vasca circolare) nel *calidario* (o *caldario*; dal latino *caldarium* o *calidarium*, da *caldus* o *calidus*, caldo) delle antiche terme romane. Disegno di Giuseppe Chiantarelli, 1798, ADS 1157.

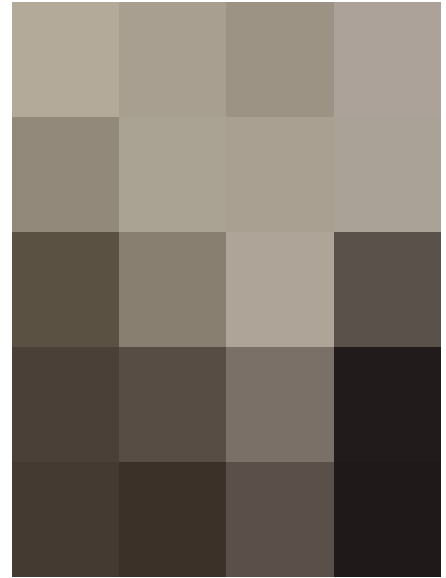


Costruzione a capanna

«Accade nell'Architettura come in tutte le altre Arti: i suoi principi sono basati sulla semplice natura»⁶². Così l'abate Marc-Antoine Laugier definì nel suo *Essai sur l'architecture* il rapporto fra antichità e natura, tra architettura e arte che si concretizza nell'archetipo della capanna, intesa come forma originaria dell'architettura, in modo particolare di quella greca. «Con il termine capanna si deve intendere non il semplice ricovero di rami e frasche, ma la costruzione rustica caratterizzata da una struttura lignea e da una copertura a due falce sporgenti anteriormente, in modo da formare un portico sorretto da piedritti ricavati da tronchi d'albero più o meno sgrossati»⁶³. La capanna rappresenta contemporaneamente il simbolo di una concezione naturale dell'architettura e la matrice dell'architettura greca. L'esempio più concreto di questa tesi è il tempio, indicato come una evoluzione in pietra della capanna, oggetto di imitazione non in senso formale, ma operativo in riferimento alla costruzione: «c'est à l'imitation de ses procédés que l'art [l'architettura] doit sa naissance». La razionalità costruttiva viene fatta coincidere con una concezione naturale dell'architettura»⁶⁴. Infatti, all'idea della capanna come prototipo naturale di architettura corrisponde l'idea dell'albero come archetipo della colonna, definita da Louis-Géraud de Cordemoy (Parigi, 1626 – Parigi, 1684) come ragione etimologica per cui essa deriva (dal latino) *columen*, che significa puntone, ovvero l'elemento ligneo disposto verticalmente per sostenere la parte di edificio chiamata *culmen*, cioè frontone⁶⁵. Tra le colonne dei vari ordini il tipo dorico è quello che più si avvicina alla concezione naturale e metaforico del tronco di un albero. Lo dimostra l'appoggio diretto al suolo della colonna, la sua rastremazione e le scanalature, considerate da Francesco Milizia (Oria, 1725 - Roma, 1798) una imitazione «degli screpoli della corteccia degli alberi, e dalle strisce cagionatevi dallo scolo della pioggia. Per questo motivo non si dovrebbero adoperare nell'[interno] degli edifici»⁶⁶.

La colonna, quindi, rappresenterebbe secondo antichi trattatisti l'elemento tettonico in grado di sorreggere la copertura di un edificio, svincolandosi dal rapporto muro/colonna, tema ampiamente affrontato dal Rinascimento fino ai grandi maestri del Moderno. Secondo il *De re aedificatoria*, Leon Battista Alberti (Genova, 1404 – Roma, 1472) sostiene che l'aspetto estetico di un edificio risieda essenzialmente in due elementi: la bellezza e l'ornamento. Mentre la bellezza è intesa come proporzione armonica di tutte le parti, l'ornamento è un adempimento della bellezza stessa, affermando che il principale ornamento risiede nella colonna. Alberti, quindi, non conoscendo i templi greci in cui la colonna è un elemento strutturale, classifica essa come un elemento decorativo della muratura. Il riferimento è quindi quello dell'architettura imperiale romana e proto-rinascimentale, un'architettura essenzialmente muraria, dove gli ordini greci sono trasformati in elementi decorativi.

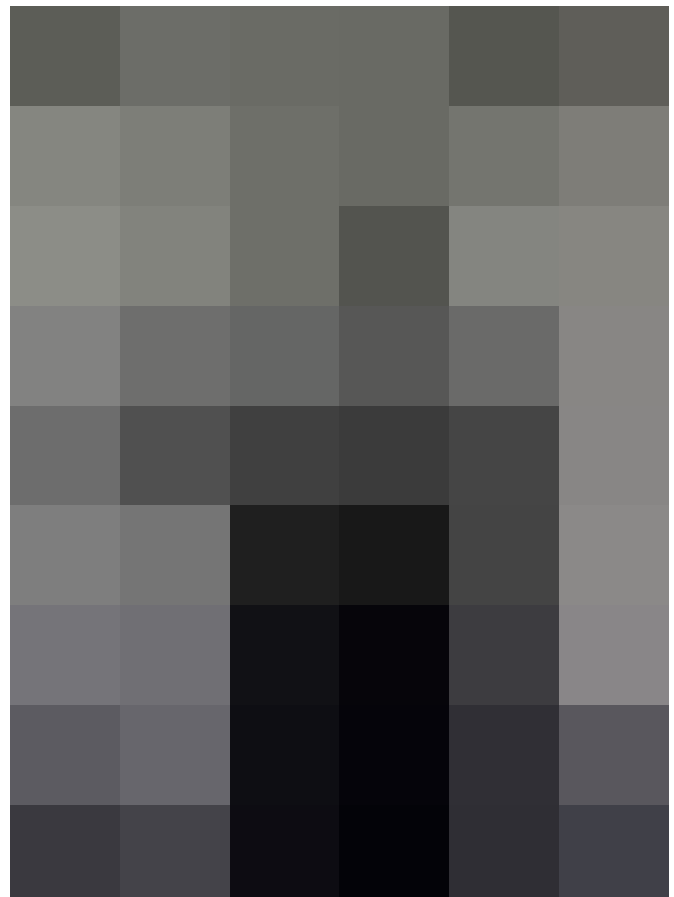
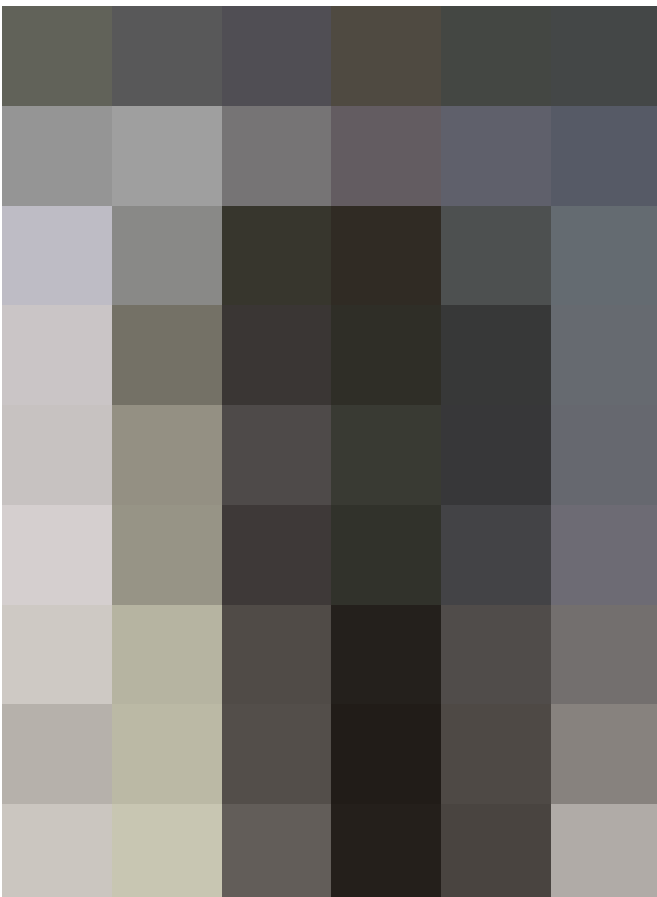
Questo perché nonostante la colonna nasce per la necessità di sostenere il tetto, alla fine viene apprezzata per le sue qualità estetiche tanto da diventare l'elemento architettonico più ornamentale⁶⁷. Dopo averla classificata come elemento ornamentale funzionale, Alberti definisce «una fila di colonne [come] un muro attraversato da molte aperture. E volendo dare una definizione della colonna, forse sarà giusto dire che è una parte salda e stabile del muro innalzata perpendicolarmente da terra fino alla sommità dell'edificio per sostenere la copertura»⁶⁸. Dall'operazione di vuotamento della muratura, però, Alberti tenderà a percepire un'incompatibilità nella combinazione colonna-muro, rifiutando da subito il motivo rinascimentale dell'arco sostenuto dalle colonne (fig.58) introdotte da Filippo Brunelleschi⁶⁹ (Firenze, 1377 – Firenze, 1446) e declinando il sistema facciata - soprattutto nella chiesa di San Sebastiano, nella basilica di Sant'Andrea a Mantova e nel Palazzo Rucellai a Firenze⁷⁰



58

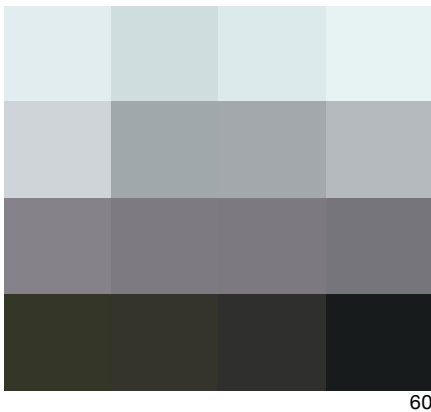
58. Portico de l'Ospedale degli Innocenti (1419-45), opera di Filippo Brunelleschi. Dettaglio dell'arco e del tondo sostenuti dalle colonne.

59. Differenza di ornamento tra la facciata del Tempio Malatestiano (1503) a Rimini e la facciata di Palazzo Rucellai (1451) a Firenze. Nel primo Leon Battista Alberti utilizza la colonna come elemento di ornamento; nel secondo caso egli declina la colonna in lesena definendo l'intervento un vero "decoro parietale".

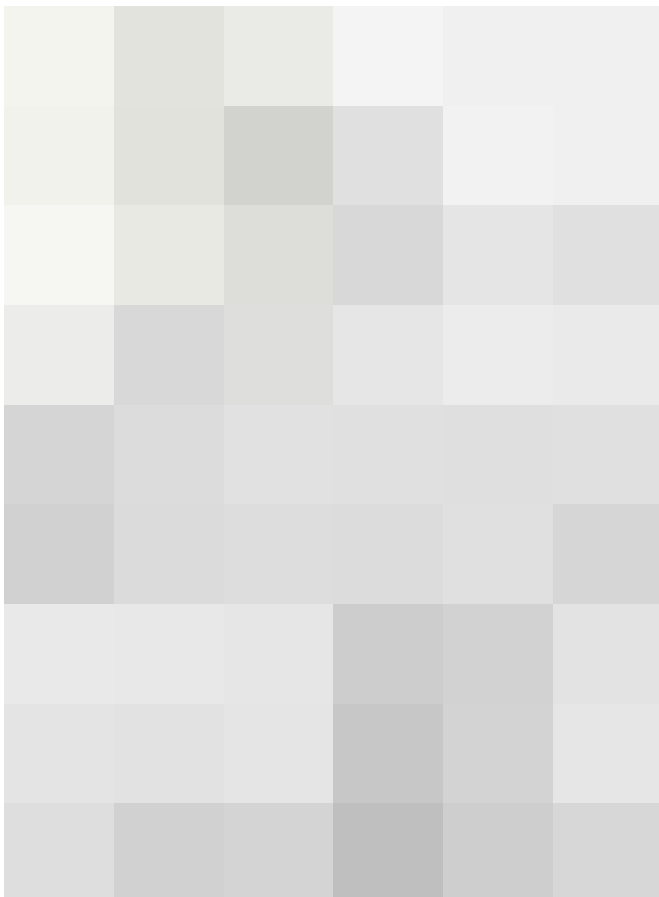


59

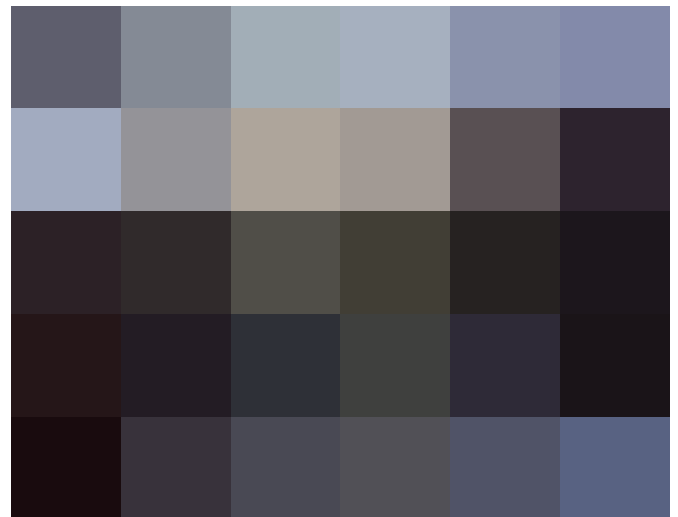
60. Le pilotis di Villa Savoye (1931), progettata dall'architetto Le Corbusier (Charles-Edouard Jeanneret), © Esther Westerveld.
61. Louis Kahn, Cattedrale di Santa Cecilia a Albi, disegno, 1951, in Casabella, n.275, 1963, pag.26.
62. Dettaglio del coronamento della Banca Popolare di Verona (1973.1981), opera di Carlo Scarpa. L'architetto adottò il principio dello sfumato palladiano proponendo un coronamento nero con inserito all'intersezione tra il doppio pilastro e la trabeazione, un elemento semisferico dorato definendolo «l'oro brilla anche nell'oscurità, anche nel più buio assoluto, se vi palpita un raggino di luce».
63. Capitello stilizzato della doppia colonna scarpiana nel Palladio Museum.



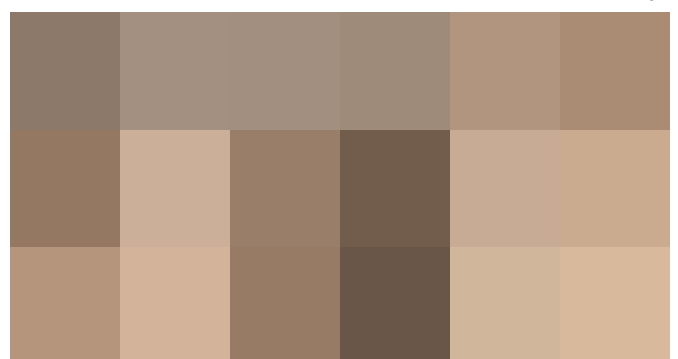
60



61



62



63

- mediante l'utilizzo di lesene, in quanto esse sono la trasformazione logica della colonna⁷¹ (fig.59). Secondo Alberti, quindi, l'utilizzo degli ordini deve rispettare la sintassi degli edifici antichi codificati nel suo trattato per cui è preferibile utilizzare nei templi le *columnae rotundae* sormontate da trabeazioni, diversamente dalle basiliche e da altri tipi di edifici pubblici, dove è opportuno attenuare l'importanza della fabbrica rispetto al tempio ricorrendo ad archi su *columnae quadrangulae* (pilastri)⁷². Nella facciata del Tempio Malatestiano, Alberti dispone quindi un ordine maggiore di semicolonne trabeate - un *opus affictum* - ed un ordine minore di lesene sormontate da archi a tutto stesso secondo la composizione mutuata direttamente dagli antichi, primo fra tutti il colosseo⁷³.

I prolegomeni di Leon Battista Alberti aprono, quindi, un nuovo paradigma muro/colonna, teoricamente ripresa nel Novecento da Hubert Damisch (Parigi, 1928 - Parigi, 2017)- che la esaspera fino all'analogia con la coppia scheletro/involu-

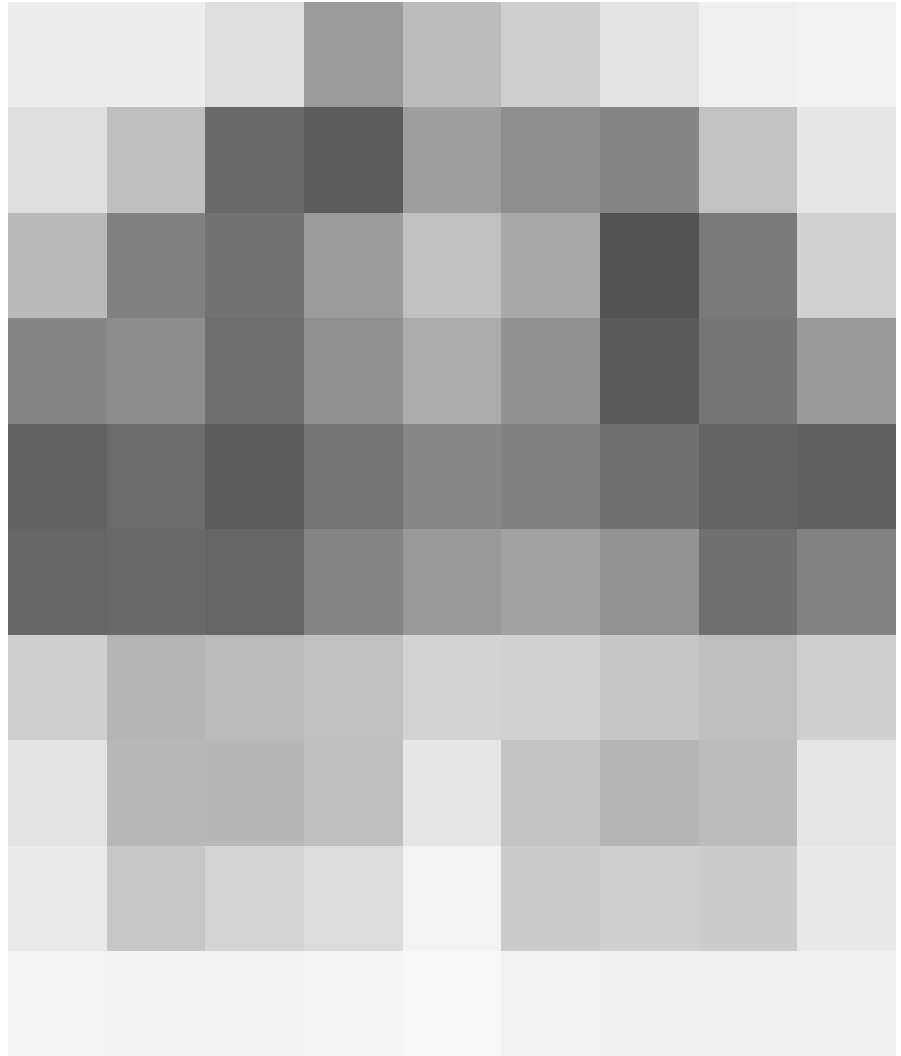
cro - e da Geert Bekaert in cui espone la valenza che il rapporto muro/colonna riveste per un architetto moderno come Mies van der Rohe.

Anche Le Corbusier (Charles-Edouard Jeanneret), (*La Chaux-de-Fonds*, 1887 - Roccabruna, 1965) stravolge l'archetipo della colonna definendola «una parola guasta, rovinata» riferibile all'Ottocento⁷⁴, sostituendola con le *pilotis*, notoriamente uno dei *Cinq points de l'architecture nouvelle*, presenti in una delle sue opere più significative e mature, quella di *Ville Savoye* (1931) a Poissy (fig.60). L'uso astratto della colonna non è esclusivo di Le Corbusier e lo si ritrova in moltissime altre opere di architetti contemporanei, come Louis Kahn «col suo intenso richiamo alla colonna greca, alla sua autodefinizione, al suo trasformarsi in muratura, alla sua geometrica e formale evidenziata nei disegni della cattedrale di Albi»⁷⁵ (fig.61), oppure Carlo Scarpa «che col raddoppiamento del pilastro rinvia alla colonna ed al suo buon uso»⁷⁶ (figg.62-63).

Il tema della capanna in architettura divenne un tema centrale sul finire dell'Ottocento poiché l'apparente semplicità dell'oggetto nasconde una grande complessità teorica, soprattutto nella definizione di un modello. La *petite cabane rustique* elaborata da Laugier come primordiale forma di riparo e la *capanna primitiva* promossa nei trattati vitruviani come un bisogno atavico dell'uomo di proteggersi soddisfano entrambe le condizioni del concetto di mimesi dimostrando da un lato che i principi dell'Architettura si fondano sulla pura natura; dall'altro come modello. La capanna, infatti, «non è un prodotto naturale. È già di per se un manufatto, seppur "primitivo"»⁷⁷, in quanto il ricorso ai tronchi d'albero come piedritti a sostenere la copertura vegetale con rami intrecciati, segna il passaggio dalla condizione naturale a quella artificiale attraverso un'opera intenzionale dell'uomo⁷⁸. Secondo Quatremère de Quincy, la capanna è l'unica, tra le costruzioni primitive, a poter fungere da modello all'imitazione in quanto essa rappresenta un tutto già legato da rapporti necessari, un insieme composto di parti subordinate al principio della necessità⁷⁹.

Per Viollet-Le-Duc lo *chalet* costituiva la nuova tipologia di manufatto primitivo, progettato dallo stesso architetto per realizzare la propria abitazione nello chalet *La Vedette* a Losanna (fig.64) successivamente demolito in quanto accusato di vagheggiare la mitica chimera di un gotico; «nè la sua qualità di casa sana e tranquilla valse a proteggerlo. Esso non era considerato architettura»⁸⁰. Viollet-Le-Duc ha suggerito come sono le case trasportabili in legno dei nomadi - che ad un certo punto si stabilirono - a fornire l'archetipo dello chalet franco-svizzero, della capanna moscovita e di quella norvegese.

La natura del primitivismo in architettura venne affrontata anche da Le Corbusier e come essa si relazione con il concetto di modernismo. Il compito dell'architetto e dell'urbanista, per come lo vedeva lui, era quello di utilizzare i mezzi moderni



64

per risolvere la crisi prodotta dalla modernità. Non c'era alternativa che usare i nuovi materiali e i metodi per creare grandi schemi che introducessero ordine, spazi aperti e verde nel groviglio della città moderna. Faceva anche parte di quella che era in effetti una campagna in stile militare per cambiare radicalmente la pratica dell'architettura e dell'urbanistica e distruggere l'autorità degli "stili" e delle accademie che li insegnavano. Solo nel dopoguerra riuscì a far convivere in parte il contraddittorio amore per il semplice e il naturale con il grandioso schema di rinnovamento urbano, con il progetto delle *Unités d'habitation*, per quanto incomprese queste fossero. La descrizione delle capanne dei pescatori era anche una sorta di revisione del famoso racconto di Vitruvio della primitiva capanna nella foresta. A differenza dell'architetto Loos in cui insisteva sul fatto che le

64. Chalet «La Vedette», abitazione privata di Viollet-Le-Duc, 1874-1876. in Morel A., *Habitations modernes*, tomo I, Parigi, 1877, pag.161.

65. Le Corbusier, schizzo presentato nel 1929 alla settima lezione di Buenos Aires in cui illustra i quattro modelli: capanna primitiva, pianta di un primitivo tempio, l'ordine dorico come sistema di costruzione ligneo e la capanna del pescatore del Bassin d'Arcachon, in *Une maison, un palais*, pubblicato in *Précisions*, pag.160, (FLC 335254), ©FLC/ADAGP, 2018.

case non facevano parte dell'architettura, sia Vitruvio che Le Corbusier vogliono trovare le radici dell'alta architettura nella semplice abitazione. La capanna fatta di rami d'albero diventa il tempio (*primitive temple*), per Vitruvio, mentre la baracca dei pescatori diventa un palazzo per Le Corbusier.

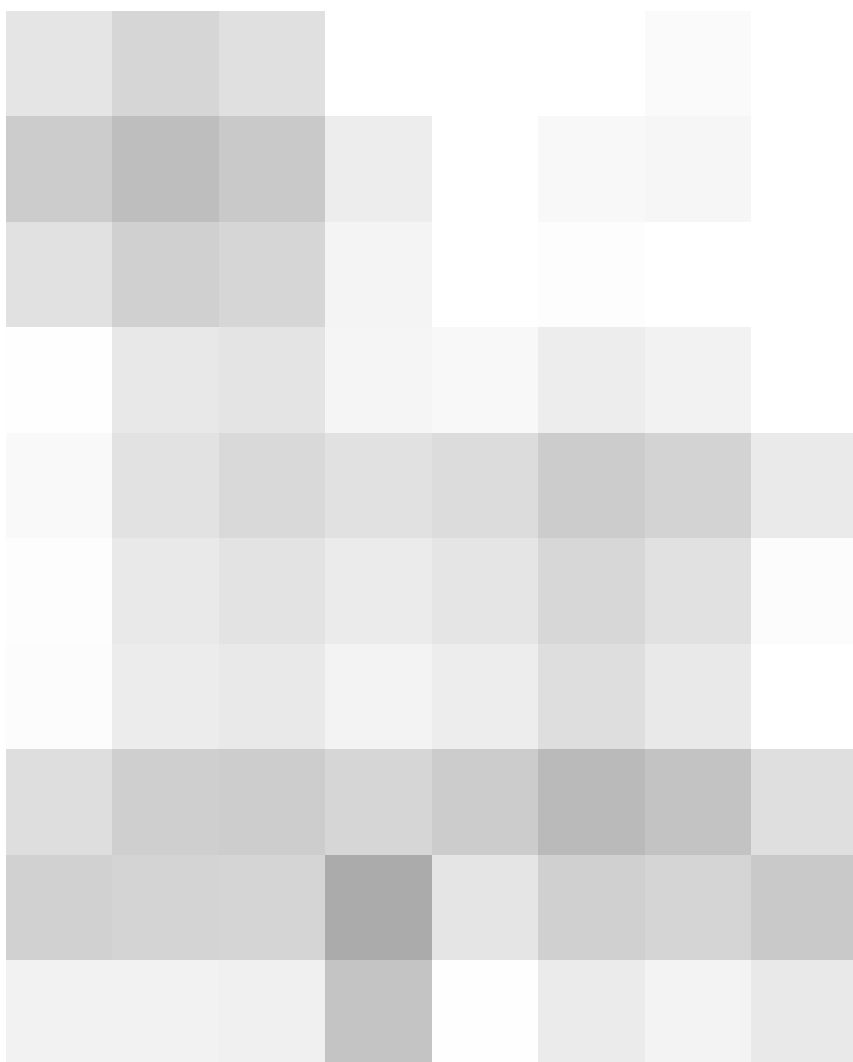
Dimensione umana, proporzione e dignità potrebbero essere la definizione di una nuova architettura senza stili e questi erano gli elementi che Le Corbusier cercava sempre più nei propri progetti architettonici, tra cui una purificazione dalle gioie del vivere a quelle del sole, dello spazio, del cielo e verde. «*La cellule à l'échelle humaine est à la base*»⁸¹ sarà il suo slogan. Ha ripetuto la dimostrazione del tempio primitivo, la baracca del pescatore e la casa del contadino in quasi tutte le sue lezioni successive. Ad

esempio, a Buenos Aires, nella sua settima conferenza del 1929, illustra i modelli: i primi due schizzi rappresentano una primitiva capanna e la pianta di un primitivo tempio votivo, illustrati successivamente in *Une maison un palais* (1929); il terzo schizzo, derivato da Choisy, mostra l'ordine dorico come un sistema di costruzione ligneo e il quarto è la capanna del pescatore del *Bassin d'Arcachon* (fig.65). Lui ha spiegato:

*«Furono questi organismi, creati con la stessa autenticità che la natura presta alle sue creazioni - la sua economia, purezza e intensità - che divennero, in un giorno soleggiato e perspicace, palazzi»*⁸².

L'importante epigono sulla capanna del pescatore faceva parte del suo rifiuto di ciò che lui chiamava - ormai con alterigia - "civiltà", la corruzione del gusto creata dall'industrializzazione, dal sovraffollamento e dal turismo. Ormai eremita in case elementari immerse nella natura, prima Le Piquey, poi nella colonia per artisti a Vézelay, produssero enfasi su una misura umana e su una misura corretta che divenne sempre più importante per Le Corbusier nello sviluppo - durante la guerra - del *Modulor*. Non sorprende, dunque, che quando egli creò la sua capanna primitiva denominata "*Cabanon*" perfettamente proporzionata a Roquebrune-Cap Martin, si basava teoricamente sul *Modulor*.

La tortuosa storia delle relazioni tra struttura architettonica e involucro edilizio e della loro progressiva scissione risulta strettamente legata non solo agli avviciamenti teorici e di fatti pratici, ma è largamente influenzata dall'evoluzione delle tecniche costruttive e dell'introduzione di nuovi materiali. Lo stesso Semper nel folgorante *incipit* dello *Der Stil* indica l'Ottocento come "stadio di transizione" tra modelli artistico/architettonici - ormai consumati - e nuove forme che stanno nascendo dal "caos", di stili innovativi generati da mondi costruttivi inediti e da tecniche d'avanguardia.



Architettura di pietra: materiali tradizionali della costruzione massiva

A memoria d'uomo sono state erette pareti portanti massive con diverse tipologie costruttive a seconda delle condizioni di vita locali, delle conoscenze tecniche e dei materiali disponibili in situ. La relazione apertura-parete, vuoto-pieno si sviluppa con la costruzione massiva. I nostri antenati, infatti, avevano una certa predilezione per l'oscurità come senso di protezione e le aperture di grandezza molto ridotta praticate su involucri di pietra, di laterizio o di fango soddisfacevano questa necessità di natura istintiva. Al tempo stesso, la poca conoscenza di un materiale come il vetro, non limitava il contenimento delle dispersioni energetiche attraverso le aperture, il cui dimensio-

namento aveva un ruolo importante in determinati contesti climatici. *«Il progressivo svincolarsi dell'architettura dalla pressione della muratura portante e il parallelo sviluppo del vetro, aumentò la considerazione dell'elemento luce nell'architettura. La primordiale e istintiva attrazione del mistero svanì e al buio si sostituì il desiderio di luminosità»⁸³.* I primi che si fecero promotori nella creazione di ampi vuoti nelle superfici opache lapidee furono gli scalpellini delle architetture gotiche. La massività dei corpi di fabbrica di chiese e cattedrali furono ridotti alla sola ossatura di elementi portanti e di appoggio sollecitati quasi esclusivamente a compressione. L'involucro si evolse in una struttura composta di nervature e volte, superfici murarie, archi rampanti, piloni e costolonature (fig.66). *«La maggior parte delle pareti ester-*

66. L'arte di costruire cattedrali, © National Geographic.





67

67. Le Ziqqurat sumeriche realizzate impiegando mattoni di terra crudi mescolati con paglie e/o inframmezzati con canne vegetali.

68. Il palazzo della necropoli di Djoser a Saqqarah, importante evoluzione dell'architettura monumentale e manifestazione esplicita di utilizzo di pietre perfettamente squadrate.

ne non assolve più le funzioni statiche e fu libera di accogliere ampie finestre: lo spazio si aprì verso la luce. Vetri colorati traslucidi, che lasciavano filtrare la luce, ma che non consentivano la visuale verso l'interno, diventarono filtro fra interno ed esterno, ma anche veicolo di imponenti immagini illuminate dal retro»⁸⁴. Le architetture di pietra, quindi, sono strettamente correlate all'ambiente in cui esse si trovano, alla tipologia di risorse naturali, alla particolare conformazione geologica e, quindi, della varietà dei litotipi. Questi fattori hanno caratterizzato l'architettura sin dalle sue origini: in Mesopotamia, regione dell'Asia occidentale attraversata dai fiumi Tigri ed Eufrate, si produce un'architettura simbolica e monumentale, basata sull'impiego di

mattoni di terra cruda messi in opera con malta terrosa e rivestiti di intonaco dello stesso materiale finemente decorato con opere policrome e polimateriche (fig.67); in Egitto, materiali argillosi sono accostati a materie vegetali e alla grande varietà di litotipi - ideali per le costruzioni - come le arenarie, i calcari, quarziti, graniti, brecce, porfidi, alabastri, etc⁸⁵. La prima manifestazione esplicita di utilizzo di pietre perfettamente squadrate si ha con l'emergere degli antichi regni protodinastici, forieri di una espressione costruttiva straordinariamente evoluta e promotori di una nuova tradizione costruttiva che fornì all'architettura un carattere di solidità, durabilità e anche monumentalità, come l'esempio del palazzo di Djoser a Saqqarah (fig.68).



68

Il trilito come involucro

L'architettura delle culture primitive mediterranee si distinguono per l'utilizzo della pietra in quella definita come costruzione megalitica, in cui il materiale lapideo è impiegato rudimentalmente nella sua forma naturale originaria e sottoposta ad un semplice processo di adattamento. Le prime manifestazioni dell'uso dei litotipi nella forma naturale e priva di trasformazioni è possibile individuarli negli antichi *menhir*, nelle *mura ciclopiche*, nei *dolmen* e nelle *tombe a tholos*. Questa primordiale manifestazione costruttiva si lega con l'origine e la

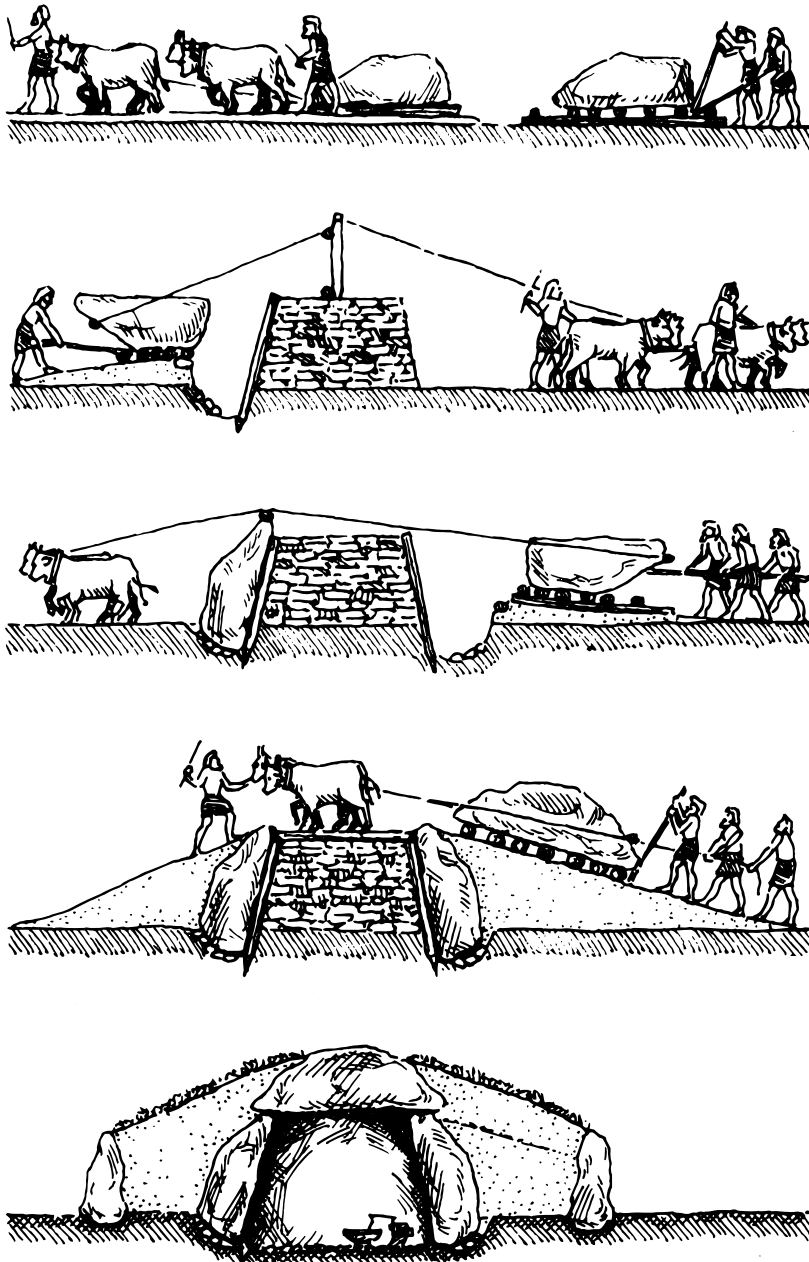
visione monumentale e simbolica dell'architettura, così come affermerà Vittorio Gregotti in occasione di un discorso presso la New York Architectural League nel 1982: «prima di trasformare un appoggio in una colonna, un tetto in timpano, prima di collocare una pietra sopra l'altra, l'uomo ha posto la pietra sul terreno per riconoscere un sito nel bel mezzo di un universo sconosciuto: al fine di tenerne conto e di modificarlo. Come ogni atto di accertamento questo richiedeva movimenti radicali e un'apparente semplicità. Da questo punto di vista, ci sono soltanto due importanti atteggiamenti rispetto al contesto. Gli strumenti del primo sono la mimesi, l'imitazione organica e il dispiegamento della complessità. Gli strumenti del secondo sono l'accertamento delle relazioni fisiche, la definizione formale e l'interiorizzazione della complessità»⁸⁶. Il gesto primitivo nel presentare il trilite ha definito la presenza dell'uomo nello spazio; quando esso raddoppia il trilite, questo si trasforma in casa materializzandosi nella teoria della capanna primordiale (fig.69). Se nell'analisi della capanna primi-

tiva dell'abate Laugier è possibile leggere il raddoppio del trilite, mancano in essa gli elementi che lo renderebbero involucro. Solo l'analisi critica ne *"I quattro Elementi dell'architettura"* di Gottfried Semper in cui oltre al basamento, al tetto e all'intelaiatura della capanna caraibica, si aggiunge una membrana di chiusura tessile, che «va a trasformare concettualmente il trilite da riparo ad involucro indipendente e formalmente compiuto»⁸⁷ o, ancora, nell'idea di abitazione proposta dal filosofo tedesco Martin Heidegger (Meßkirch, 1889 – Friburgo in Brisgovia, 1976) in cui coniuga la capanna di Choisy e l'involucro elementare di Semper, affermando come «abitare è con ciò aver cura del proprio spazio, essere in rapporto con lo spazio, colmare lo iato artificiale tra il progetto, il costruire e infine l'abitare»⁸⁸. Infine, lo sviluppo teorico dell'architettura di pietra e del trilite troverà ampio dialogo durante il Movimento Moderno, il cui rapporto tra struttura e ornamento di Adolf Loos, costituirà il prologo e la nascita del concetto di trilite come macchina⁸⁹. Le prime architetture in blocchi di

69. Il dolmen "La Chianca" a Bisceglie - Puglia, © Natalino Russo.



70. Elaborazione grafica della tecnica di costruzione di un dolmen: a) trasporto degli elementi lapidei; b) realizzazione della parete di fondo in elementi lapidei posati 'a secco' e della trincea perimetrale; c) posizionamento degli elementi lapidei mediante un sistema di leve e funi a forza animale; d) realizzazione di una rampa di terra per la posa in opera del blocco lapideo di copertura; e) dolmen.



pietra costruite dall'ingegno umano, si sviluppano a partire dall'introduzione di strumenti metallici in rame o in bronzo, molto validi ed efficaci per le fasi di estrazione e lavorazione del materiale lapideo. Mentre nei menhir l'elevazione discontinua dei monoliti conduce ad artefatti, ovvero strutture prive di involucro e quindi tendenzialmente aperte nello spazio naturale; nei dolmen si ha un primo approccio verso una forma di spazialità inclusiva, ottenuta dalla massività delle pareti composte da enormi blocchi di pietra e spesso ricoperti da un tumulo di

terra, con la duplice funzione di "rampa di terra" per la posa del blocco lapideo di copertura e di isolamento termico dell'abitazione (fig.70).

Il sistema stereometrico murario tra origini e classicità ellenistica

Oltre ai prestigiosi esempi di strutture megalitiche nel mondo, come il sito di Stonehenge, anche in Italia esistono numerosi esempi, come i dolmen del tipo 'a galleria' in Puglia, quali: la tavola dei paladini a Montalbano, i dolmen di Bisceglie, di Cisternino, di Giovinazzo, di Placa, di Scusi, di San Silvestro, etc. Nel sistema megalitico, quindi, è possibile individuare la tecnica antesignana della stereotomia (da *stereo-*, dal greco *στερεός* cioè "fermo, solido" e *-tomia*, dal greco *Τομή* ossia "taglio") che definisce la formazione della struttura per masse e volumi in continuità materica, ottenuta dalla giustapposizione di strati composti da elementi lapidei più o meno regolari e con l'ausilio, o meno, di malte leganti. Per contro, in altre aree geografiche - soprattutto in quelle ricche di foreste - la bontà della risorsa del legno predilige l'*ars costruendi* locale verso la concezione di tectonica (dal latino tardo *tectonicus* e dal greco *τεκτονικός* «che riguarda l'arte del costruire», der. di *τέκτων-ovos* «costruttore), «dove si associano componenti di natura leggera e lineare (derivanti dalla materia lignea dei tronchi d'albero) assemblati in modo tale da individuare una maglia aperta, disposta per "punti" sul suolo, da "chiudere" successivamente con tamponamenti»⁹⁰. Lo sviluppo della muratura come processo di delimitazione inclusiva si pone come evoluzione tra volume stereometrico e vuoto, tra massività muraria e spazio ipogeo. La muratura, quindi, nasce come processo addizionale della materia disponibile in natura. Se legno, fibre vegetali intrecciati, arbusti, canne palustri hanno costituito l'archetipo del rifugio primitivo, terra e pietra rappresentano l'avanzamento tecnologico quale struttura verticale solida, impenetrabile dal vento, dalla pioggia, dagli animali e dagli stessi uomini.

«Le pietre, di qualsiasi genere e forma, disposte l'una accanto all'altra, l'una sopra l'altra, nei vari modi aggregativi esprimono sin dalle origini l'esistenza di una mente creativa ed ordinatrice; al pari dell'arte della tessitura, l'arte muraria attiva una sintassi combinatoria e compositiva»⁹¹.

L'impiego di pietre e litoidi di natura diversificata a seconda della giacitura geomorfologica e dalla natura petrografica hanno restituito una diversificazione della stereometria di lavorazione della pietra e della pratica muraria.

L'involucro e quindi anche il rivestimento dell'opera muraria assume aspetti diversificati a seconda degli elementi litici ottenuti dall'estrazione in cava: pietre grezze, spigolose, smussate, levigate, massi, blocchi, scapoli, ciottoli sono solo alcune delle diverse lavorazioni e tipologie di elementi litici che caratterizzeranno la storia costruttiva ed architettonica nei secoli a venire (fig.71). Il perfezionamento del sistema murario vedrà nell'introduzione

della malta il più importante contributo prestazionale e costruttivo della stereotomia muraria, in grado di sviluppare nuovi modelli ed entità materiche (fig.72).

L'analisi delle diverse tipologie di muratura è condizionato dal suo variegato orizzonte tematico, sempre in costante evoluzione in quanto all'archetipo murario associamo il valore "sovra-storico" di un tema architettonico permanente, stabile, mai più cancellabile dall'esperienza costruttiva dell'uomo, ma sempre rinnovabile attraverso un incessante e variegato lavoro di riscrittura sulla materiali litici e sui modi di ricomposizione dei corpi volumetrici.

Nella tessitura muraria e nell'arte della connessione (fig.73) risiede la testimonianza materica di tutte le diverse configurazioni in cui può presentarsi la materia lapidea. «*Ci sarà un momento in cui le pareti di pietra s'incurveranno per diventare archi e volte, si distenderanno in 'orizzontale' a formare solai e pavimenti realizzati con gli stessi materiali*»⁹².

71. Evoluzione storico-costruttiva delle architetture di pietra, in Rondelet G., *Trattato Teorico e pratico dell'arte di edificare*, planches IX, Stabilimento tipografico di Francesco del Vecchio, Napoli, 1840.

72. Tipologie di tessiture murarie, in Rondelet G., *Trattato Teorico e pratico dell'arte di edificare*, planches IX, Stabilimento tipografico di Francesco del Vecchio, Napoli, 1840.

73. Tipologie di connessioni murarie e dimensioni dei blocchi lapidei in alcuni monumenti greci (Monumento a Filopappo; Tempio di Minerva Poliade, Tempio sulle rive dell'Hisus, Tempio della Concordia ad Agrigento, Propilei di Atene, Tempio del mare ad Atene), in Rondelet G., *Trattato Teorico e pratico, o dell'arte di edificare*, planches XI, Stabilimento tipografico di Francesco del Vecchio, Napoli, 1840.





72

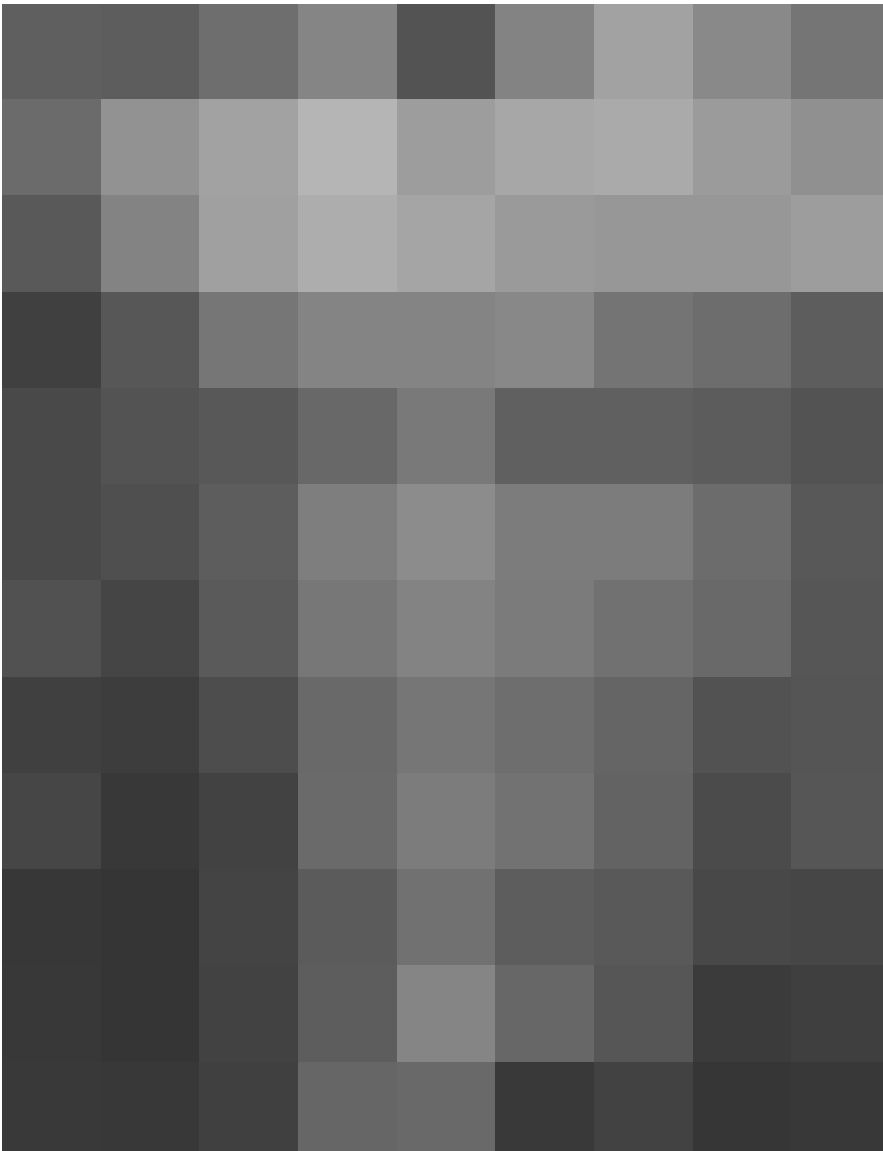


73

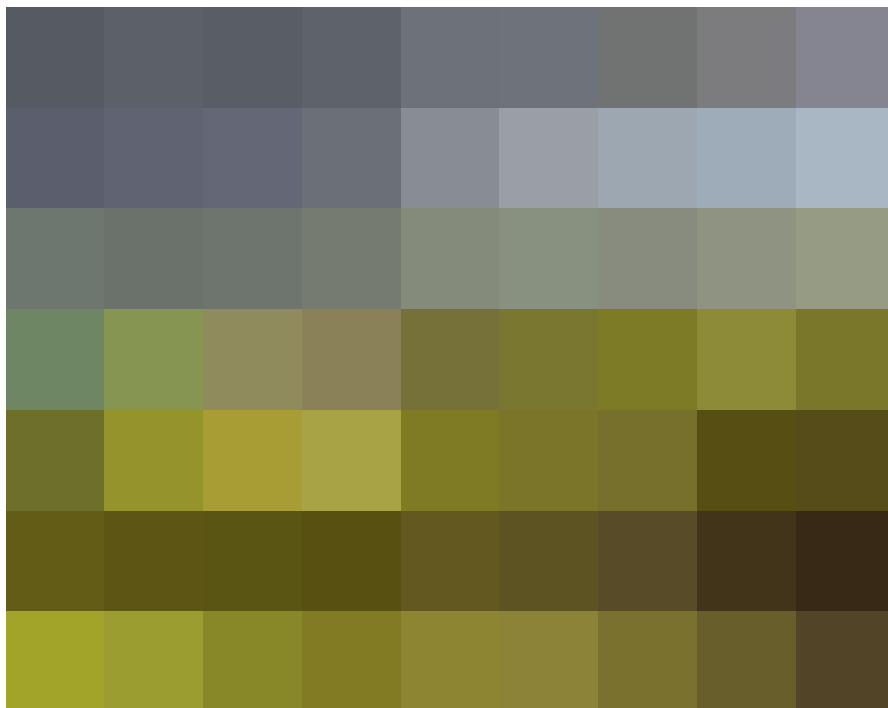
L'elemento parete, o muro, o muratura è la prima entità a rompere la spazialità "protoarchitettonica", ottenuta dalla massa rocciosa erosa naturalmente o sottratta dall'azione umana. La muratura, infatti, rappresenta l'artefatto umano in grado di creare ambiti spaziali enucleati, la cui configurazione e connessione tra le pareti si ricongiungono a formare volumi stereometrici massivi. Questa azione definisce per la prima volta nella storia dell'uomo una delimitazione pertinenziale tra natura e area antropica, tra paesaggio e città, tra ambiente interno ed ambiente esterno. Sullo scenario naturalistico sorgono le origini della civiltà architettonica come i recinti sacri egiziani, le mura urbane delle città micenee o quelle dei *tèmenos* dei santuari greci, delle grandiose opere infrastrutturali ro-

mane, delle abbazie, delle certose, delle austere chiese romaniche fino alle auliche cattedrali gotiche, una continua parabola evolutiva che si protrarrà fino alla contemporaneità.

Una testimonianza - fra le più antiche - è rappresentata dalla Torre di Gerico (fig.74) e delle relative mura urbane nel vicino Oriente, costruita nel Neolitico Aceramico (8.500-7.500 a.C.), prima ancora che l'uomo praticasse l'agricoltura, plasmasse l'argilla e inventasse la ruota. Rappresenta la prima opera architettonica collettiva di tipo difensivo, alta e larga circa 8 metri che testimonia un precoce sviluppo organizzativo della comunità, non solo per la ideazione architettonica, ma per il procacciamento della pietra e della particolare messa in opera⁹³.



74. Immagine storica della Torre di Gerico, in Kenyon K.M., Holland T.A., *Excavations at Jericho*, vol. III, British School of Archaeology in Jerusalem: Oxford University Press, 1981, pag.19.



75

Una delle più antiche modalità di realizzare una muratura in pietra è l'opera megalitica che si sviluppa nel Mediterraneo in età arcaica. Tra le testimonianze più antiche, le mura di Tiro (1.400 a.C.) e il Tempio megalitico di Gigantia a Malta (3.600 - 2.800 a.C.) rappresentano tra le più antiche e meglio conservate strutture in pietra. Le murature del tempio maltese, per esempio, sono della tipologia 'a secco' costituita da due pelli con un'intercapedine riempita di pietrame (fig.76). Era abituale strofinare i blocchi con la sabbia per una migliore solidarizzazione (fig.77). A fornire un nuovo impulso alla tecnica costruttiva della muratura dopo la civiltà fenicia, saranno le popolazioni continentali dell'Argolite nel Peloponneso, il cui centro vitale è rappresentato dalla civiltà micenea.

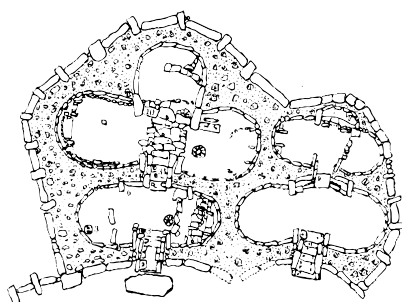
75. Le rovine di Skara Brae nell'arcipelago delle isole Orcadi in Scozia, © Pecold/shutterstock.

76. Impianto planimetrico del Tempio di Gigantia a Malta.

77. Tempio di Gigantia a Malta (3.600 - 2.800 a.C.).

Più antico delle Piramidi di Giza e di Stonehenge è il villaggio neolitico di Skara Brae nell'arcipelago delle isole Orcadi in Scozia. Qui vivevano agricoltori e pescatori di una antica civiltà, abili anche nella costruzione di case in pietra scavate nel terreno, in grado di assicurare stabilità e isolamento termico, soprattutto durante la stagione invernale (fig.75). Le nove costruzioni in pietra, comunicanti tramite passaggi coperti erano dotate anche di soluzioni molto avanzate, come rudimentali impianti idraulici, porte, armadi e letti in pietra e il focolare domestico - luogo centrale di tutta la collettività - alimentato da alghe ed erba. Le coperture erano costituite da elementi ossei tappinati con una miscela di erba e fango.

A Micene si ha una anticipazione dell'architettura greca: l'ampia disponibilità di calcare e le evolute tecniche di estrazione e lavorazione dei blocchi, furono utili per la costruzione di poderose strutture difensive (come le città fortificate di Tirinto e di Argo) che possedevano la peculiarità di sorgere in corrispondenza di siti rocciosi e orograficamente irregolari, con lo scopo di aumentare la difesa degli anfratti e degli speroni naturali. Il legame tra la civiltà micenea e la futura civiltà greca è rintracciabile non solo nelle strutture difensive, ma soprattutto nella realizzazione di palazzi e templi che attraverso l'uso di portici, propilei e vestiboli finemente decorati, mostrano alcuni prodromi dell'età ellenistica.

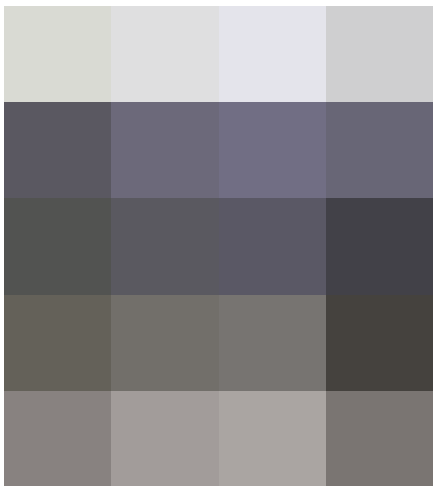


76

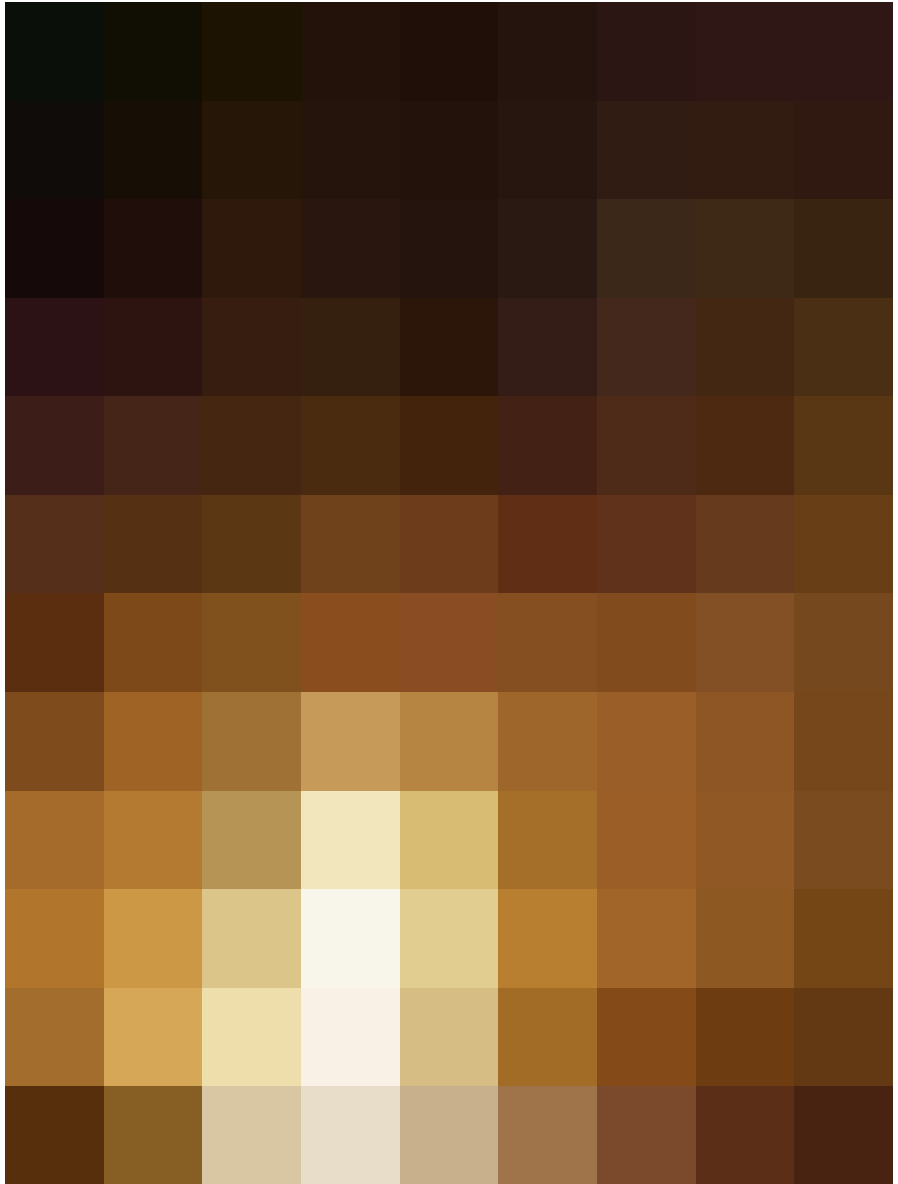


77

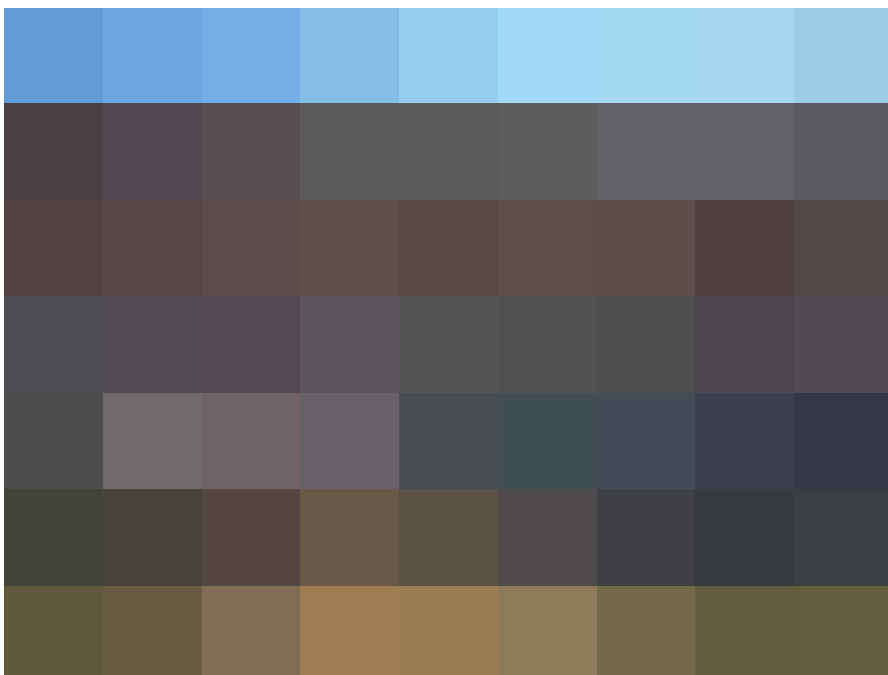
Ai peculiari terrazzamenti su cui sorsero mirabili palazzi micenei, sventrano vigorose e severe mura ciclopiche utilizzate per migliorare artificialmente gli sbarramenti naturali, la cui struttura è caratterizzata da grandi conci di pietra informi, poligonali oppure perfettamente squadrate, sinonimo di forza e inattaccabilità, peculiarità dell'*acropoli* (dalle parole greche *akros* + *polis* = città alta) (figg.78-79). All'interno delle mura di Tirinto, città palaziata che domina la piana di Nauplia e Argo è possibile rintracciare la più completa espressione del sistema murario megalitico in grado di anticipare - soprattutto nelle strutture difensive delle *casematte* - primordi di pseudo archi e di pseudovolte (figg.80-81).



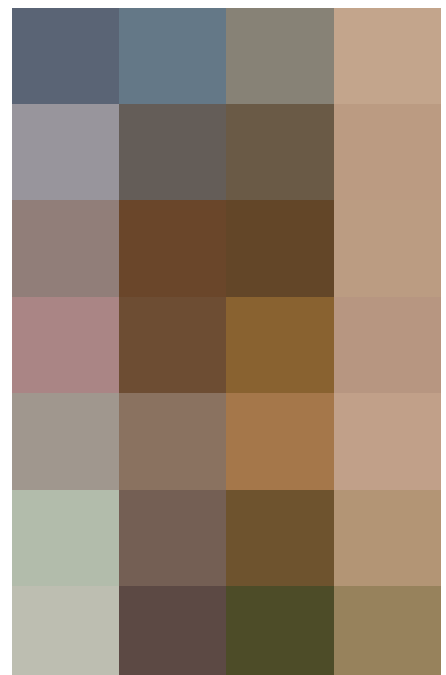
78



80



79



81



82

le pietre estratte dalla cava offrivano superfici di forma diversa»⁹⁴. Esiste, inoltre, una variante dell'opera poligonale, denominata *di lesbia*, caratterizzata dai giunti a spigolo vivo ottenuti dalla rottura naturale della risorsa litica presente nell'area dell'Isola di Lesbo e che trova un esempio nel raffinato basamento del grande tēmenos panellenico di Delfi (IV secolo a.C.) (fig.83).



83

78. Nella pagina precedente: porta dei Leoni, entrata monumentale della città di Micene, in Argolide (Grecia).

79. Nella pagina precedente: mura ciclopiche dell'antica città di Tirinto come miglioramento artificiale degli sbarramenti difensivi naturali.

80. Nella pagina precedente: l'interno della Sala del Tesoro di Atreo, nota anche come Tomba di Agamennone, nei pressi della Rocca di Micene. Si tratta di un *tholos*, una "falsa cupola", cioè una struttura interrata in cui le pietre non hanno una funzione spingente come nelle vere cupole, in Grecia Antica. Storia illustrata, Giunti Editore, Milano, 2019.

81. Nella pagina precedente: gallerie difensive di accesso alle casematte di Tirinto, CC-Davide Mauro.

82. Muratura realizzata con opera poligonale.

83. Muratura basamentale del tēmenos di Delfi (IV secolo a.C.), realizzata con opera poligonale di lesbia, © Claude Rozay - Voyage virtuel.

Sempre in ambito ellenico, i muri ciclopici, le mura urbiche, i basamenti e le grandi costruzioni terrazzate, presentano una innovazione dal punto di vista della tecnica costruttiva, ovvero quella dell'*opera poligonale*, contraddistinta da blocchi lapidei assemblati a formare un paramento a giunti stretti e rigorosamente planari (fig.82). Tale tecnica, sviluppatasi parallelamente all'*opera quadrata* è caratterizzata da una sezione muraria molto significativa e particolarmente resistente, esempio dell'eccezionale sapienza costruttiva sviluppata dalle antiche popolazioni del Peloponneso. La stabilità delle murature in opera poligonale è assicurata dal perfetto incastro tra gli elementi, la cui conformazione poligonale contrasta efficacemente lo slittamento dei blocchi. L'estrema compattezza materica ottenuta dalla superficie perfettamente planare restituisce astrattamente la continuità della roccia, così come evidenzia Antonino Giufré: «In esse nessuna astrazione geometrica è concessa dai massi le cui facce venivano lavorate in situ, e quindi né orizzontamenti né euritmie di giunti sono concepibili. I blocchi affiancati restituiscono idealmente la continuità della roccia originale, col solo artificio di ricostruire un contatto regolare dove

Una fase transitoria tra l'opera poligonale e l'opera quadrata è individuata nella variante autonoma dell'*opera poligonale trapezia*, considerata una logica consequenziale della pratica di regolarizzazione degli elementi lapidei e un espediente da parte dei cavaatori e dei lapidici per velocizzare le fasi esecutive.

L'opera quadrata, infine, rappresenta l'esempio più maturo di opera muraria, realizzata «con blocchi non equivalenti fra di loro, disposti a corsi orizzontali di diversa altezza»⁹⁵.

L'innovativa pratica sancisce l'inizio di una nuova ricerca che vede l'impiego di materiali durabili e facili da lavorare come il poros del calcare, e materiali litici nobili e raffinati come il marmo. Come afferma Roland Martin: «si manifestano le prime ricerche degli artigiani, che pervengono a dominare i materiali nobili, il marmo e i calcari; diviene allora possibile ampliare e accrescere i piani e i volumi per meglio adattarli alla funzione dell'edificio. Nel corso del VII secolo il principale progresso, ricco di conseguenze, consiste nell'introduzione nei cantieri di costruzione della pietra tagliata, che si sostituisce progressivamente ai materiali "poveri", il legno, il mattone e la terra, la mistura di argilla,

sassi e paglia, il pietrisco grossolano. Le lezioni apprese dagli scultori sono venute ad alimentare le sollecitazioni provocate dalla scoperta dell'architettura dei paesi vicini, della Siria-Fenicia, dell'Egitto; a contatto con le officine di scultori si formano i tagliatori di pietre, la cui abilità è la condizione prima di tutte le grandi opere dell'architettura di greca. Ai pilastri di legno si sostituiscono i fusti slanciati delle colonne di pietra, ai rivestimenti di tavole alle estremità e agli angoli dei muri subentrano pilastri d'anta e catenature di grandi blocchi e i basamenti di pietra grezza dei muri di mattoni lasciano il posto alle grandi ortostate sormontate da assise di blocchi di poros tenero, tagliati ad imitazione dei mattoni (di cui conservano addirittura il nome); infine gli elementi di legno e di terracotta del tetto vengono sostituiti senza difficoltà e senza forzatura da elementi litici. Così alla fine del VII secolo vediamo affermarsi le risorse d'una tecnica che libera e affranca lo spirito creatore, consentendogli di dare maggiore vitalità ai tentativi e ai brancolamenti che già si manifestano nelle conquiste importanti realizzate a partire dalla metà dell'VIII secolo in diverse parti del mondo greco, e particolarmente a Creta e nelle Cicladi»⁹⁶.

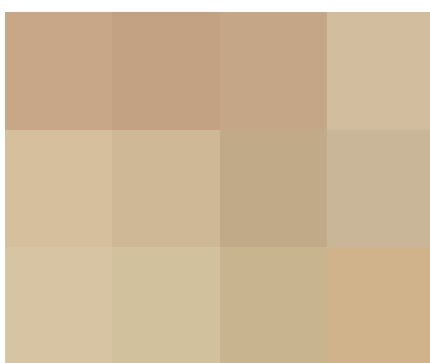


84

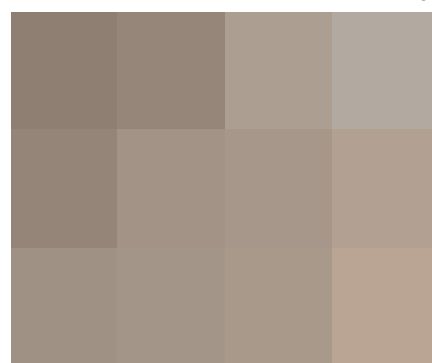
Nel corso del VII e del VI secolo a.C., l'architettura ellenica raggiunge il livello più alto di perfezione tecnica e raffinatezza estetica, in un connubio armonico, tra forma, estetica e costruzione.

Questo processo di "litizzazione", però, interesserà quasi esclusivamente l'architettura monumentale sacra meglio rappresentata dalla *cella* posta ad accogliere la statua della divinità (fig.84).

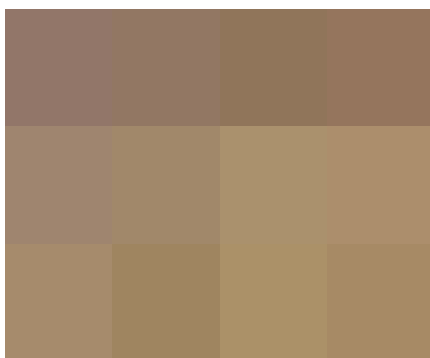
Nelle opere meno celebrative, invece, i blocchi sono messi in opera con la faccia grezza di cava, o comunque con lavorazioni di "spianatura" meno accurate che anticipa le tradizionali lavorazioni della pietra: bugnatura, martellinatura, lisciatura con pulimento rilucente, spianamento dei margini, etc. (figg.85-88).



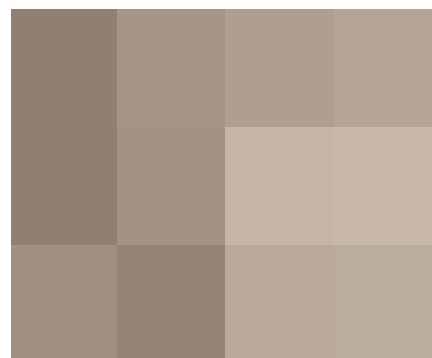
85



87



86



88

L'antica stratigrafia in mattoni crudi, lascerà spazio alla pietra e poi al marmo (di Paro, del monte Pentelico, per citarne alcuni) che caratterizzerà l'intero involucro: dal basamento alle colonne, dalla trabeazione al coronamento di copertura, il cui scopo è l'enfatizzazione della visione stereotomica/tettonica e della tensione spaziale volumetrica.

L'opera quadrata, nella sua accezione convenzionale di apparecchiatura *isòdoma* (apparecchiatura muraria in blocchi di dimensione uguale a giunti sfalsati) e *pseudoisòdoma* (apparecchiatura muraria in blocchi regolari di uguale lunghezza e profondità, ma contrassegnati da una differente altezza), si svilupperà in tutto l'orizzonte della *koinè* ellenica, ponendosi come stereotipo di tutta l'architettura greca.

Dalla fine del IV secolo a.C., l'architettura ellenica consolida e preserva i materiali e le tecniche costruttive tipiche. La posa a secco dei blocchi di marmo si consolida prevalentemente nell'architettura monumentale, in espedienti sempre più spinti in un sicuro esercizio statico, migliorato in alcuni casi con l'integrazione tra un concio e l'altro di ancoraggi metallici come grappe o elementi di ferro solidarizzati con il piombo (fig.89).

Sempre nella tradizione costruttiva ellenica, si sviluppa a partire già dall'epoca arcaica, un procedimento composito dell'opera muraria, noto con il nome di *émplekton* (dal greco antico: ἐμπλεκτον), ovvero una tipologia di struttura muraria con riempimento, rammentata da Vitruvio: «*tal genere di fabbrica che avesse pezzi squadrate e politi alle facce esteriori,*

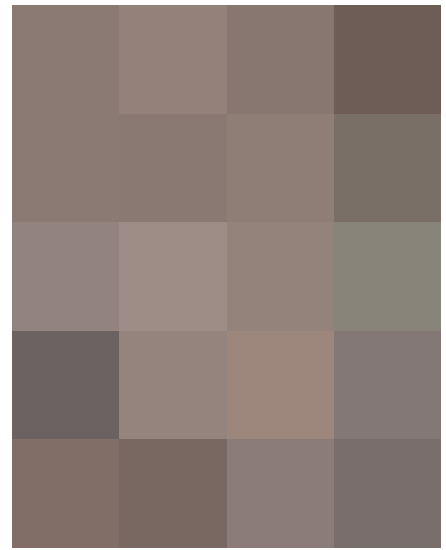
- 84. Sezione costruttiva in elementi litici del Partenone dell'Acropoli di Atene.
- 85. Nella pagina precedente: lavorazioni superficiali dei blocchi di pietra calcarea delle Mura Timoleontee (IV secolo a.C.) di Capo Soprano a Gela, Sicilia.
- 86. Nella pagina precedente: lavorazioni superficiali dei blocchi bugnati di pietra calcarea delle Mura urbiche di Selinunte (V-III secolo a.C.), Selinunte, Sicilia.
- 87. Nella pagina precedente: lavorazioni superficiali dei blocchi con tenoni di pietra calcarea del sito archeologico di Delfi (IV secolo a.C.), © Alfonso Acocella.
- 88. Nella pagina precedente: lavorazioni superficiali dei blocchi con tenoni di pietra calcarea dei Propilei dell'Acropoli di Atene (V secolo a.C.), © Alfonso Acocella.
- 89. Tipologie di connessioni metalliche di blocchi lapidei, in Rondelet G., *Trattato Teorico e pratico dell'arte di edificare*, planches XIV, Stabilimento tipografico di Francesco del Vecchio, Napoli, 1840.



e nel complesso interno fosse tutta infarcita di pietre e cemento alla rinfusa, di qualunque natura»⁹⁷. Al contrario, Plinio il Vecchio definiva nel libro *Historia naturale*, la muratura riempita riferendosi alle *murature formacee* in terra cruda «costrutti a guisa di forma tra due tavolati, e nello interno riempiti collo stesso metodo. La differenza tra lo *emplecton* ed il muro formaceo consiste che il primo aveva lo esterno rivestimento di pezzi lavorati, e che il secondo rimane dopo la costruzione colle facce scabre che vi lascia il tavolato, ma il metodo d'infarcirne l'interno complesso è comune ad entrambi. [...] Per questa ultima parte lo stesso Plinio afferma che a suoi tempi esistevano in Spagna ed in Africa torri e costruzioni formacee, fattevi da Annibale, [...] tuttora all'impiedi dopo il lasso di più di sei secoli»⁹⁸. La muratura mista della tipologia *emplekton*, quindi, è formata da blocchi regolari di pietra con la funzione di creare una doppia pelle con intercapedine, riempita di

materiali di scarto (elementi lapidei, terra, argilla, pietrisco, etc.) (fig.90). La particolare tecnica costruttiva sarà utilizzata anche dalle popolazioni preromane, in cui lo stesso Vitruvio paragonandola alla tecnica dell'*opus incertum* e *reticulatum*, afferma che: «l'*emplecton*, cioè riempito, dice essere una delle maniere che a' suoi tempi tenevano i Greci, quando non costruivano con grandi pietre da taglio; ma che era adoperata anche dai villici romani. In essa murarsi regolarmente le facce esteriori e riempirsi il di dentro con pietre come si trovavano, alternandole con calcina; il che dai Greci, che mettevano le pietre per piano, veniva fatto con maggiore accorgimento e con migliore effetto»⁹⁹.

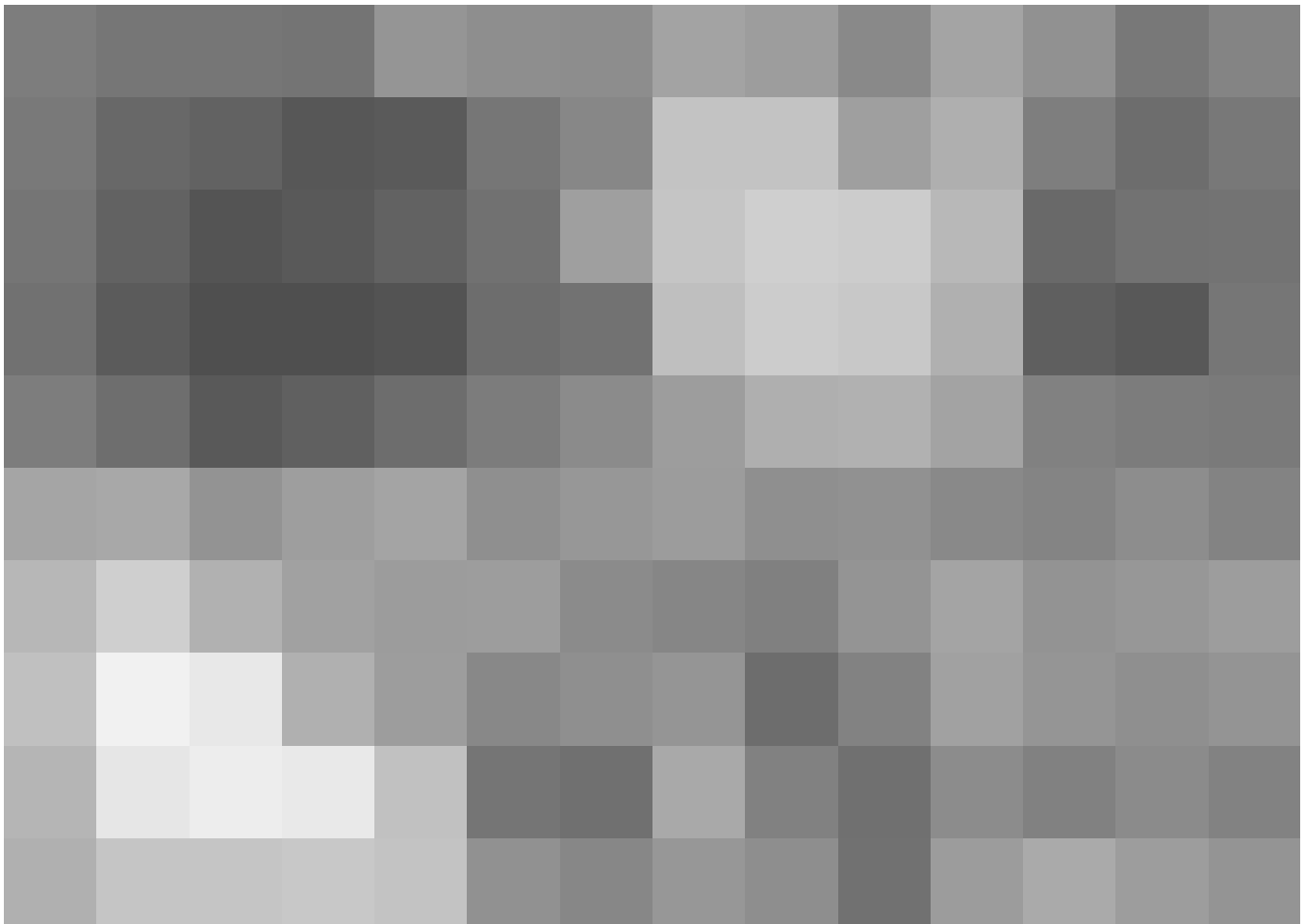
A riprova delle tesi di Vitruvio è la rappresentazione enfatizzata delle murature di contenimento dei terrazzamenti e delle fortificazioni della città di Cori (XIII-XII secolo a.C.) nel Lazio (fig.91) opera di Giovanni Battista Piranesi (Mogliano Veneto, 1720



90

90. Muratura mista della tipologia *emplekton* (dal greco antico: ἐμπλεκτον), della polis magno-greca di Elea (in greco antico: Ἐλέα), denominata in epoca romana Velia, © Alfonso Acocella.

91. Giovanni Battista Piranesi, Rovine delle antiche fortificazioni del monte e della città di Cora. Calcografia; Fondo Piranesi; volume 9PIR, Firmin Didot Frères, Parigi, 1763.



91

– Roma, 1778), in cui con l'effetto del *trompe-l'oeil* della carta srotolata descrive le costruzioni interne in opera poligonale, in opera incerta e con la tecnica dell'*émplectron*.

Di questa particolare tipologia di muratura sono presenti due varianti: l'*émplectron semplice* e l'*émplectron con diatoni* (dal greco διάτονος, "che si estende attraverso"). Quest'ultima tipologia risulta maggiormente resistente, in quanto i due paramenti murari sono concatenati reciprocamente mediante l'inserimento di blocchi lapidei trasversali della lunghezza uguale allo spessore della muratura.

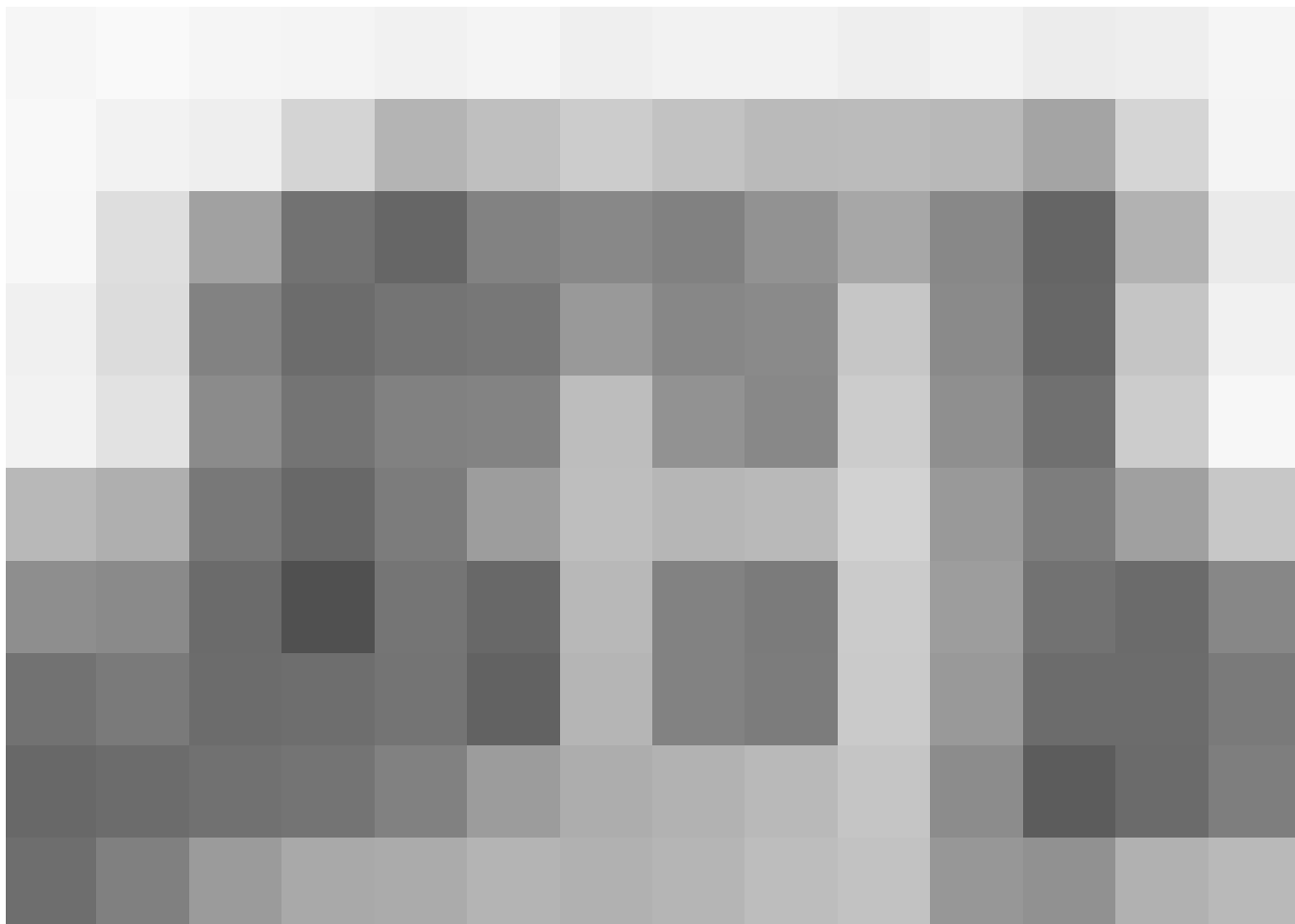
L'espedito messo in atto dalle antiche popolazioni elleniche e preromane ha contribuito a migliorare questo sistema massivo dal punto di vista della resistenza meccanica (a compressione) sostituendo il tipico riempimento inerte in una miscela di calce spenta, inerti fini (sabbia) e aggregati (pietre, laterizi,

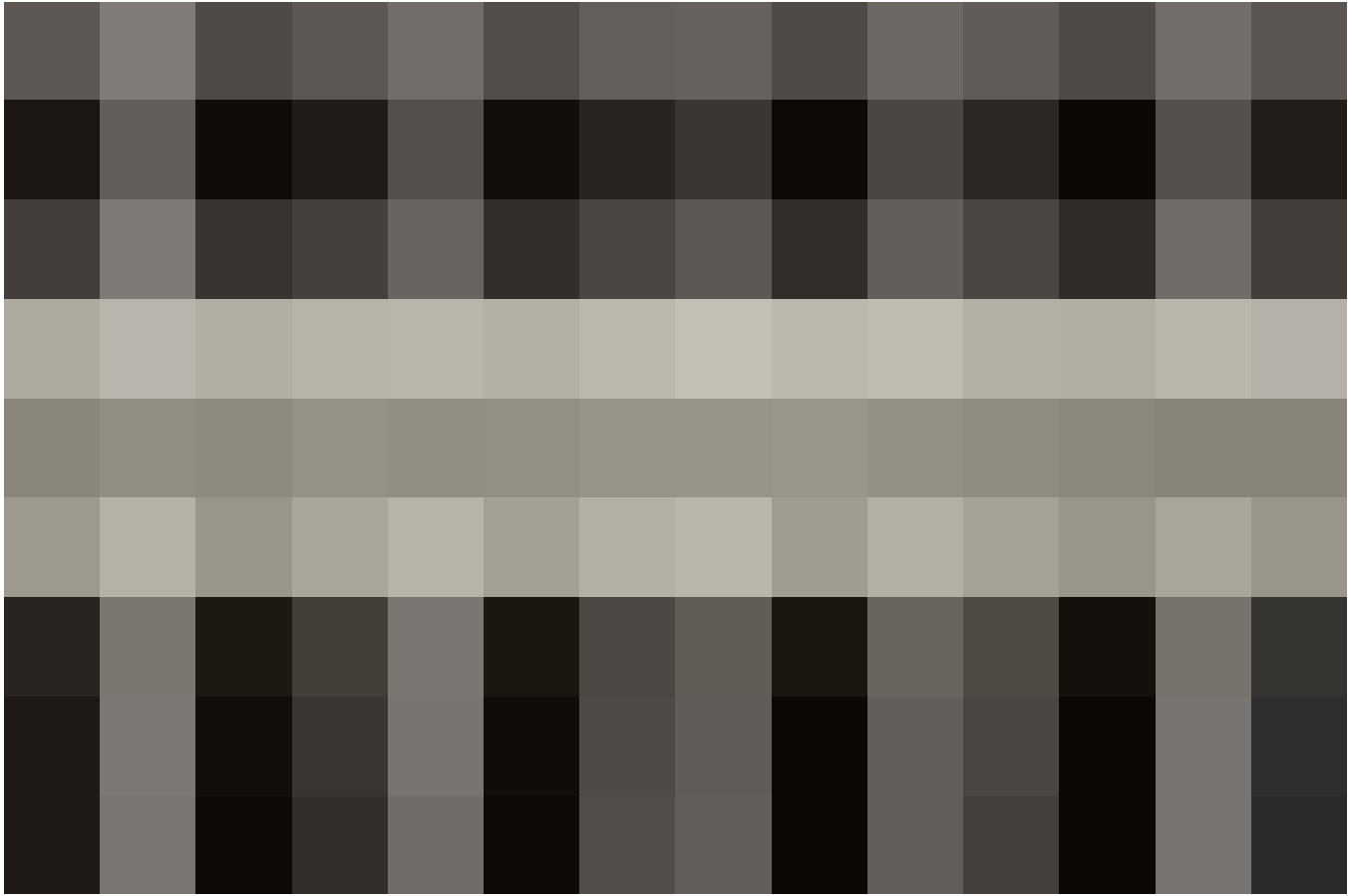
etc.), ponendosi come prima forma pionieristica di impiego della malta cementizia, *fundamentum* dell'*ars costruendi* della civiltà romana nella preparazione della malta (*opus caementicium*), che andrà a modificare sostanzialmente la concezione strutturale dell'opera muraria.

La costruzione muraria in terra cruda

L'architettura greca, prima, e l'architettura romana, dopo, sono rappresentate per antonomasia come perfette e sublimi opere di pietra e di marmo. Tale visione stereotipata può senza dubbio ritenersi raggiunta nei periodi di maggiore prosperità delle rispettive civiltà, quando l'architettura ellenica e romana pervengono a livelli di assoluta perfezione tecnica e raffinatezza estetica. Questi requisiti sono imputabili a quell'architettura monumentale, religiosa e politica, mentre l'architettura cosiddetta 'minore' presentava stili e caratteri costruttivi molto più rudimentali ed elementari (fig.92).

92. Architetture 'minori' realizzate in terra cruda, in Rondelet G., *Trattato Teorico e pratico dell'arte di edificare*, planches V, Stabilimento tipografico di Francesco del Vecchio, Napoli, 1840.





93

Gli edifici greci di minore importanza (e successivamente anche quelli romani) sono costruiti in legno, argilla cruda battuta e basamenti composti da aggregati di pietrame (e più raramente in blocchi grossolanamente squadrati o parallelepipedi). Tale soluzione, più economica e semplice da realizzare rappresenta l'origine del paradigma dell'opera stereometrica, composta da un basamento in pietra (con la funzione di fondazione e isolamento dal terreno e dall'umidità) e da uno spiccato di muratura in mattoni di argilla cruda, completato dalla struttura lignea della copertura. L'utilizzo di tale sistema verrà estesa successivamente anche all'architettura maggiore a causa dell'espansione urbana delle città e dello sviluppo di nuove varietà e tipologie urbane, quali ginnasi, palestre, mercati, strutture amministrative e commerciali e - nel caso della civiltà ellenistica - delle *stoà* (in greco antico: *στοά*, *stoá*, dal verbo *ἵστημι*, "*collocare*"), architetture pubbliche costituite da passaggi coperti o porticati realizzati con colonnati in pietra (figg.93-94).



94

93. Nella pagina precedente: ricostruzione del porticato colonnato della Stoà di Attalo (II secolo a.C.) dell'agorà di Atene, opera della Scuola Americana di studi classici di Atene (1951), in www.dattilioteca.it.

94. Nella pagina precedente: ricostruzione del porticato colonnato della Stoà di Attalo (II secolo a.C.) dell'agorà di Atene e particolare della muratura originale in terra cruda, opera della Scuola Americana di studi classici di Atene (1951), in www.dattilioteca.it.

95. Produzione di mattoni in terra cruda con l'ausilio di stampi.

96. Mattoni in terra cruda ottenuti con la tecnica dell'adobe.

97. Terra armata.

98. Struttura a graticcio in terra cruda.

I modi di impiego della terra cruda a scopi costruttivi sono molto vari e affinati nel tempo. Alcune tipologie sono:

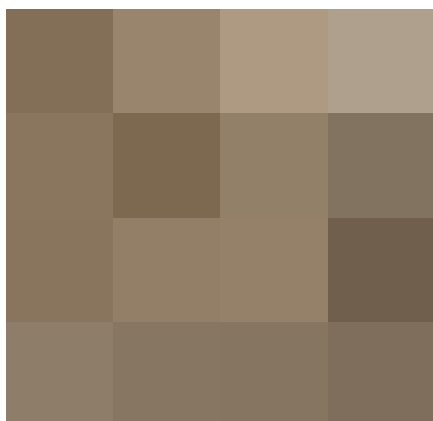
- *terra cruda usata direttamente allo stato solido*: tipico delle costruzioni troglodite ottenute scavando una parete di terra;
- *blocchi di terra tagliati a zolle*: utilizzati per le opere murarie come elementi modulari in terra mista a radici ed erba;
- *terra e acqua (stato liquido)*: la terra, di consistenza liquida poteva essere colata direttamente nella cassaforma oppure colata in apposite forme/stampi a formare mattoni o altri elementi (fig.95);
- *terra e acqua (stato plastico) e tecnica dell'adobe*: l'impasto plastico è utilizzato per la produzione di mattoni essiccati al sole (fig.96). La tecnica, chiamata *adobe* (che in arabo significa "cotto") ha un'importante peculiarità termica che gli permette

di mantenere il calore durante l'inverno e rilasciarlo durante l'estate, mantenendo una temperatura mite in tutte le stagioni;

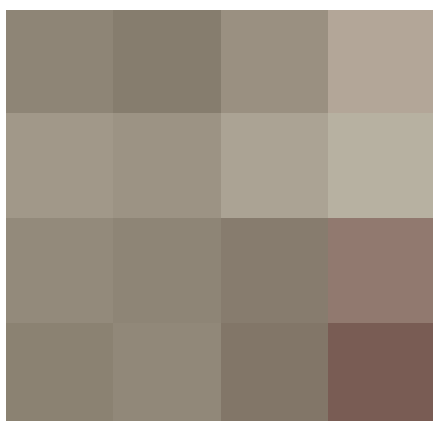
- *terra armata*: la terra allo stato plastico veniva anticamente armata con rami o canne intrecciate (fig.97), oppure impiegata per la realizzazione dei tamponamenti di strutture a telaio ligneo (graticcio) (fig.98);
- *terra allo stato secco (tecnica pisè o della terra battuta)*: per la creazione di un'opera muraria con questa tecnica è essenziale che le particelle di terra siano il più possibile costipate affinché ci sia una buona consistenza del materiale. Il materiale allo stato secco (o leggermente umido) viene, quindi, versato in apposite casseforme lignee e costipato con apposite aste lignee. L'energia cinetica che viene così investita nel sistema permette alle particelle di scorrere le une sulle



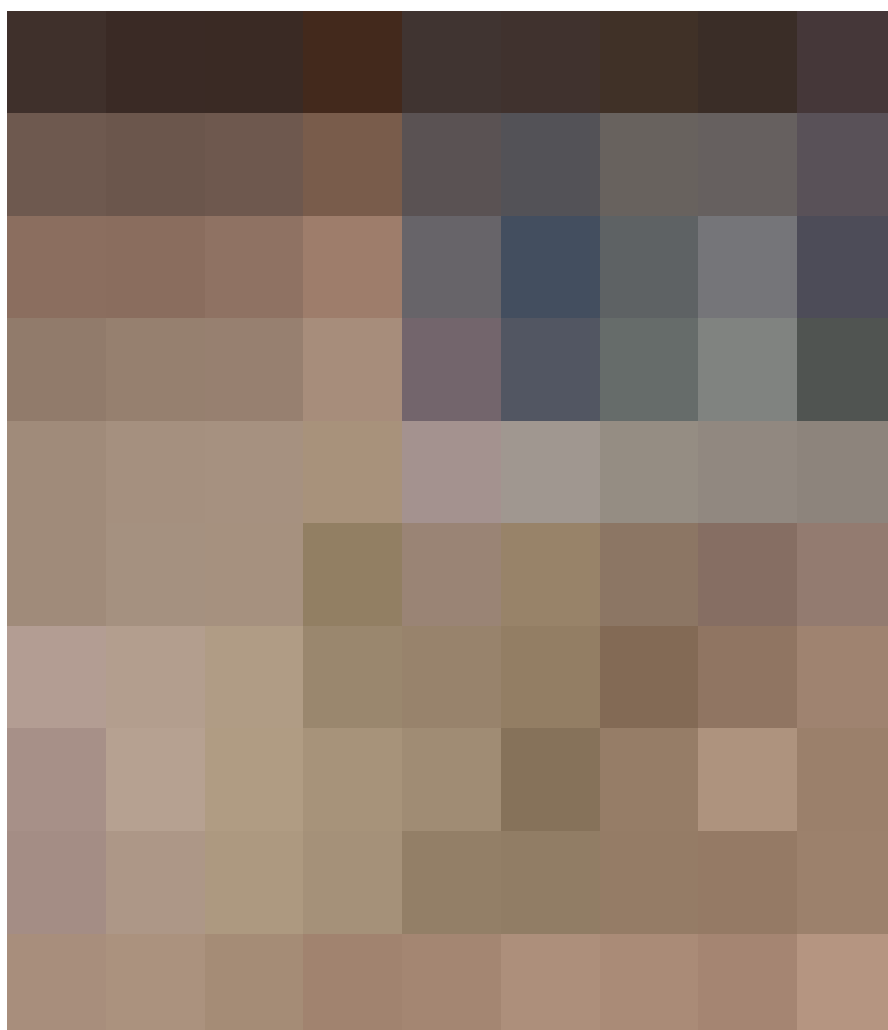
95



96



97



98

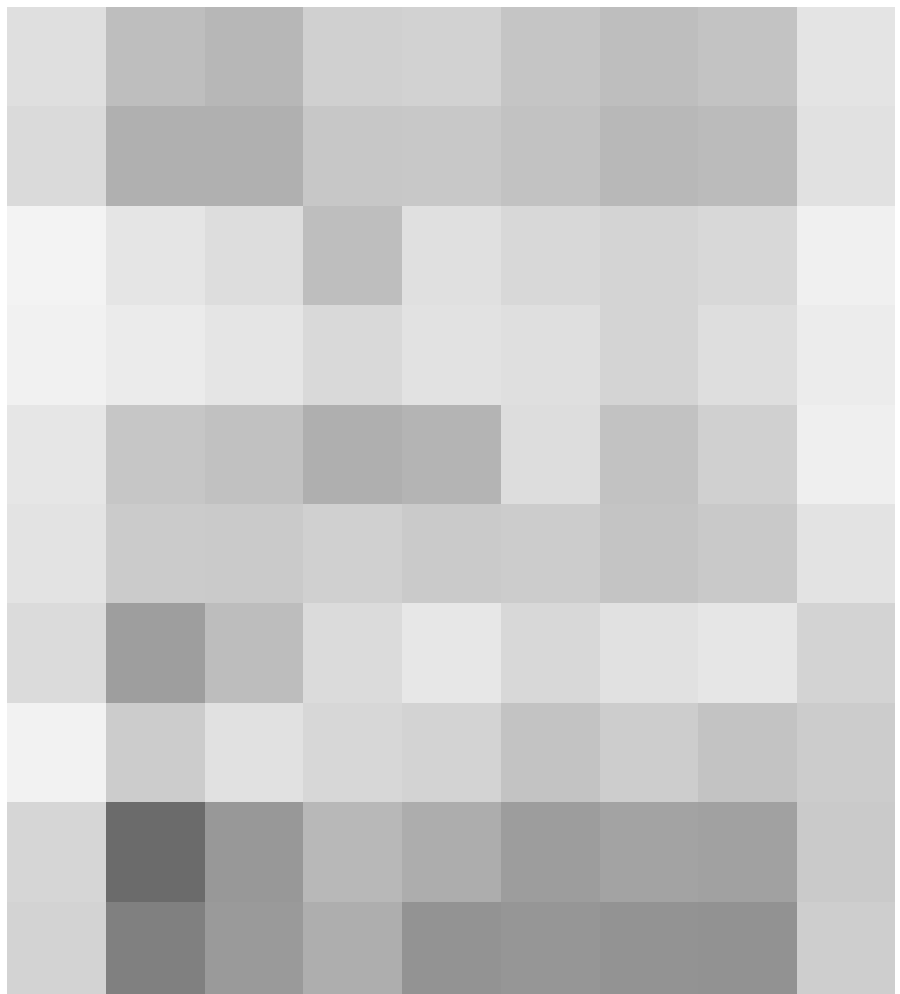


99

altre e di compattarsi in modo da aumentare la superficie di contatto, su cui si sviluppano le forze di attrazione che tengono insieme il blocco (figg.99-100). Questo sistema che dai francesi viene chiamato "pisè" è stato adottato in passato anche in Italia, soprattutto in quelle regioni dove la terra naturalmente possiede le caratteristiche granulometriche ottimali per tale impiego. Il sistema è facilmente riconoscibile in quanto le superfici murarie presentano i segni orizzontali dovuti al processo di costipamento intervallate dai fori del cassero¹⁰⁰ (figg.101-102).



101



100



Il sistema stereometrico murario romano e l'introduzione della malta

Mentre nella penisola ellenica si è raggiunto una codificazione dei sistemi costruttivi, tra tecniche murarie e armoniosi propilei marmorei, nelle fertili regioni proiettate sul golfo greco-sannitico di Napoli, i precetti ellenistici trasferiscono alla popolazione locale nuovi impulsi nella sperimentazione e innovazione tecnologica del sistema muratura, facendo della futura civiltà romana la vera interprete dell'opera muraria a concrezione (fig.103),

Già a partire dal III secolo a.C., nell'area compresa tra Capua, Cumae, Neapolis, Baia e i Campi Flegrei di Pozzuoli verrà scoperto e subito impiegato un materiale che entrerà a far parte, insieme alla calce, della futura *Ars Aedificandi* osco-italica e romana: la *pozzolana*. Dal latino *pulvis puteolanus* o *harena fossicia*¹⁰¹, si tratta di un sedimento litico di derivazione piroclastica costituita da lapilli e ceneri raffreddati velocemente e cementati a contatto con l'aria dopo l'emissione vulcanica, per azione degli agenti atmosferici, con la formazione dell'allumina (Al_2O_3) e della silice (SiO_2), un ossido insolubile in acqua, ma capace di reagire in presenza della calce idrata e di acqua formando il silicato idrato di calcio (*tobermorite*), che favorisce la presa. Vitruvio, nel capitolo relativo alla pozzolana, ne fissa la varietà: nera, grigia, rossa e *carbunculus* (definita da G. Lugli nel 1957, "*carbuncino*")¹⁰² (fig.104), anche se, come rileva il Ventriglia, vi è inadeguatezza della distinzione delle pozzolane basate sul colore, in quanto la composizione chimica e mineralogica delle pozzolane laziali-campane è



103

costante¹⁰³. Sempre il Ventriglia, schematizza alcuni dati sulla composizione chimico-mineralogica e sulle caratteristiche tecniche delle diverse varietà di pozzolana prelevate a Roma e riassunti come:

- *pozzolana inferiore o rossa*: con un peso unità di volume naturale compreso tra 1,6 e 1,9 gr/m³;
- *pozzolana media o nera*: con un peso unità di volume naturale di 1,34 gr/m³, un peso unità di volume secco di 1,21 gr/m³, umidità naturale del 10,7%, un peso specifico in granuli del 2,6%, una porosità del 53% ed un indice dei vuoti di 1,10;
- *pozzolana superiore o grigia*: con un peso unità di volume naturale compreso tra 1,36 e 1,67 gr/m³, un peso unità di volume secco compreso tra 1,28 e 1,68 gr/m³, una porosità tra il 42 ed il 51% ed un indice dei vuoti compreso tra 0,92 e 1,10.

99. Nelle pagine precedenti: tecnica costruttiva del *pisé* (o della terra battuta), in Rondelet G., *Trattato Teorico e pratico dell'arte di edificare*, planches IV, Stabilimento tipografico di Francesco del Vecchio, Napoli, 1840.

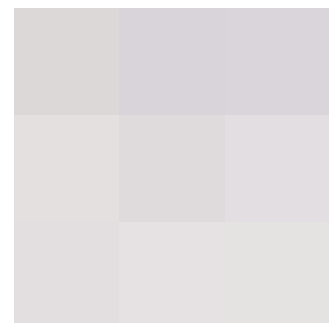
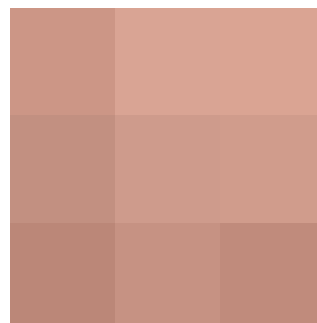
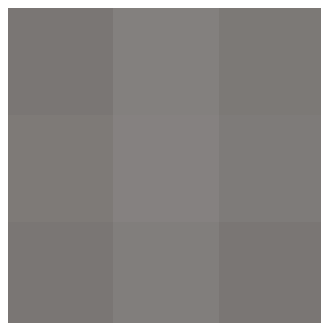
100. Nelle pagine precedenti: incisione su rame rappresentate la tecnica del *pisé* (o della terra battuta), 1807.

101. Nelle pagine precedenti: muratura ottenuta con la tecnica del *pisé*.

102. Nella pagina precedente: muratura ottenuta con la tecnica del *pisé*, in www.sitterwerk.ch.

103. Antica opera muraria a concrezione della civiltà romana.

104. Varietà di pozzolana (*pulvis puteolanus* o *harena fossicia*) secondo Marco Vitruvio Pollione nel *De Architectura*, Libro II, IV.



104



105

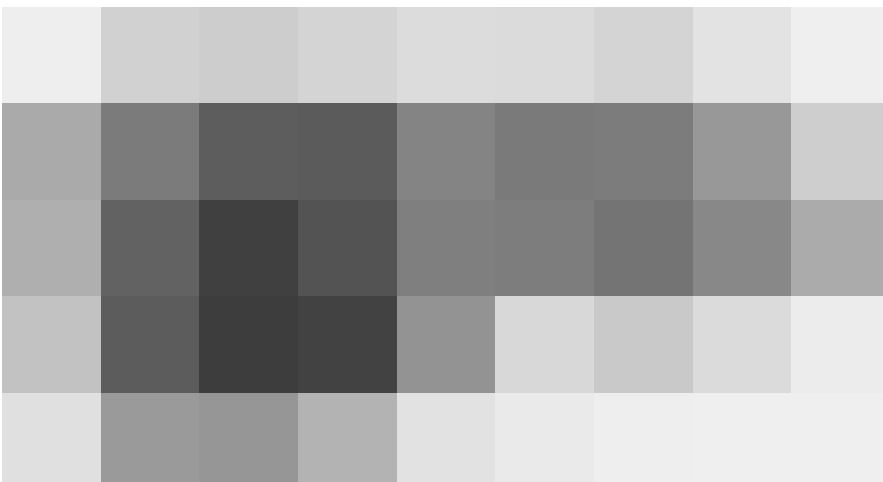
105. Foro di Paestum, realizzato dopo il 273 a.C. quando la città ellenica cadde sotto l'orbita romana, tra le prime ad adottare i nuovi sistemi costruttivi per la realizzazione di opere murarie in opus caementicium.

106. Giovanni Battista Piranesi, *Dimostrazione degli avanzi del Portico fabbricato da M. Emilio Lepido e P. Emilio Paolo fuori della Porta Trigemina nell'Emporio alla riva del Tevere*, in *Le Antichità Romane*, Tomo IV, tavola XLVIII, Firmin Didot Frères, Parigi, 1763.

«Seguono precise descrizioni delle caratteristiche delle malte a base di pozzolana e a base di sabbia fluviale o marina: si leggono alcune note in particolare sui tempi di presa e d'indurimento, più veloci per la malta pozzolanica, che risulta più conveniente nella costruzione di una struttura muraria, poiché "consente una buona tenuta dell'intonaco e può reggere le volte, a condizione che sia di scavo recente»¹⁰⁴.

Il legante pozzolanico rappresenterà una componente fondamentale per la preparazione dell'*opera cementizia* (dal latino *opus caementicium*), il calcestruzzo romano che rivoluzionò le metodologie costruttive dell'antichità e che andrà a modificare la «concezione strutturale dell'opera muraria e con essa l'idea stessa di architettura ereditata dalla tradizione greca»¹⁰⁵.

L'*opus caementicium* rappresenterà la base evolutiva dell'opera muraria «sostituendo nei muri di pietre irregolari il più antico riempimento d'argilla; le sue qualità consentirono di fare a meno di allineare e adeguare con molta precisione i singoli blocchi, dal momento che la massa lega e tiene assieme il tutto. Questa fase è attestata da alcuni edifici d'uso del Foro di Paestum (fig.105) costruiti nel primo periodo della colonia romana, intorno alla metà del III secolo a.C. Assai presto seguì il passo evolutivo successivo, la scoperta della muratura a sacco. Piccole pietre maneggevoli vengono messe in opera fino a una certa altezza come una doppia cortina e quindi il loro interno viene colmato con una miscela di malta e pietrisco; si prosegue poi con l'erezione di un'altra fascia della cortina e così via. Nel realizzare le cortine, che Vitruvio definisce significativamente "ortostati", si curava che le commisure delle pietre piccole delineassero sui lati esterni in vista un bel motivo a reticolo, anche se casualmente non sistematico. Era nato l'*opus incertum*. Già a partire dal 193 a.C. a Roma fu costruito in questa nuova tecnica il grande magazzino del Porticus Aemilia sul Tevere (fig.106). Non è necessario descrivere qui in dettaglio la sua marcia trionfale in Campania e nel Lazio, che ne fece di fatto la tecnica costruttiva dominante del tardo ellenismo locale. L'*opus incertum* è solido e impermeabile; con esso si poteva costruire in altezza, velocemente e in grande, tutte caratteristiche queste che andavano incontro nella maniera migliore alle esigenze dei romani»¹⁰⁶.



106

Il successo che riscontra la nuova tecnica dell'*opus caementicium* sancisce il declino greco sia della visione architettonica e spaziale, sia della concezione costruttiva, a favore di una visione dilatata dello spazio basata su strutture di concrezione e nuove forme tipologiche e costruttive (fig.107). Gli antichi costruttori romani sperimentano nuovi fronti applicativi per gli stessi materiali lapidei, spesso accostati al laterizio e all'impiego della calce.

I Romani, inoltre, apprenderanno la tecnica dell'*anatròsi* (dal greco ἀναθρόω, *anathyróo*, cioè "rifinire") attraverso la lettura degli edifici costruiti in Magna Grecia. Si tratta di un procedimento di lavorazione della pietra con lo scopo di creare dei giunti perfetti tra gli elementi litici. In particolare le superfici di contatto dei blocchi (o di altri elementi litici da interconnettere) presentavano nell'area nucleare un leggero sottosquadro ottenuto con martellinatura, mentre la fascia



108

periferica veniva perfettamente levigata a *gradina fine*¹⁰⁷ con scalpello diritto, ottenendo una perfetta aderenza tra elementi¹⁰⁸ (fig.108). Tale tecnica viene impiegata successivamente anche per la lavorazione delle facce visibili dei blocchi, in modo particolare per la realizzazione di un nastro delimitante i bordi dei conci. Nasce così il *bugnato*.

107. Tipologie di tessiture murarie, in Rondellet G., *Trattato Teorico e pratico dell'arte di edificare*, planches IX, Stabilimento tipografico di Francesco del Vecchio, Napoli, 1840. Frères, Parigi, 1763.

108. Muratura del Tempio di Artemide, realizzata con blocchi litici lavorati con la tecnica dell'*anatròsi*, © Archaeological Exploration of Sardis/President and Fellows of Harvard College



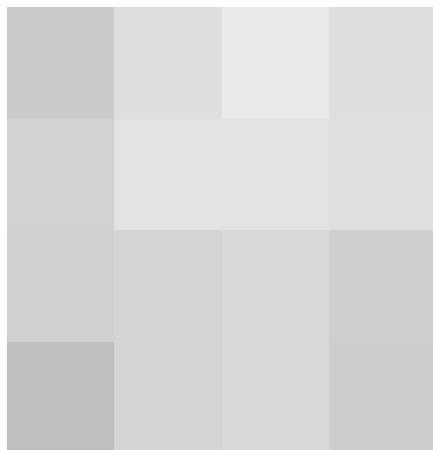
107

109. Tipologia di muratura bugnata ad Eleusi (VII secolo a.C.), in Martin R., Ginouves R., *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine*, tomo I, Ecole Française de Rome, Parigi, 1997, Planches 35.

110. Tipologia di muratura bugnata ad Atene (V secolo a.C.), *ibidem*.

111. Tipologia di muratura bugnata a Delo (V secolo a.C.), *ibidem*.

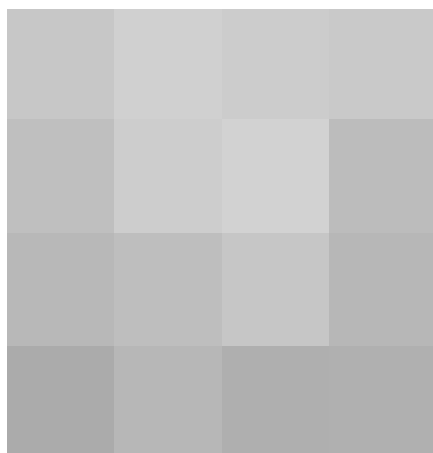
112. Tipologia di muratura bugnata a Pompei (I secolo d.C.), *ibidem*.



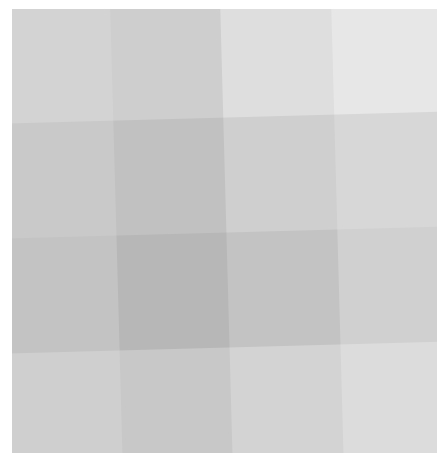
109



111



110



112

Nell'accezione più comune, il termine bugnato «*indica la predisposizione, all'interno di un'opera muraria stereotomica, di blocchi di pietra squadrata lasciati in forma rozza nella faccia a vista e lavorati lungo le linee delle rete murale (commesure), al fine di dar vita a solchi capaci di enfatizzare la superficie irregolare del paramento stesso*»¹⁰⁹ (figg.109-112). Il bugnato, quindi, rappresenterebbe una trattamento rustico della superficie lapidea a vista che formalizza astrattamente il modo con cui la pietra conservi le sue caratteristiche d'origine al momento dell'estrazione dalla cava. Il tema semantico del bugnato è stato affrontato già a partire dalla seconda metà del Settecento: Francesco Algarotti (Venezia, 1712 – Pisa, 1764), per esempio, pensava che le bugne rappresentassero la traduzione in pietra delle teste delle travi¹¹⁰; Francesco Milizia, invece, riteneva che il bugnato rievocasse il primitivo accatastamento dei tronchi d'albero¹¹¹; Quatremère de Quincy alludeva all'effetto tipico delle fortezze, tema ripreso da John Ruskin

(Londra, 1819 – Brantwood, 1900), prima e da Jacob Burckhardt (Basilea, 1818 – Basilea, 1897) successivamente affermando che «*quando le fortezze divennero palazzi, il cosiddetto bugnato finì per caratterizzare gli edifici nobili o pubblici*»¹¹². L'interpretazione più aulica e suggestiva sul tema del bugnato può essere fornita attraverso l'interpretazione dello scritto «*Forme nella materia*» di Henri Joseph Focillon (Digione, 1881 – New Haven, 1943): «*Nel momento in cui affrontiamo il problema della vita delle forme nella materia, noi non separiamo l'una nozione dall'altra, e, se pure ci serviamo dei due termini, non è allo scopo di dare una realtà obiettiva ad un procedimento d'astrazione, ma, anzi, è per mostrare il carattere costante, indissolubile, irriducibile d'un accordo di fatto. Così la forma non agisce come un principio superiore che modelli una massa passiva, giacché si può pur sostenere che la materia imponga la propria forma alla forma. Così pure non si tratta di materia e di forma in sé, ma di materie al plu-*

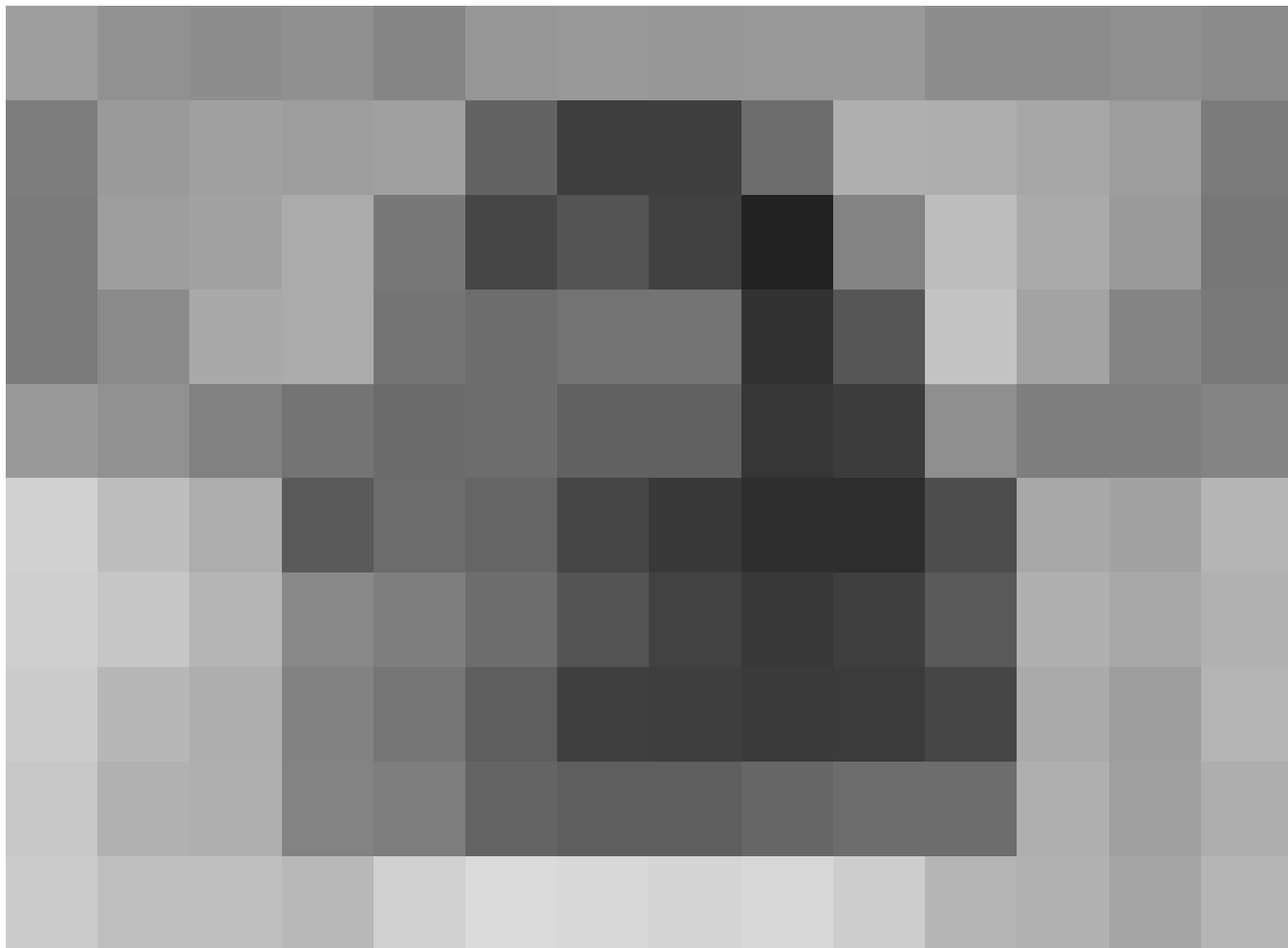
rale, numerose, complesse, cangianti, aventi un aspetto e un peso, sorte dalla natura, ma non naturali. Ma giova osservare subito che questa vocazione formale non è un determinismo cieco, poiché – e qui è il secondo punto – quelle materie così ben caratterizzate, così suggestive ed anche così esigenti, riguardo alle forme dell'arte sulle quali esercitano una specie di attrazione si trovano da queste di rimbalzo, profondamente modificate. Così si stabilisce un divorzio tra le materie dell'arte e le materie della natura, anche se unite da una rigorosa convenienza formale. S'assiste allo stabilirsi di un ordine nuovo. Sono due regni, anche se non intervengono gli artificieri e la fabbrica. Il legno della statua non è il legno dell'albero; il marmo scolpito non è più il marmo della miniera; l'oro fuso è un metallo inedito; il mattone, cotto e messo in opera, è senza rapporto con l'argilla di cava. I colori, l'epidermide, tutti i valori che agiscono otticamente sul sen-

so tattile, sono cambiati. Le cose senza superficie, nascoste dietro la scorza, interrate nella montagna, bloccate nella pepita, inglobate nella mota, si sono separate dal caos, hanno acquistato un'epidermide, aderito allo spazio ed accolto una luce che le lavora a sua volta. Anche se il trattamento subito non pure ha modificato l'equilibrio e il rapporto naturale delle parti, la vita apparente della materia s'è trasformata»¹¹³.

La forma grezza della pietra bugnata verrà accostata a partire dal IV secolo a.C. nella realizzazione di cinte murarie e fortificazioni. Con lo sviluppo della tecnica poliorcetica e il perfezionamento delle macchine d'assedio, la cortina muraria assumerà non solo un valore puramente difensivo, ma come afferma Hans Lauter: «si trattava anche e soprattutto di rappresentatività, dal momento che le mura urbiche in pietra suscitano un'impressione di robustezza ed imponenza»¹¹⁴ (fig.113).

113. Rappresentazione scultorea della colonna traiana recante l'assedio delle truppe dei Daci di Decebalò ai danni di una fortezza romana lungo il *limes moesicus* (Oescus o Ratiaria).





114

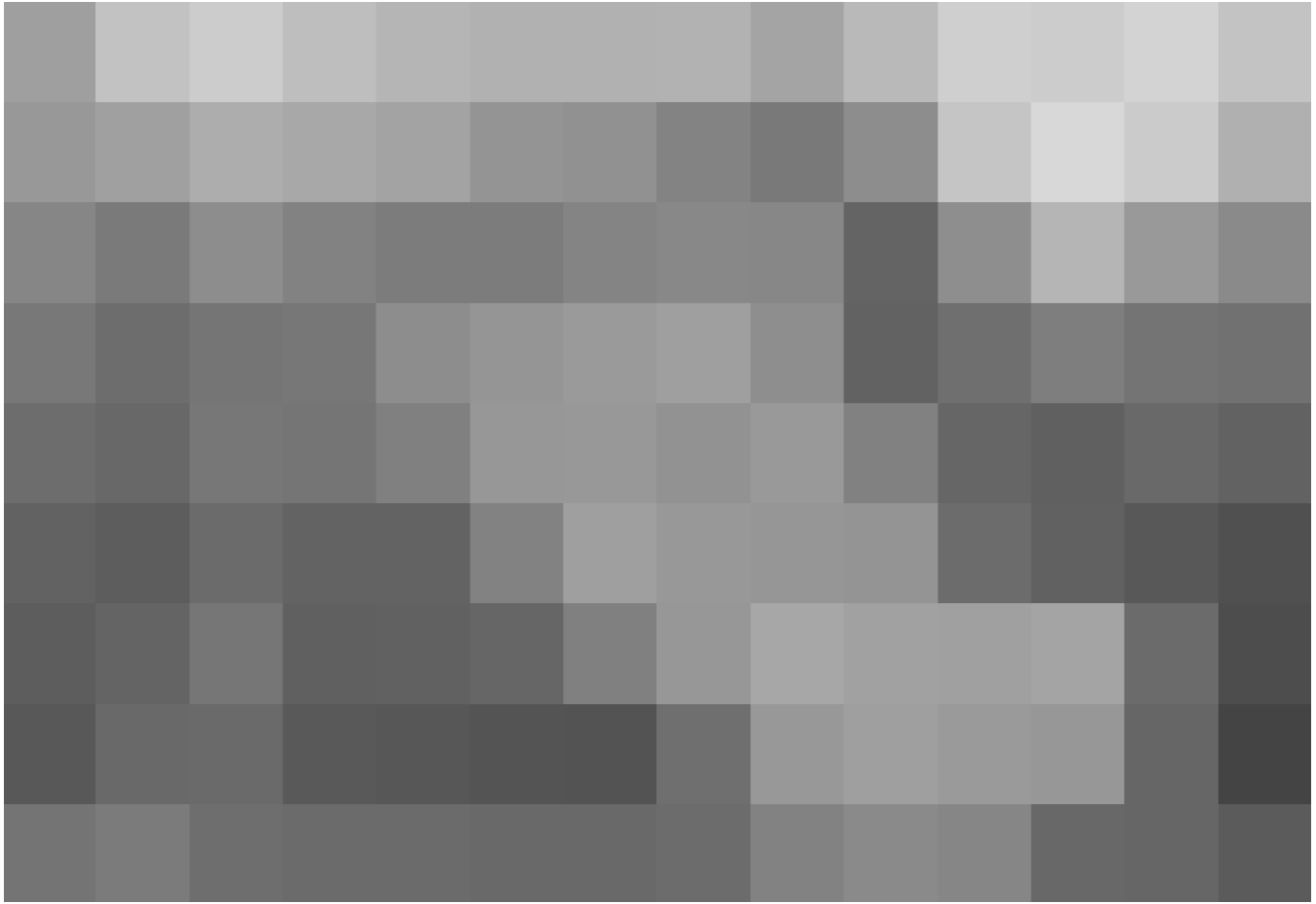
114. Giovanni Battista Piranesi, *Sezione di un Sepolcro sulla Via Appia*, in *Le Antichità Romane*, Tomo II, tavola XXXVII, Firmin Didot Frères, Parigi, 1763.

Dalle vestigia dell'assimilazione della codificazione stereometrica greca, lo sviluppo della muratura massiva romana si diffonde in numerose opere monumentali soprattutto con la nascita del principato augusteo - e del futuro *imperium* - avvenuto nel 27 a.C. dopo la sconfitta di Azio (31 a.C.) subita da Marco Antonio e Cleopatra per opera del futuro *primus inter pares*, *pater patriae* Ottaviano Augusto (Roma, 63 a.C. - Nola, 14).

La concezione costruttiva romana, soprattutto quella di età imperiale è fortemente stratigrafica ed illusiva in quanto molto spesso, il piano marmoreo esterno non corrisponde alla struttura portante, realizzata con opera a concrezione od *opus caementicium*. Si tratta, quindi, del primo esempio nella storia delle costruzioni di separazione tra struttura portante e involucro o rivestimento. Numerose testimonianze archeologiche ci hanno restituito esem-

pi di lastre marmoree policrome utilizzate - mediante sistemi di placcaggio metallico - come masselli litici o lastre di rivestimento, solidarizzati al dispositivo murario.

Sono numerosi gli esempi giunti sino ai nostri giorni, salvati dal processo sistemico di spoliazione dei marmi durante il Medioevo, molti dei quali presenti a Roma, definita una cava a cielo aperto per la ricchezza dei suoi marmi. Molte di queste testimonianze sono rappresentate dai templi e dai sepolcri, come il Tempio rotondo del Foro Boario, il Tempio del Divo Giulio nel Foro romano, il tempio di Venere Genitrice, il Tempio di Marte nel Foro di Augusto, i Templi di Augusto a Pola e a Terracina e un sepolcro - sulla via Appia - inciso da Piranesi nel 1756, in cui è possibile leggere in sezione la struttura muraria costituita da masselli di marmo ancorati meccanicamente tra loro con ancoraggi metallici (fig.114).



115

Sempre del Piranesi è l'incisione dell'importante dispositivo murario in blocchi isodomi di travertino del Sepolcro di Cecilia Metella realizzato tra il 30 ed il 20 a.C. (fig.115), lungo la via Appia a Roma nella località "Capo di Bove", chiamata così per la presenza dei fregi sulla tomba (fig.116). L'opera è ancora oggi fra i monumenti più rappresentativi dell'intero parco. L'architetto fornisce graficamente una personale interpretazione del sistema di ancoraggio, sollevamento (attraverso innovative macchine come gru, biga con paranco e argano, il *trispastos*¹¹⁵, etc.) e posa in opera dei blocchi di travertino impiegati per la costruzione del sepolcro (fig.117).

Un altro significativo esempio di rivestimento in blocchi di litici della muratura laterocementizia è rintracciabile nella città di Ostia Antica. Oltre al rivestimento in lastre di marmo policromo (presente nel *Calidarium* delle Terme del Foro o in alcune *domus*) (fig.118) è possibile cogliere anche la particolare tecnica



116



117

115. Nella pagina precedente: Giovanni Battista Piranesi, *Porzione della facciata del sepolcro di Cecilia Metella*, in *Le Antichità Romane*, Tomo III, tavola LIII, Firmin Didot Frères, Parigi, 1763.

116. Nella pagina precedente: dettaglio dei fregi in marmo pentelico del Sepolcro di Cecilia Metella a Roma, composti da abbellimenti floreali alternati a capi di bove (crani di bue o bucrani) e appena sopra il titulus alcuni trofei d'armi che rammentavano al viandante le imprese belliche della famiglia, in www.bandb-rome.it.

117. Giovanni Battista Piranesi, *Fasi di costruzione della muratura del sepolcro di Cecilia Metella*, in *Le Antichità Romane*, Tomo III, tavola LIII, Firmin Didot Frères, Parigi, 1763.

118. Rivestimento in lastre di marmo policromo delle pareti di una domus presso la città antica di Ostia.

119. Rivestimento con intonaco in una delle insulae di Ostia, in www.ostia-foundation.org.



118

dei rivestimenti parietali con intonaci e stucchi (fig.119) che consisteva, come afferma Vitruvio in sette strati decrescenti: *rinzaſſo* (con funzione di aderenza al supporto, preventivamente inciso con la cazzuola), tre strati di *arenatum* (calce e sabbia poco porosa e priva di frazioni limo-argillose) ed una serie di strati di *marmoratum* (calce e polvere di marmo) o di *albarium* (calce pura)¹¹⁶. Ostia, inoltre, rappresenta un pa-



119

linesto completo dell'architettura minore e dei caratteri costruttivi dell'edilizia romana, a partire dall'elemento base per la costruzione stereotomica romana: il mattone.

I mattoni romani sono di quattro tipologie standard, relazionati al piede romano, unità di misura base (29,6 cm) e con spessori compresi tra 3,5 e 4,5 cm (figg.120-121):

- *bipedales (bipedali)*: laterizi quadrati di due piedi di lato (59,2 cm), che potevano essere suddivisi in nove quadrati (di lato 19,7 cm) o in diciotto triangoli, con il lato lungo di 27,8 cm;
- *bessales (bessali)*: laterizi quadrati con il lato pari a due terzi del piede romano (19,7 cm), che potevano essere suddivisi due o quattro triangoli;
- *sesquipedales (sequipedali)*: laterizi quadrati di un piede e mezzo di lato (44,4 cm) che potevano essere suddivisi in quattro o in otto triangoli: nel primo caso il lato a vista conserva la dimen-

sione di 44,4 cm, nel secondo caso, invece, è pari a 31,4 cm.;

- *pedales, (pedali)*: tipologia utilizzata raramente di un piede di lato (29,6 cm)¹¹⁷.

I *bessales*, e frequentemente i *sesquipedales*, sono ottenuti per mezzo di strumenti metallici (sega, martellina, etc) mediante battitura o segazione lungo i solchi diagonali (eseguiti sul mattone crudo prima della cottura) per ricavare elementi triangolari impiegati nella successiva formazione delle cortine murarie in *opus testaceum* (o *opus latericium*), mentre i *bipedales*, sono utilizzati interi più raramente nelle murature o dimezzati in due rettangoli. «La consuetudine di fabbricare mattoni quadrati per poi usarli prevalentemente in sottomultipli, ottenuti "a rottura" con lente operazioni manuali in cantiere, può apparire come un'incongruenza, che – a ben riflettere – è solo apparente. Tale procedimento è giustificato da molteplici vantaggi sia di tipo produttivo (il quadrato, in virtù dell'equivalenza dei lati, comporta minori deformazioni in fase di essiccazione e di cottura dei prodotti laterizi), sia di tipo logistico (legati al più facile trasporto e al più razionale immagazzinamento in fornace e in cantiere), sia di tipo costruttivo (per specifica funzionalità applicativa nell'*opus testaceum* e maggiore presa con la malta nella fase di posa in opera)»¹¹⁸.

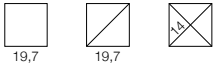
La forma primordiale della tecnica dell'*opus testaceum* (*opus latericium*) era ottenuta mediante la giustapposizione di laterizi di coppi e tegole rotti legati tra loro con la malta. In epoca imperiale si iniziarono quindi a produrre laterizi in forme standardizzate con la presenza di solchi diagonali od ortogonali, per favorire l'ottenimento di sottomultipli di forma quadrata a o triangolare. Solitamente il lato lungo (a vista) dell'elemento triangolare veniva rilavorato e levigato. Tale tecnica è una tra le tante tipologie di opere per la realizzazione di murature, evolute in parallelo con lo sviluppo delle tecniche di costruzione degli antichi romani (fig.122).

120. Abaco dei mattoni di laterizio romano, elaborazione grafica tratta da Adam J.P., *Roman Building: Materials and Techniques*, Routledge, Londra, 1994.

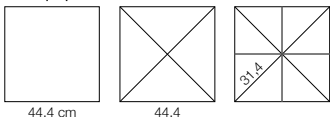
121. Mattoni con solchi diagonali praticati prima della cottura. Foro di Scolacium, © Alfonso Acocella,

122. Nella pagina successiva: Giovanni Battista Piranesi, *Mattoni quadrati, segati a linee diagonali per formare i Mattoni triangolari*, in *Le Antichità Romane*, Tomo III, tavola V, Firmin Didot Frères, Parigi, 1763.

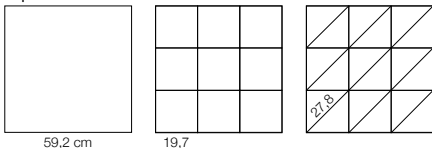
bessales



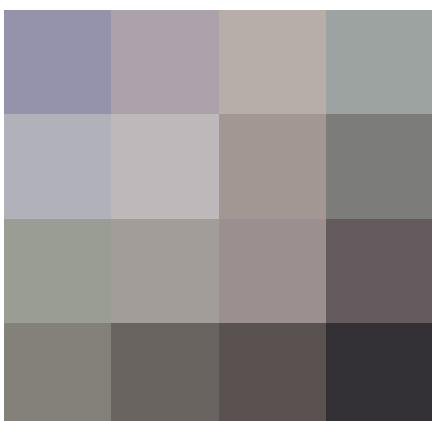
sesquipedales



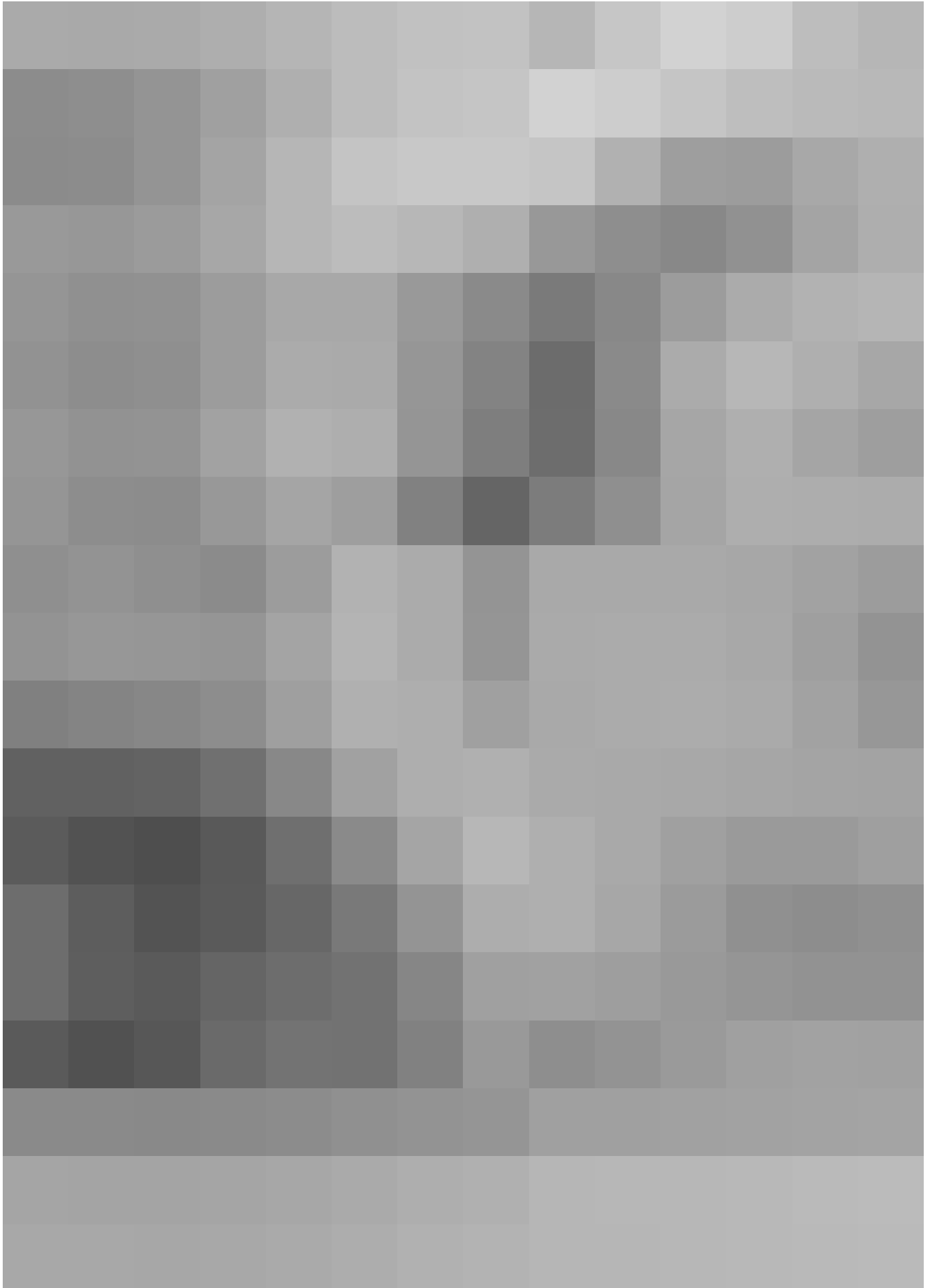
bipedales



120



121



Già alla fine della Repubblica «era usuale rinforzare l'opera reticolata con fasce orizzontali di mattoni o di tegole fratte o blocchi lapidei squadrati (fig.123). In età imperiale questo uso si perfeziona con l'aggiunta di ammorsamenti laterali; le specchiature di opera reticolata sono così inquadrare da cornici di mattoni»¹¹⁹.

Si consolidano nel giro di sei secoli tutte le tecniche edilizie afferenti le opere murarie in pietra ed in laterizio con l'importante contributo della malta cementizia. Numerose sono, infatti, le tipologie di apparecchiatura muraria dell'antica Roma, quali:

- *Opus siliceum (opera poligonale)*: diffusa nel territorio italico tra il VI e il II secolo a.C., consiste nella sovrapposizione di elementi in pietra non lavorati, anche di notevoli dimensioni, senza ausilio di leganti, grappe o per-

ni. Veniva utilizzata soprattutto per murature di terrazzamento e contenimento dei terrapieni;

- *Opus quadratum (opera quadrata)*: consiste nella giustapposizione di blocchi litici squadrati in forma parallelepipedica e di altezza uniforme (*isòdomo*) o di altezza e lunghezza variabile (*pseudoisòdomo*), messi in opera in filari omogenei con piani di appoggio continui. Nell'*ars costruendi* romana e preromana la tecnica viene utilizzata già a partire dal VI secolo a.C. e si affinò progressivamente con una maggiore regolarità del taglio (tecnica dell'*anatiròsi*) e una apparecchiatura più articolata della muratura. La tecnica verrà utilizzata anche dopo l'introduzione del laterizio e dell'*opus caementicium* per tutta l'età imperiale e nei secoli successivi, come rinforzo dei cantonali d'angolo o per la realizzazione di murature in opera mista (*opera mixtum*);

123. Giovanni Battista Piranesi, *Spaccato del Mausoleo di Ottaviano Augusto*, in *Le Antichità Romane*, Tomo II, tavola LXII, Firmin Didot Frères, Parigi, 1763.

124. Pavimento realizzato con la tecnica dell'*opus spicatum*.

125. Pavimento realizzato con la tecnica dell'*opus tessellatum* o *vermiculatum*.

126. Pavimento realizzato con la tecnica dell'*opus scutulatum*.

127. Pavimento realizzato con la tecnica dell'*opus sectile*.

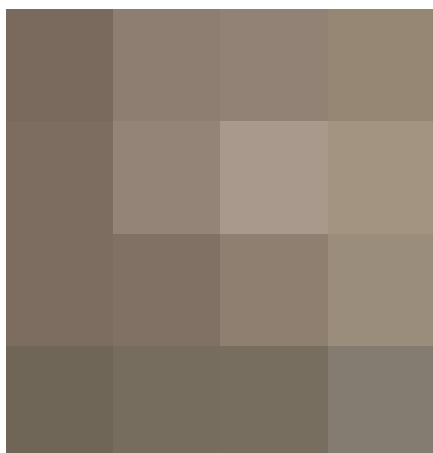
128. Nelle pagine successive: quadro sinottico delle tipologie stereotomiche di muratura realizzata con le tecniche dell'edilizia romana.

129. Nelle pagine successive: immagini superficiali delle diverse tipologie di muratura realizzata con le tecniche dell'edilizia romana.

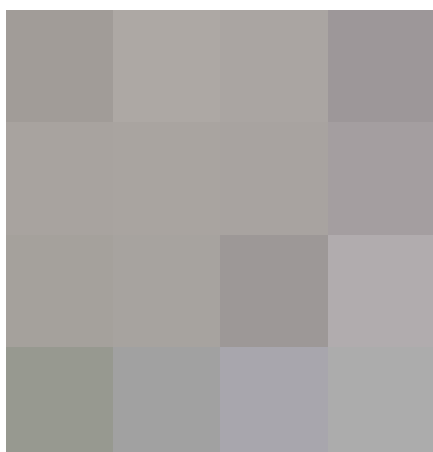




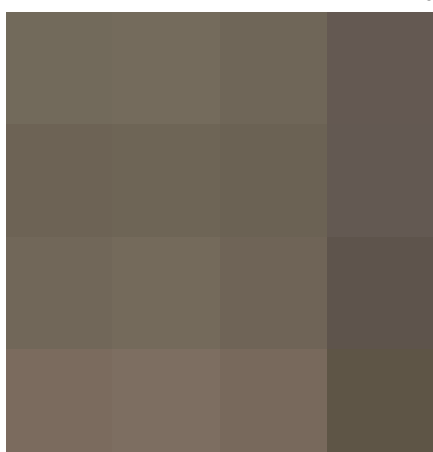
124



125



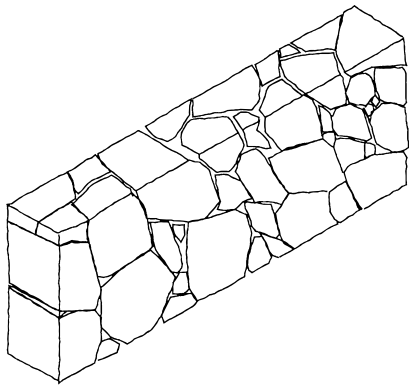
126



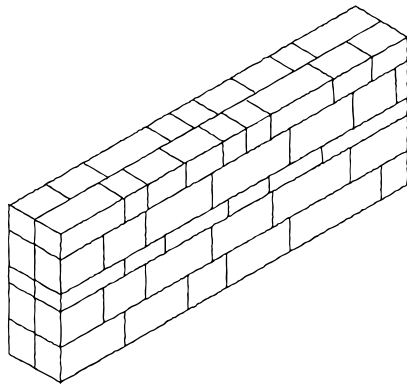
127

- *Opus africanum (opera africana o a telaio)*: elemento murario costituito da piedritti verticali di blocchi di pietra costituenti il telaio nelle quali si alternano riempimenti in pietra, laterizio o terra cruda (*lateres*), con una morfologia simile a quella a *graticcio*. Venne utilizzata in Africa Settentrionale dal IV secolo a.C.;
- *Opus caementicium (opera cementizia)*: muratura costituita da un riempimento cementizio costituito da una miscela di malta (calce con sabbia o pozzolana) e *caementa*, ovvero pietre grezze o inerti litici. L'opera cementizia costituisce generalmente solo il nucleo portante della muratura, rivestita su entrambi i lembi esterni con un paramento in pietra o in laterizio che fungeva da cassaforma a perdere;
- *Opus incertum (opera incerta)*: paramento murario costituito da elementi in pietra di forma irregolare con il lato a vista più o meno planare, utilizzato dai romani a partire dagli inizi del II secolo a.C.. Le pietre utilizzate per la costruzione della muratura venivano opportunamente solidarizzate fra loro con la malta cementizia;
- *Opus quasi reticulatum (opera quasi reticolata)*: paramento antesignano della più evoluta *opera reticulata*, ma molto meno uniforme e lineare. Utilizzata dalla fine del II secolo a.C.;
- *Opus reticulatum (opera reticolata)*: paramento massivo costituito da elementi in laterizio tronco-piramidali a base quadrata in pietra ("*tufelli*" o *cubilia*), con la rastremazione della punta inserita all'interno del nucleo di *opus caementicium* e disposti diagonalmente a formare un reticolo particolarmente resistente. La tecnica è utilizzata a partire dalla prima metà del I secolo a.C.;
- *Opus testaceum (opera laterizia)*: paramento murario realizzato inizialmente con laterizi sottili derivanti dal recupero di tegole ed elementi piani in cotto, sostituiti poi dai mattoni o laterizi preformati (*bessales*, *sesquipedales*, *bipedales*) e suddivisi in elementi di forma triangolare, con la punta inserita nel nucleo in opera cementizia, utilizzata dalla fine del I secolo a.C. e per tutta l'età imperiale;
- *Opus latericium (opera laterizia in mattoni crudi)*: con *lateres*, i latini intendevano i paramenti in mattoni crudi, realizzati con la tecnica del *pisé* e della terra armata;
- *Opus mixtum (opera mista)*: muratura costituita da opera reticolata e con ammorsature in blocchi di pietra o mattoni di laterizio in corrispondenza dei cantonali d'angolo, utilizzata soprattutto nel II secolo d.C.;
- *Opus vittatum (opera listata)*: paramento murario costituito da ricorsi alternati di laterizi e blocchi in tufo o di derivazione sedimentaria, utilizzato soprattutto agli inizi del IV secolo d.C.;
- *Opus craticium (opera a graticcio)*: muratura leggera costituita da un telaio portante di legno solidale ad una base fondale in muratura ed un riempimento in pietrame o argilla.

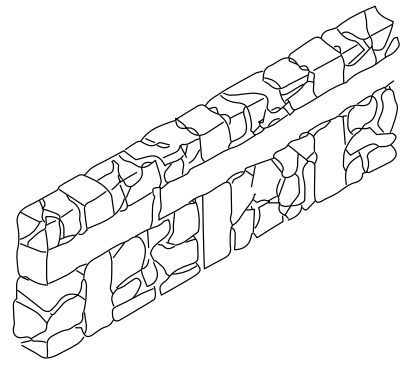
Oltre alle diverse tipologie di muratura portante, esistevano anche paramenti murari completamente rivestiti con lastre di marmo o intonaci, finemente decorati con apparati pittorici (con le antiche tecniche come l'*encaustum*, basato sull'utilizzo di colori mescolati alla cera¹²⁰), da mosaici parietali e ornamenti in stucco. Per le strutture destinate ad utilizzi particolari, come vasche, coperture, pareti, pavimenti termali e cisterne, la superficie muraria veniva rivestita da uno strato impermeabile in *cocciopesto (opus signinum, calcina di Signina, l'odierna Segni)*, composto da una miscela di calce, sabbia o pozzolana e scarti di laterizio omogenei. Per quanto riguarda i pavimenti, invece, potevano essere in *opus spicatum (opera spicata)* realizzata con mattoni rettangolari disposti a spina di pesce), in *opus tessellatum* o *vermiculatum* (mosaico), in *opus scutulatum (opera scutulata)* realizzata con il riuso di scaglie di pietra e marmo di varia morfologia e colore ed in *opus sectile*, ossia lastre di marmo policrome disposte in varie geometrie (figg.124-127).



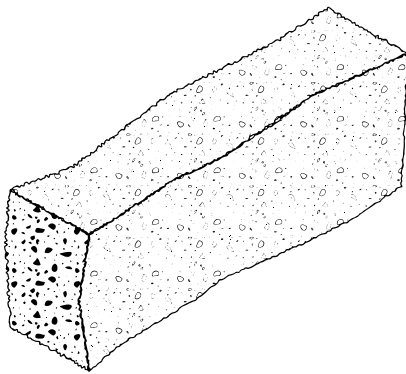
Opus Siliceum (VI - II secolo a.C.)



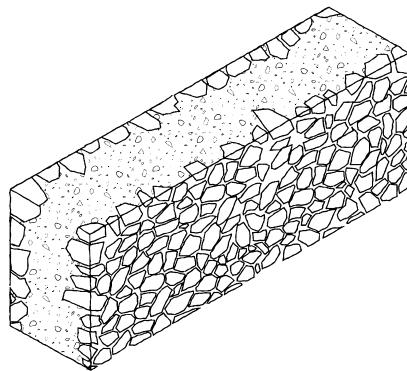
Opus Quadratum (VI secolo a.C.)



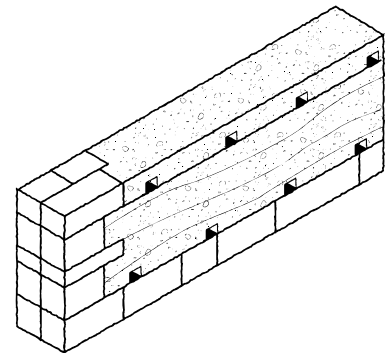
Opus Africanum (IV secolo a.C.)



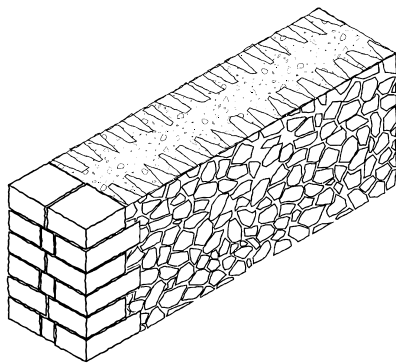
Opus Caementicium (III secolo a.C.)



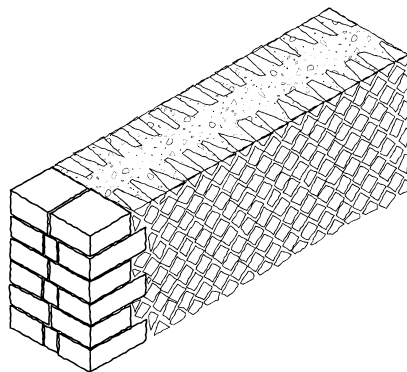
Opus Incertum (II-I secolo a.C.)



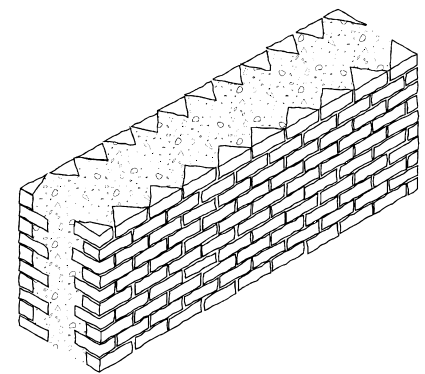
Opus Latericium (III secolo a.C.)



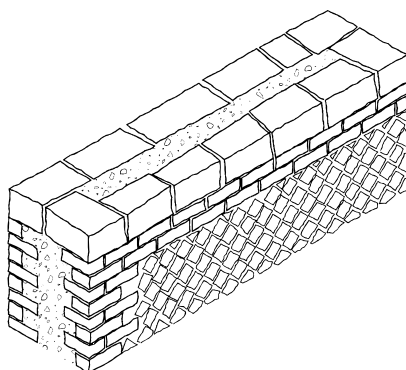
Opus quasi Reticolatum (I secolo a.C.)



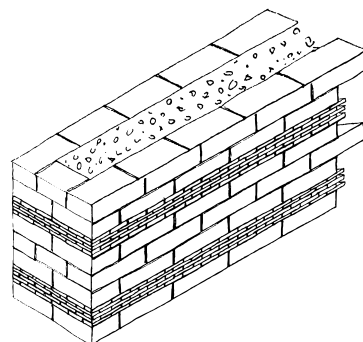
Opus Reticolatum (I secolo a.C.)



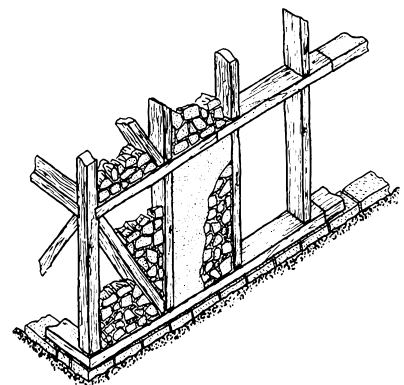
Opus Testaceum (I secolo d.C.)



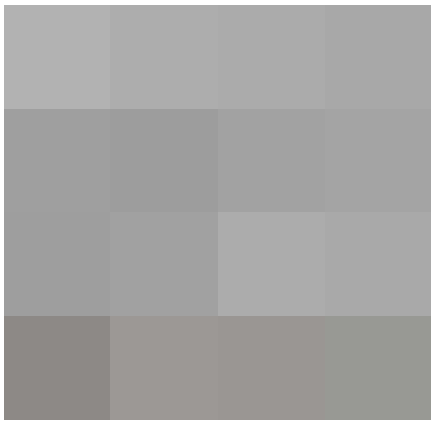
Opus Mixtum (II secolo d.C.)



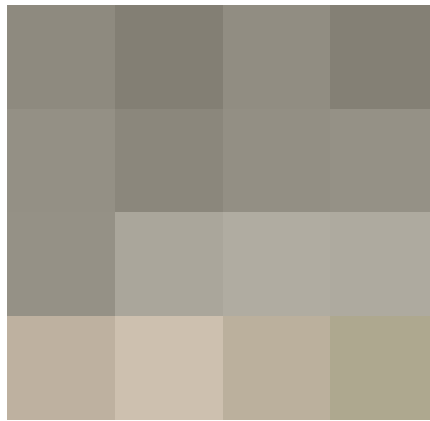
Opus Vittatum (IV secolo d.C.)



Opus Craticium (IV secolo d.C.)



Opus Siliceum (VI - II secolo a.C.)



Opus Quadratum (VI secolo a.C.)



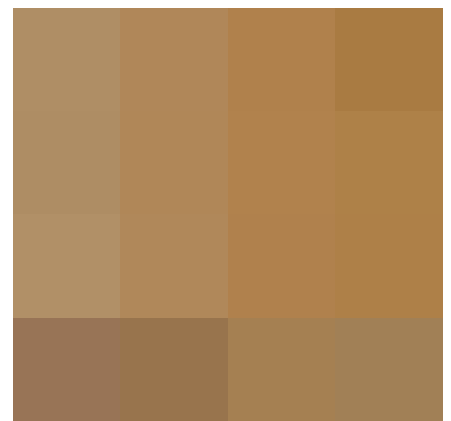
Opus Africanum (IV secolo a.C.)



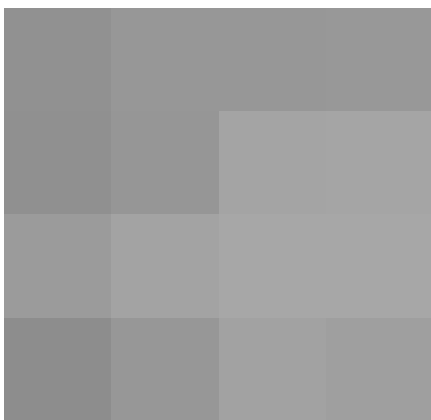
Opus Caementicium (III secolo a.C.)



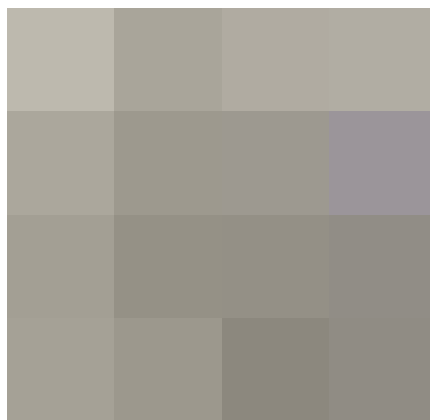
Opus Incertum (II-I secolo a.C.)



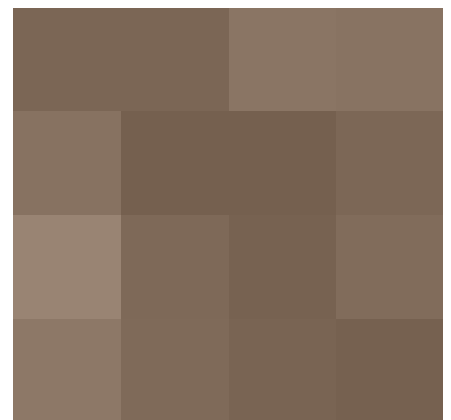
Opus Latericium (III secolo a.C.)



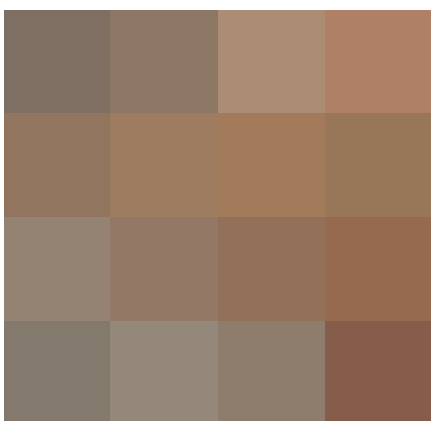
Opus quasi Reticolatum (I secolo a.C.)



Opus Reticolatum (I secolo a.C.)



Opus Testaceum (I secolo d.C.)



Opus Mixtum (II secolo d.C.)



Opus Vittatum (IV secolo d.C.)



Opus Craticium (IV secolo d.C.)

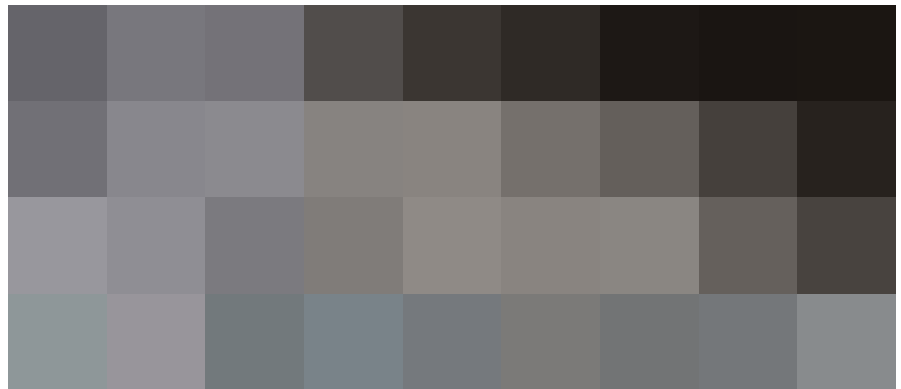
Altri importanti elementi in laterizio appartenenti alla tradizione costruttiva romana e di vitale importanza nel sistema involucro sono le *tegole piane* (dal latino *tegulae*, derivante dal verbo *tegere*, "coprire") e i coppi o embrici (*imbrices*). Per secoli la *tegula* non è stata impiegata esclusivamente per la realizzazione del manto di copertura (*tectum*) delle opere architettoniche, ma è stata impiegata anche per rispondere a numerose esigenze costruttive, conferma del grande ingegno romano. Con i termini *tegulae mammatae* e *tegulae tubulatae*, infatti, si indicano tipologie speciali di artefatti utilizzati rispettivamente per la realizzazione di intercapedini murarie aerate e per la regimentazione delle acque meteoriche.

Le *tegulae mammatae*, sono pezzi speciali di laterizio piano di forma quadrangolare (o rettangolare) dotati ai vertici di sporgenze circolari (protuberanze simili a delle mammelle, da cui deriva il nome *mammatae*). Le sporgenze lunghe circa 5 cm consentivano di distanziare l'elemento dalla parete creando un'intercapedine aerata. Esse venivano solidarizzate al supporto murario per mezzo di

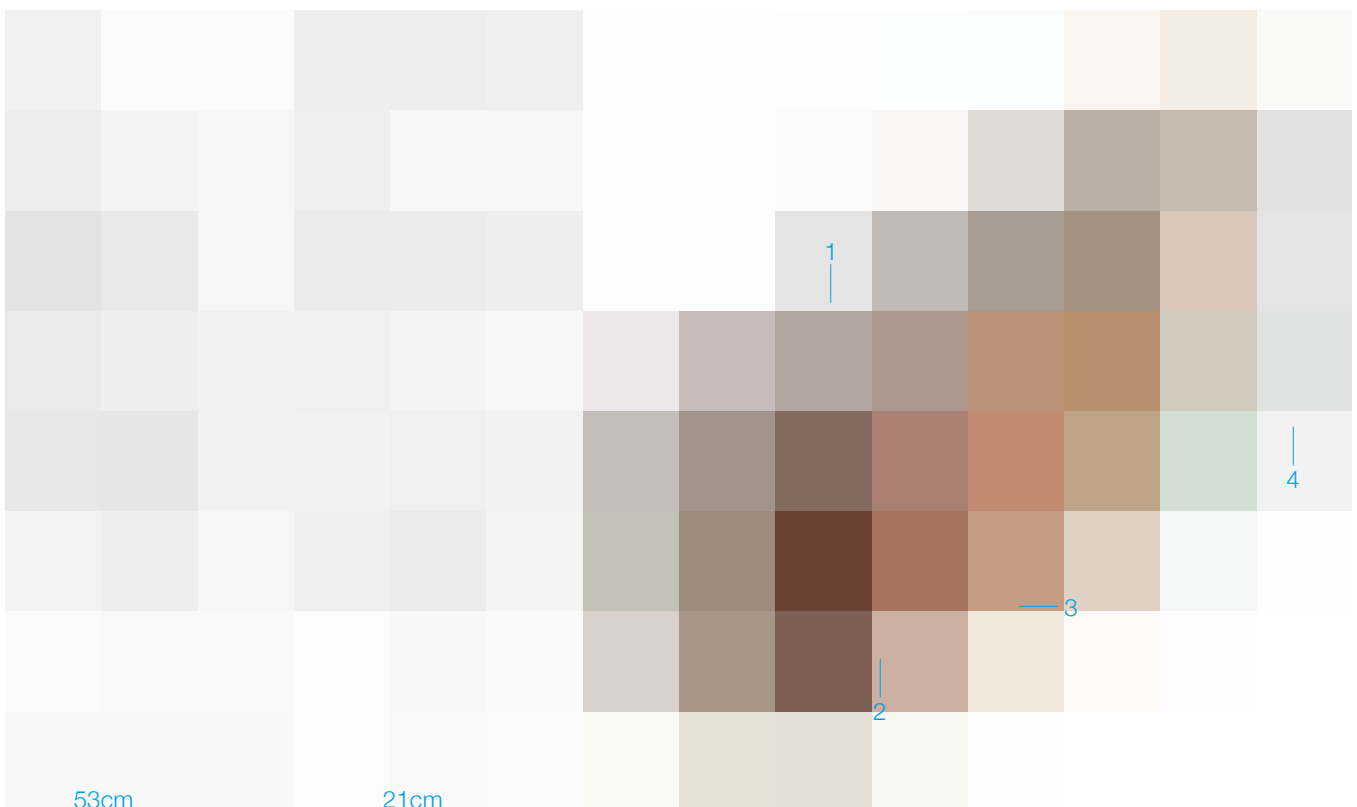
connettori metallici o attraverso il mutuo incastro tra gli elementi o, più diffusamente, mediante chiodatura (figg.130-131). Tale sistema costruttivo rappresenta il primo esempio di facciata ventilata della storia, inizialmente impiegato per risolvere il problema dell'umidità di risalita (soprattutto per le murature decorative) e successivamente declinate per la deumidificazione delle pareti termali. Sulla controparete di *tegulae mammatae* venivano praticati dei fori sia sulla parte basamentale sia sul coronamento, innescando dei moti convettivi all'interno dell'intercapedine che favorivano il lavaggio termico del supporto murario, preservando gli strati più sensibili all'azione igroscopica dell'acqua.

130. Particolare tecnologico del sistema costruttivo realizzato con *tegulae mammatae*. Legenda: 1 muratura in opus testaceum; 2 intercapedine aerata; 3 tegula mammatae; 4 intonaco esterno.

131. *Tegulae mammatae* rinvenute presso Villa dei Papiri ad Ercolano, © Michael Binns.



131



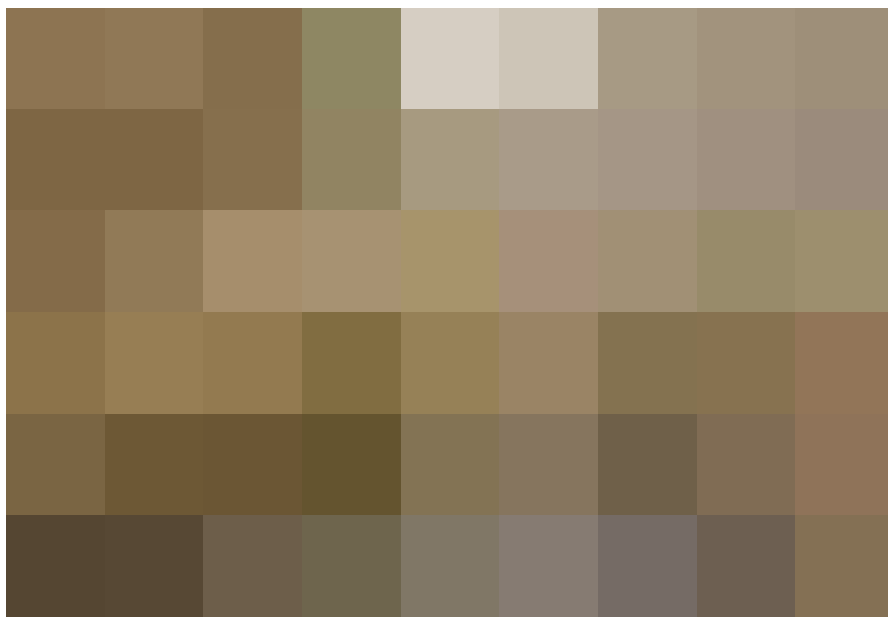
130

132. Ipocausto delle terme di Costantino ad Arles, © Rodrigue Eckert.

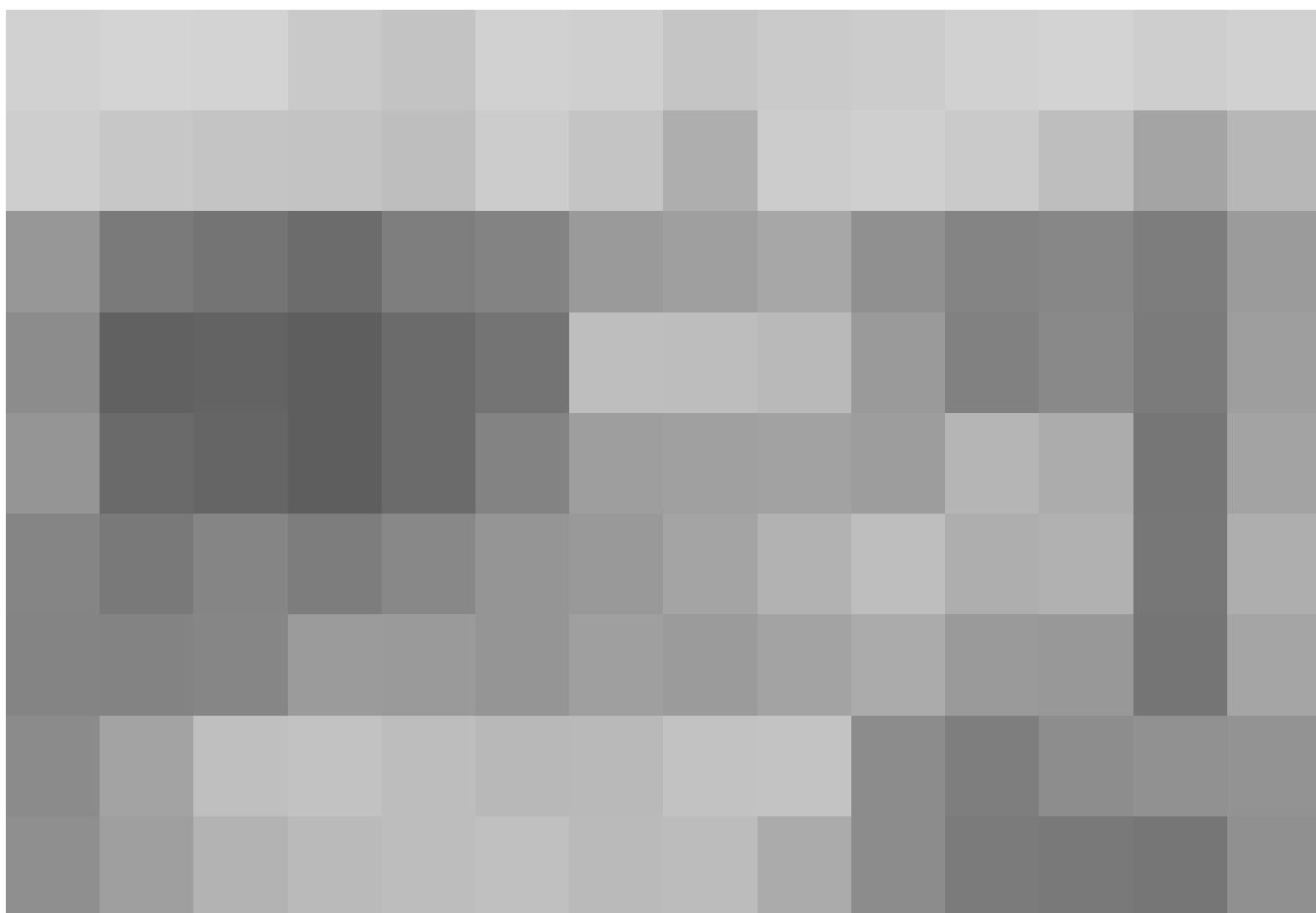
133. George Vertue, *Hypocaustum Romanum Lincolniae*, tavola XIX, *Sumptibus Societatis Antiquari*, 1740.

L'espedito dell'intercapedine aerea trova maggiori impulsi sperimentali soprattutto nella evoluzione del sistema di riscaldamento degli ambienti termali come il *calidarium* (destinato ai bagni in acqua calda ed ai bagni di vapore), il *frigidarium* (destinato ai bagni in acqua fredda in apposite vasche circolari chiama-

te *piscinae*), il *tepidarium* (destinato ai bagni in acqua tiepida in apposite vasche circolari chiamate *piscinae*), il *laconicum*, la *sudatio* e l'*alveum* (ambienti destinati a favorire il processo di sudorazione). L'innovativo sistema di riscaldamento era definito *hypocaustum* (ipocausto) (fig.132), «in cui l'aria calda, prodotta bruciando la legna in un ambiente di servizio posto a quota più bassa o sotterraneo (*praefurnium*) [rispetto al pavimento sospeso (*suspensura*) in bipedales quadrati poggiati su pilastri in mattoni quadrati, rettangolari, ottagonali o circolari (*pilae*)], risaliva all'interno delle pareti e delle stanze sovrastanti attraverso le intercapedini formate dalla giustapposizione di queste particolari tegole. Nella parte alta della parete cava erano presenti bocche d'aria che consentivano il tiraggio dell'aria e l'eliminazione dei fumi. Le pareti interne delle stanze calde, protette da questa particolare intercapedine, potevano essere rivestite con intonaci o altre soluzioni decorative che non avrebbero subito deterioramento»¹²¹ (fig.133).



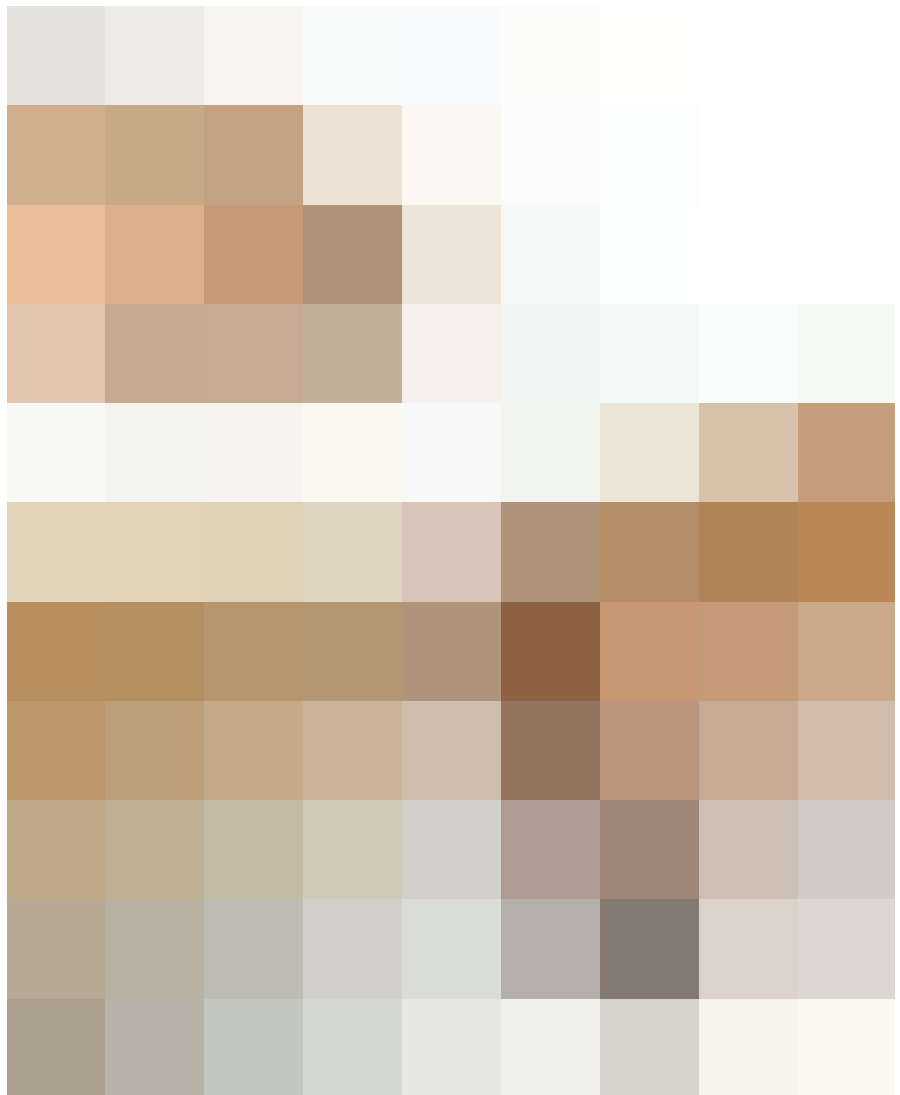
132



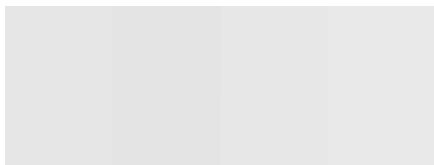
133

Gli spazi tra le *pilae* permetteva al calore proveniente dal forno (*praefurnium*) di distribuirsi uniformemente su tutta la pavimentazione. Lo sfiato dei fumi generati dalla combustione avveniva, come detto, attraverso le contropareti realizzate in *tegulae*.

Una evoluzione morfologica degli elementi in laterizio per la canalizzazione dei fumi, del calore e delle acque meteoriche è rappresentato dalle *tegulae tubulatae* o *tubulatio* (fig.134). Per quanto riguarda l'impiego nei sistemi idrici, i tubuli sono costituiti da elementi di forma cilindrica in terra cotta con una estremità di diametro ridotto per facilitare l'inserimento del tubulo successivo (eventualmente giuntato con malta cementizia nel caso dei collettori idrici). Lo scopo era quello di favorire la regimentazione e smaltimento delle acque meteoriche intercettate in copertura, anch'essa ricoperta da tegole piane (*tegulae bipedales* e *sesquipedales*), embrici curvi (*imbrices*) e tegole speciali (*tegulae colliciares*), destinate ad essere adoperate in corrispondenza delle linee di intersezione delle falde (*compluvium* ed *impluvium*, entrambe derivate etimologicamente da *pluvia*, pioggia)¹²² (fig.135).



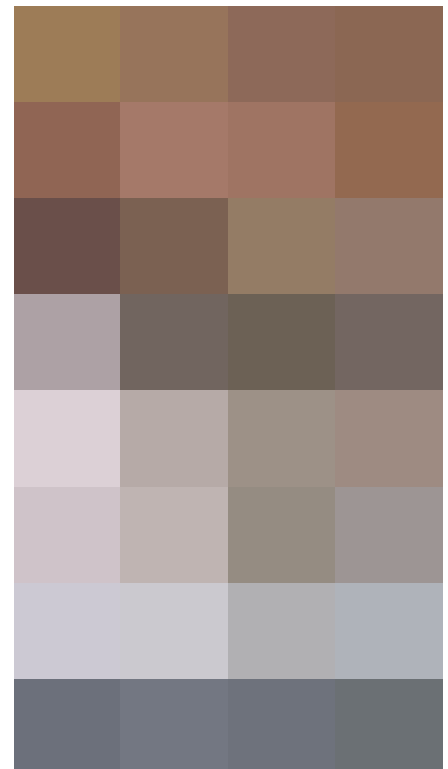
134



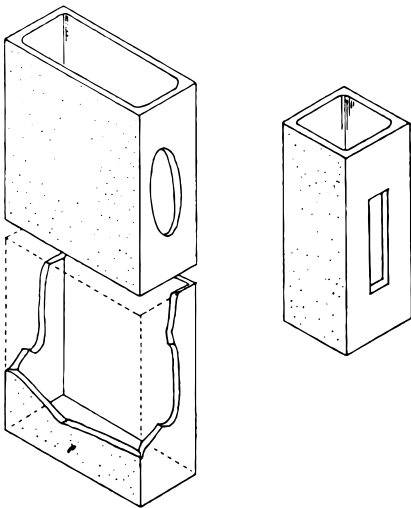
135

Per quanto riguarda l'impiego di tubuli per il riscaldamento degli ambienti domestici e pubblici, esistono numerose tipologie di elementi in laterizio, tutte basate sulla giustapposizione e l'accostamento a formare una controparete in aderenza alla struttura muraria e rivestita con lastre di marmo meccanicamente ancorate con grappe e connettori metallici (fig.136). Simile ai tubuli idrici, ma con un diametro inferiore (circa 6 cm) sono i tubuli a sezione cilindrica con una estremità rastremata, impiegati per la propagazione dei vapori caldi e per lo smaltimento dei fumi della combustione proveniente dall'ipocausto.

Tipici della costruzione termale sono, invece, i tubuli a sezione cava rettangolare, anche in questo caso accostati tra loro e posti in adiacenza della muratura, con lo scopo di convogliare ascensionalmente l'aria calda e i fumi generati dalla combustione nell'ipocausto. Questa tipologia nasce come forma evolutiva delle soluzioni realizzate con *tegulae mammatae* che molto probabilmente - a causa delle numerose protuberanze che interrompevano la continuità dell'intercapedine - generavano una serie di vortici che si tramutavano in una non perfetta circolazione dell'aria calda ed espulsione dei fumi. Potrebbe giustificarsi, quindi, la produzione di tubuli parallelepipedi - il primo esempio, d'altronde, di laterizi forati nella storia delle costruzioni - che consentono di realizzare contropareti cave con



136



137

134. Nella pagina precedente: tubuli fittili per reti idriche di età romana. Museo archeologico nazionale di Sarsina, in Acocella A., *Artefatti laterizi e percorsi d'acqua*, in *Stile Laterizio II*, Media MD, 2013, pag.39.
135. Nella pagina precedente: tipologie di tegole ed embrici romani, in Lugli G., *Tipi e forme di mattoni*, in *La tecnica edilizia romana*, Bardi Editore, Roma, 1957, pag.742.
136. Nella pagina precedente: controparete realizzata in tubuli di laterizio per lo smaltimento dei fumi dell'ipocausto delle terme di Ostia antica, © AIMare.
137. Tubuli parallelepipedi forati, in Yegül F.K., *Baths and Bathing in Classical Antiquity*, Cambridge, 1992.
138. Ipocausto delle terme romane di Kempten, in Germania.
139. Nella pagina seguente: sistema delle volte sottili con tubi fittili. Elaborazione grafica sulla base dei disegni presenti in Lancaster L.C., *Innovative vaulting in the architecture of the Roman empire: 1st to 4th centuries CE*, Cambridge, 2015.
140. Nella pagina seguente: sistema a conci cavi. *Ibidem* (vedi didascalia n.139).
141. Nella pagina seguente: sistema a tenoni. *Ibidem* (vedi didascalia n.139).
142. Nelle pagine seguenti: sistema con tegulae mammatae. *Ibidem* (vedi didascalia n.139).
143. Nelle pagine seguenti: sistema a "t" rovescia - fragellae. *Ibidem* (vedi didascalia n.139).
144. Nelle pagine seguenti: sistema ad "h" - baetulo. *Ibidem* (vedi didascalia n.139).
145. Nelle pagine seguenti: sistemi parietali strutturalmente in continuità con la volta. *Ibidem* (vedi didascalia n.139).

canalizzazioni rigorosamente verticalizzate per il movimento ascensionale dell'aria calda. Talvolta, alcuni tubuli sono dotati di fori laterali, per consentire anche la diffusione trasversale dell'aria calda, assicurando uniformità di temperatura delle pareti termali (figg.137-138).

I sistemi di controparete per la ventilazione verticale negli ambienti termali portano ad un rinnovamento della convenzionale struttura muraria voltata (portata e portante), anch'essa dotata di canalizzazioni e cavedi ottenuti con elementi speciali di laterizio e sistemi di connessione all'avanguardia. Le tipologie sono:

- *sistema delle volte sottili con tubi fittili*: rappresenta l'evoluzione del sistema parete con tubi fittili, declinato morfologicamente alla geometria della volta (fig.139);
- *sistema a conci cavi*: volta ottenuta dalla giustapposizione di blocchi trapezoidali di laterizio cavo o forato, legati con malta (fig.140);
- *sistema a tenoni*: volta ottenuta dall'incastro tra *tegulae* con alette inferiori e superiori, chiamate *tenoni* (costituenti anche la costolona-

tura portante della volta) e doppio ordine di lastre di laterizio interposte tra le costolonature a formare l'intercapedine aerata (fig.141);

- *sistema con tegulae mammatae*: volta portata ottenuta dall'accostamento di tegulae mammatae alla superficie intradossata della struttura muraria voltata (fig.142);
- *sistema a "t" rovescia - fragellae*: volta ottenuta dalla giustapposizione di due elementi, uno con il ruolo di 'concio' a "t" rovescia costituente la costolonatura della volta, l'altro come pannello di raccordo fra le nervature. L'unione dei 'conci' è ottenuta tramite grappe metalliche in piombo inserite superiormente (fig.143);
- *sistema ad "h" - baetulo*: variante morfologica della tipologia di controvolta a "t" rovescia (fig.144).

Molto spesso, soprattutto nel caso delle volte portanti (come per esempio la tipologia "a tenoni"), la struttura morfologica della struttura muraria voltata è in continuità con la controparete adiacente alla muratura portante, creando un collegamento diretto e strutturalmente costante con l'ambiente dell'ipocausto (fig.145).





139



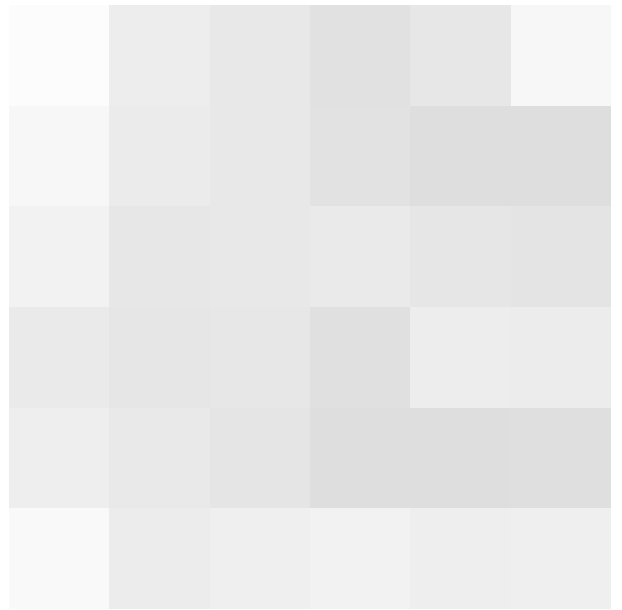
140



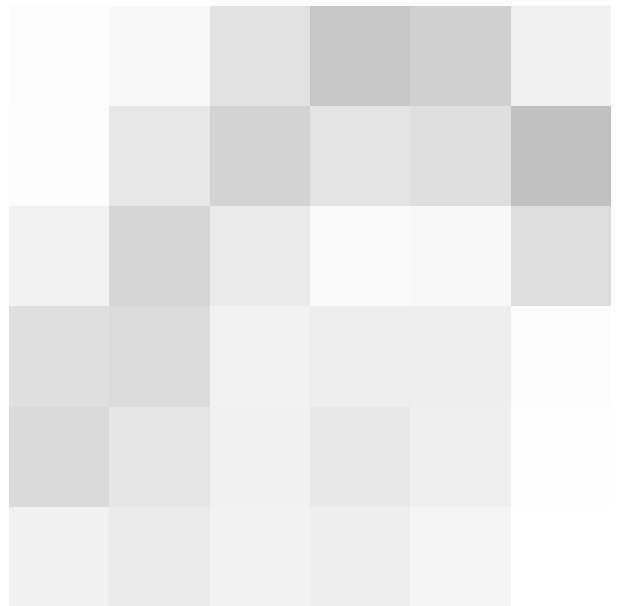
141



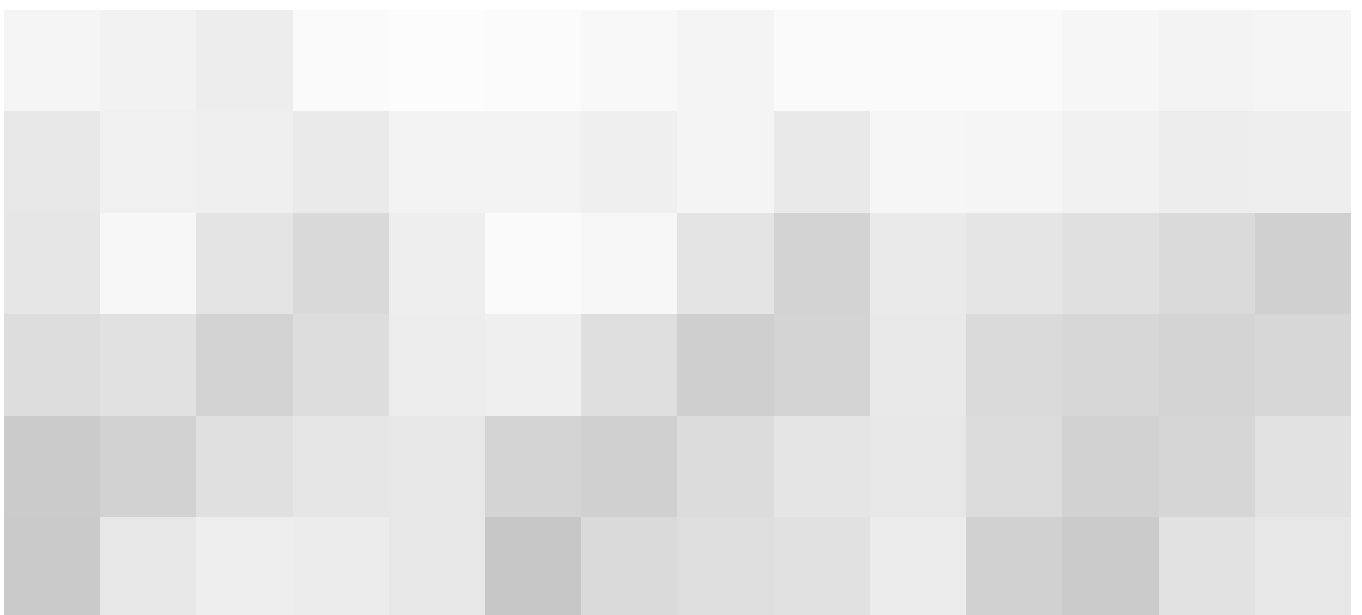
142



143



144



145

Architettura litica attraversata dal vento

Il principio fisico dell'effetto camino generato dalla ventilazione naturale adottato dalla tecnica costruttiva romana per la deumidificazione degli ambienti termali e abitativi, trova nell'antico Medio Oriente, nell'area sub-sahariana ed in India un suo più evoluto e sofisticato sfruttamento.

L'utilizzo del vento nelle architetture antiche è il risultato di una sapiente e costante ricerca per la comprensione e misurazione di questo effetto dinamico ed imprevedibile in grado di favorire il raggiungimento di un miglioramento del benessere ambientale. Da formalismi tecnici basati su regole spontanee ed empiriche si sono sviluppate vere e proprie architetture litiche (e non) attraversate dal vento mediante congeniali ed innovativi sistemi tecnologici. Dalle torri del vento dell'antico impero persiano, in grado di abbassare il gradiente termico degli ambienti interni, ai primi esempi di mulini a vento europei del XII secolo in grado di generare forza motrice, fino alle contemporanee architetture in grado di sfruttare il sistema eolico come generatore di energia, tali opere rappresentano il più importante connubio tra architettura e tecnica, antesignane del progresso scientifico e tecnico declinato al settore delle costruzioni. L'abbassamento del gradiente termico all'interno degli edifici senza alcun dispendio di energia diversa da quella fornita dall'ambiente naturale è un sistema definito *raffrescamento passivo*. Numerosi sono i sistemi di raffrescamento passivo: ad esempio, nelle regioni aride del Medio Oriente, gli edifici sono costruiti tradizionalmente nella forma di agglomerazione in cui ogni unità abitativa è adiacente all'altra e le strade presentano un larghezza molto limitata (anche per scopi difensivi). L'agglomeramento limita, quindi, la superficie abitativa totale esposta alla radiazione solare, limitando l'assorbimento di calore. Le murature di tali edifici sono dotate, inoltre, di ridotte aperture sempre per ridurre il trasferimento

del calore e sono realizzate per la maggior parte in mattoni di argilla cruda che presentano una elevata inerzia termica atta a limitare l'escursione termica che contraddistingue questo particolare territorio. Sempre in Medio Oriente, gli edifici che presentano dimensioni maggiori sono dotati di una corte interna con specchi d'acqua e alberi in grado di favorire la ventilazione naturale e lo sviluppo di zone d'ombra (fig.146).

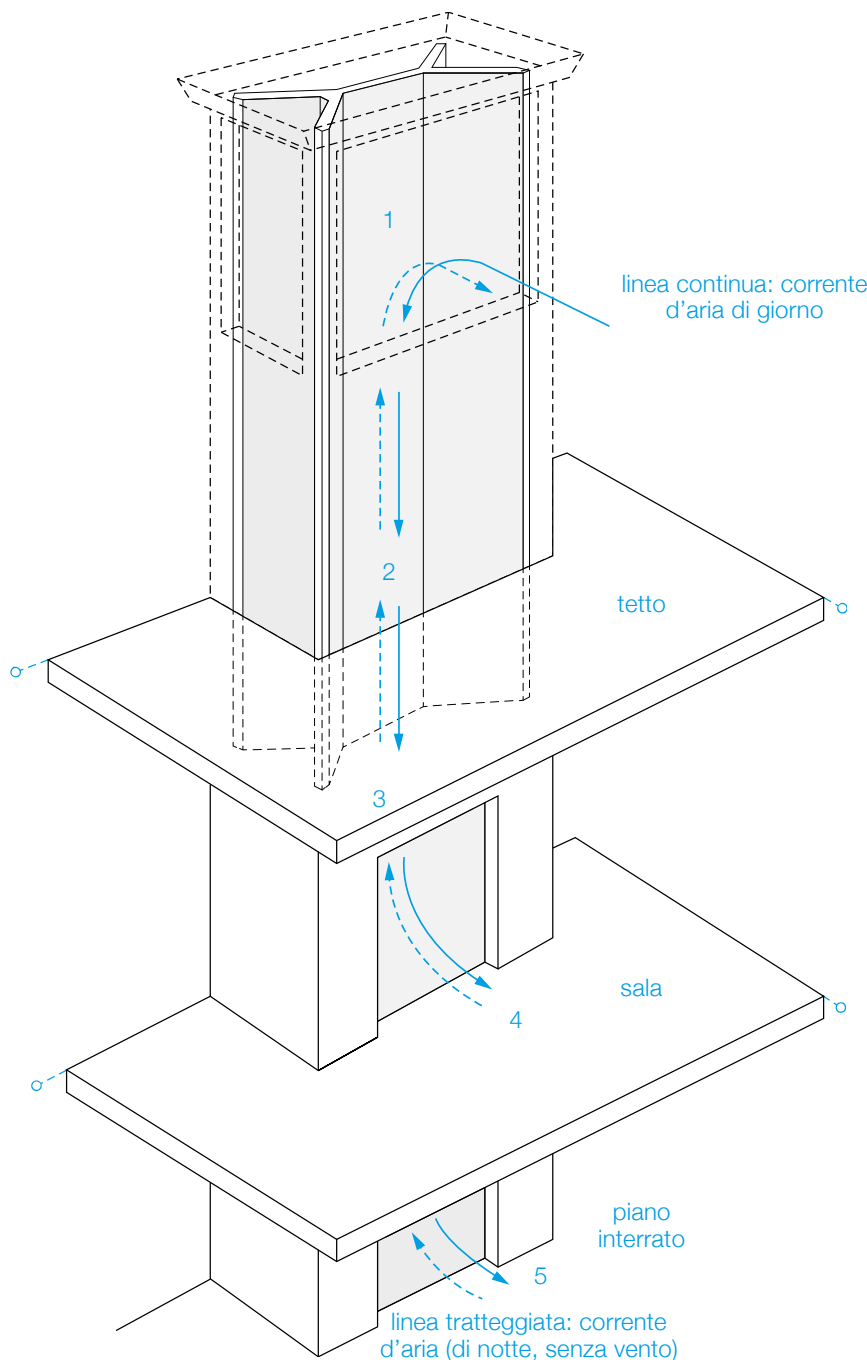
146. Urbanistica della città di Ghadames in Libia costituita da gruppi case realizzate in mattoni di fango e cortili occupati da palme secolari. Ghadames è una città oasi preromana nel Sahara. Le passerelle sui tetti consentivano alle donne di muoversi liberamente, nascoste alla vista degli uomini, © George Steinmetz, National Geographic.



147. Schema funzionale di una torre del vento a seconda dell'ora del giorno e della presenza o meno del vento. Durante la notte la torre si raffredda; di giorno l'aria calda esterna (freccia continua) a contatto con la muratura, si raffredda, aumenta la densità e scende verso il basso (1-5). In presenza di vento il fenomeno è catalizzato: l'aria entra nella torre dal lato esposto al vento, scende e passa nell'edificio attraverso porte che si aprono sulla sala centrale e nell'interrato. Durante il giorno, invece, le muraure della torre assorbono calore e lo cedono all'aria durante la notte creando una corrente ascendente (5-1; freccia tratteggiata).

«Nell'antichità le persone che vivevano negli edifici delle regioni aride accrescevano il comfort delle loro abitazioni anche adottando taluni comportamenti specifici. Per esempio, particolarmente nei caldissimi pomeriggi estivi, molte persone vivevano nei piani interrati o seminterrati, mantenuti freschi dalla temperatura del suolo, relativamente bassa. Durante le fresche notti d'estate molte persone dormivano sul tetto della loro abitazione; sui tetti, naturalmente, l'intimità era assicurata da alti parapetti, i quali fornivano anche una difesa dai polverosi venti estivi»¹²³.

Le torri del vento (chiamate *mulguf* in inglese, *bâgdir* o *malqaf* in persiano e *malqaf* in arabo) sono «una specie di camino, diviso in più sezioni da setti verticali in opera muraria (laterizio, mattoni crudi, pietra, etc.). Durante la notte l'involucro murario della torre si raffredda; di giorno, l'aria a contatto con la muratura si raffredda a sua volta e, diventando così più densa, scende verso il basso ed entra nell'edificio. Quando vi è vento, questo processo può essere accelerato. L'aria entra nella torre dal lato esposto al vento, scende e passa nell'edificio attraverso porte che si aprono sulla sala centrale e nell'interrato. La pressione di quest'aria fresca spinge fuori quella calda presente nell'edificio attraverso porte e finestre. Durante il giorno, invece, la torre si riscalda per irraggiamento solare. Questo calore è ceduto per convezione all'aria durante la notte, creando una corrente ascendente: se vi è necessità di ulteriore raffreddamento, si può usare questa corrente per aspirare l'aria fresca notturna dentro l'edificio»¹²⁴ (fig.147).



La particolare conformazione del setto verticale quadripartito all'interno della torre-camino è indispensabile per sviluppare fenomeni di pressione e depressione tra ambienti sopravvento e ambienti sottovento, favorendo il moto naturale dell'aria. Quando le porte, alla base della torre sono chiuse, l'aria che scende lungo la torre è costretta a tornare indietro attraverso i condotti d'aria opposti e spinta all'esterno attraverso le aperture sottovento. «In realtà anche quando le porte della torre sono aperte, un po' dell'aria che discende dentro la torre torna a salire ed evade per le aperture sottovento. La corrente d'aria ascendente che si crea nei condotti opposti sottovento trasporta con sé aria dell'ambiente interno e la attrae in alto lungo il corpo della torre. In altri termini, nel funzionamento normale di una torre del vento, una parte dell'aria degli ambienti interni esce sempre per le aperture sottovento. La torre fornisce così una circolazione continua dell'edificio»¹²⁵.

Oltre il raffrescamento passivo per convezione termica tra massa muraria e aria, esiste un'altra tipologia di raffrescamento passivo per evaporazione, in cui a una variazione di temperatura coincide una variazione di umidità. L'umidificazione dell'aria, quindi, accompagnata a processi di evaporazione, contribuisce a mantenere condizioni di comfort ideale negli ambienti. Un modo per sfruttare il raffreddamento per evaporazione consiste nell'allocare alla base della torre del vento o all'ingresso dell'edificio da raffrescare una piccola vasca o fontana; l'aria che scende lungo la torre, infatti, già raffrescata per cessione del calore alle muraure della torre, viene ulteriormente raffreddata per evaporazione, cedendo ulteriore calore all'acqua contenuta nella vasca/fontana. Un altro metodo di raffrescamento dell'aria per evaporazione consiste nel posizionare la torre ad una certa distanza dall'edificio, collegati da una galleria sotterranea che si sviluppa dalla base della torre al piano interrato dell'edificio. Il suolo soprastante la galleria è trattato a verde; quando esso viene irrigato, l'acqua percola nel sottosuolo fino

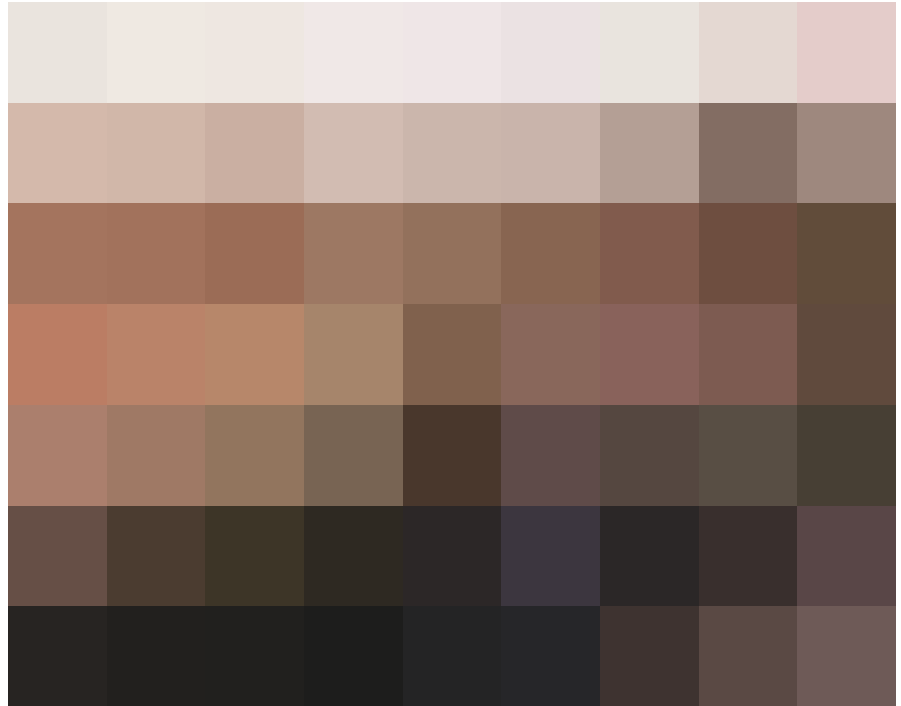
a imbibire i blocchi lapidei macroporosi della muratura della galleria. L'aria immessa attraverso la torre, quindi, subisce un doppio processo di scambio termico, prima attraverso la cessione del calore alle muraure della torre (più fredde), poi attraverso lo scambio di calore per evaporazione con le pareti umide della galleria (figg.148-149).

148. Schema funzionale di una torre del vento per il raffrescamento passivo per convezione ed evaporazione.

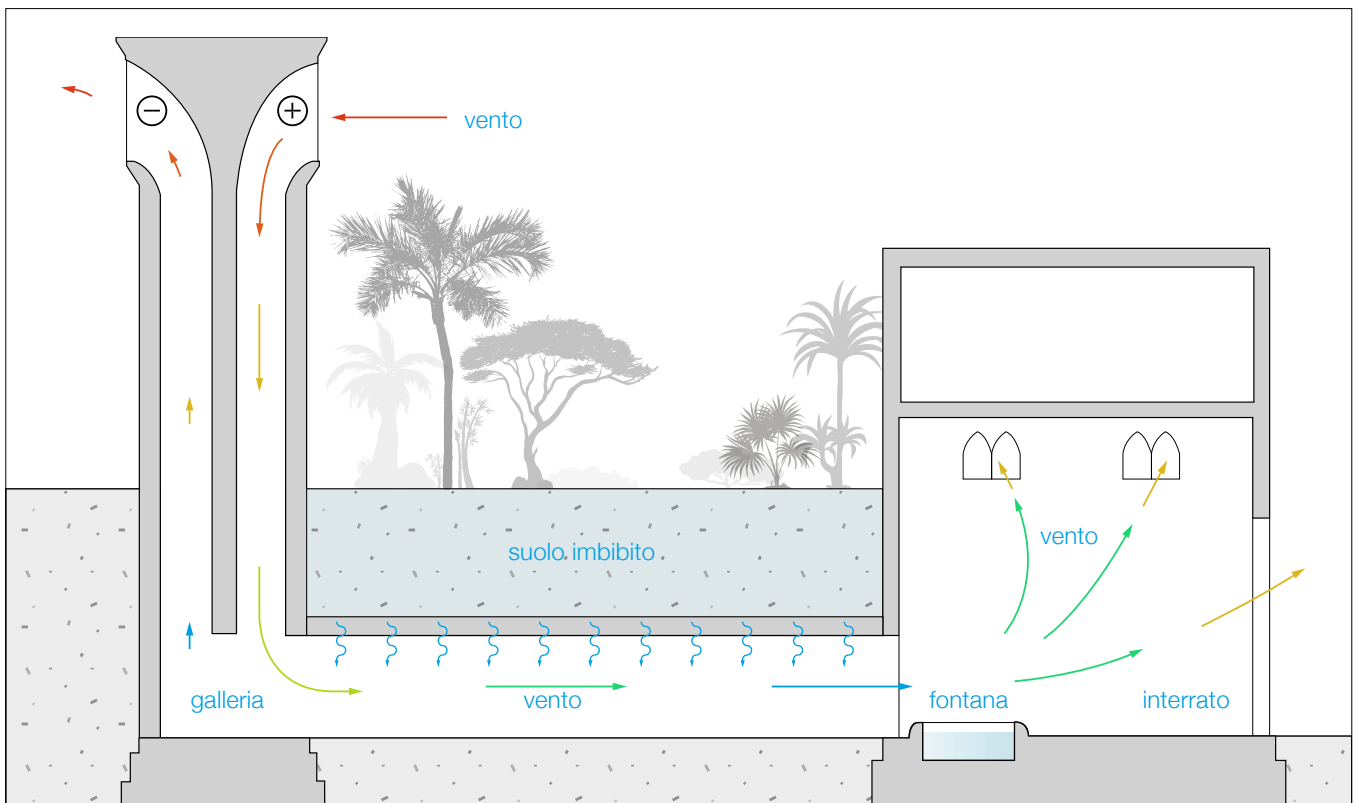
149. Torri del vento della città di Yazd, Iran, © Unsplash free.

150. Schema funzionale di una torre del vento congiunta ad una falda sotterranea per il raffrescamento passivo.

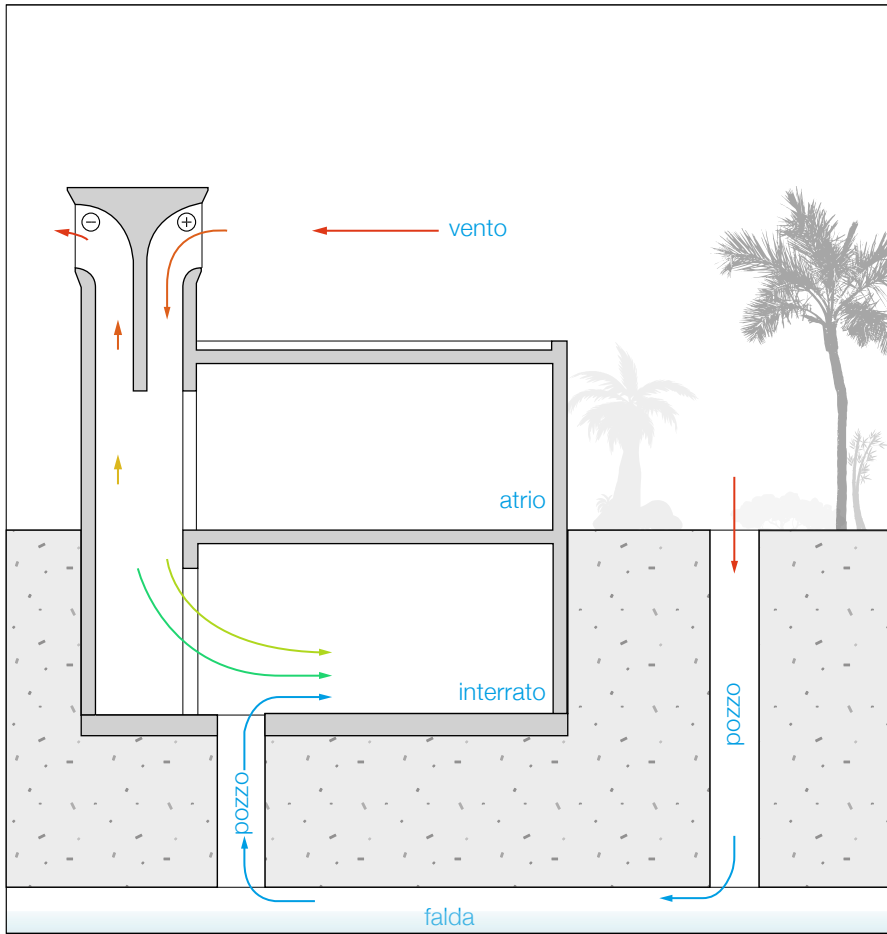
151. Schema funzionale del sistema di raffrescamento passivo "a cisterna".



149

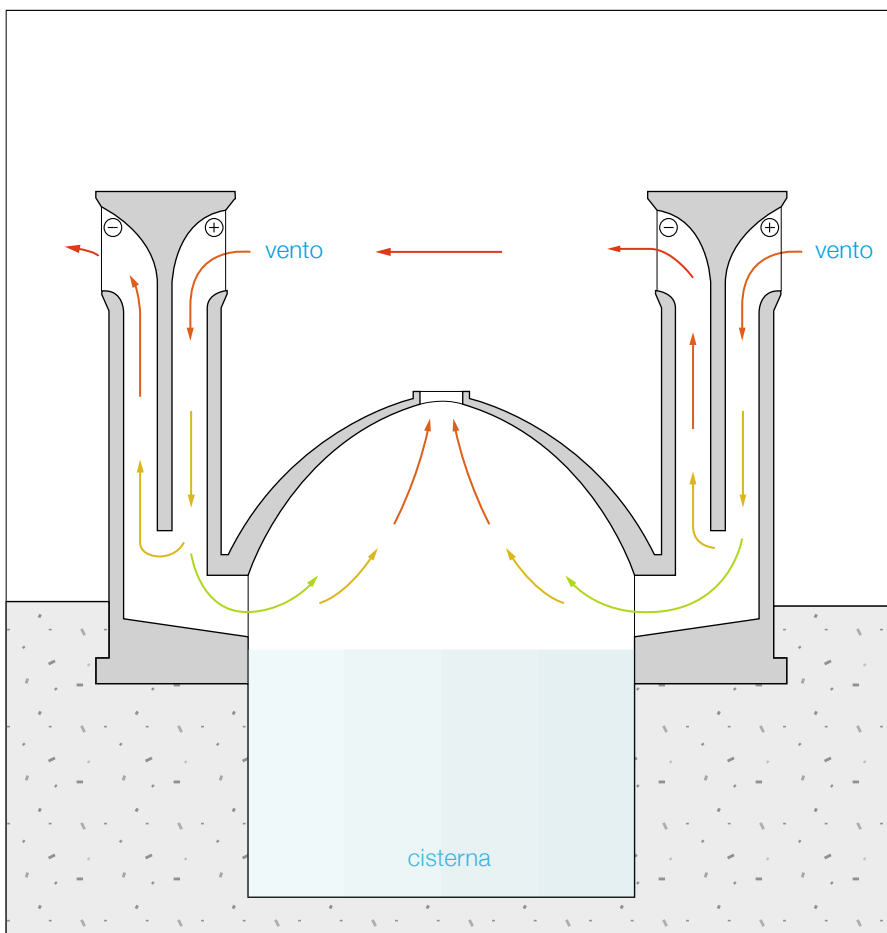


148



Un'altra variante tipologica è la torre del vento che opera congiuntamente con una falda sotterranea. Un pozzo verticale sale dalla falda sotterranea al piano interrato dell'edificio e la torre è posizionata in modo tale che la corrente d'aria che entra all'interno venga incanalata attraverso una porta a sezione ridotta (in cui, per l'effetto Venturi la velocità aumenta e la pressione diminuisce) passando sopra il pozzo, da cui fuoriesce aria raffrescata. L'aria che affluisce dal pozzo presenta una temperatura molto bassa grazie al processo di raffreddamento subito all'interno della falda, in cui l'aria calda immessa dall'esterno cede calore all'acqua di falda, solitamente più fredda rispetto alla corrispettiva esterna. «L'aria proveniente dalla falda è così fredda che spesso vicino all'apertura del pozzo venivano conservati i cibi. Il raffreddamento è efficace anche nelle notti prive di vento, quando la torre opera come camino»¹²⁶ (fig.150).

150



Un ulteriore sistema di raffreddamento passivo è quello definito "a cisterna". La cisterna è un serbatoio profondo dai 10 ai 20 metri, scavato nel suolo e chiuso superiormente da una cupola nelle cui adiacenze sono disposte varie torri del vento. Lo scopo delle cisterne - alimentate da un sistema di acquedotti noti come *qanat* - è quello di preservare l'acqua ad una temperatura notevolmente bassa durante le stagioni più calde. Il funzionamento del sistema trae vantaggio dalle variazioni stagionali di temperatura nel deserto e dalle proprietà isolanti del suolo. D'estate la copertura a cupola accumula energia termica trasmettendo calore per irraggiamento all'aria e allo strato superiore dell'acqua. Prima che la risorsa idrica della cisterna si riscaldi completamente, l'acqua superficiale evapora e la corrente d'aria proveniente dalle torri del vento fa sì che il vapore caldo venga espulso dal foro di aerazione praticato sulla sommità della cupola evitando l'inconveniente che possa ricadere nella cisterna per sublimazione inversa (fig.151).

151



Anche in Italia, presso Costozza sulle pendici dei Colli Berici sono presenti delle ville costruite a partire dal 1550 che sono climatizzate naturalmente mediante un sistema di raffrescamento passivo che sfrutta una serie di cavità naturali sotterranee dette "covoli", scavate in età romana per l'estrazione della pietra. «I covoli, dove la temperatura rimane pressoché costante durante tutto l'anno con valori attorno agli 11-12 gradi, sono stati collegati alle ville soprastanti direttamente o tramite camini artificiali lunghi fino a qualche centinaio di metri chiamati "ventidotti". Covoli e ventidotti sboccano così nelle cantine delle ville, di qui l'aria fresca penetra nei locali soprastanti attraverso rosoni traforati posti sul pavimento delle stanze»¹²⁷ (fig.153). Il progetto storico, ma di grande attualità, rappresenta una raffinata modalità di raffrescamento passivo geotermico *ante litteram* descritto da Vincenzo Scamozzi (Vicenza, 1548 – Venezia, 1616) nel "Libro Terzo dell'idea dell'architettura universale"¹²⁸ e da Andrea Palladio (Padova, 1508 – Maser, 1580) nel capitolo "de' camini" de "I quattro libri dell'architettura", in cui afferma: «Quasi nell'istesso modo i Trenti,

gentiluomini vicentini, a Costozza, lor villa rinfrescano l'estate le stanze: perciocché essendo nei monti di detta villa, alcune cave grandissime, che gli abitatori di quei luoghi chiamano covoli, e erano anticamente petraie, della quali credo intenda Vitruvio, quando nel secondo libro, ove tratta le pietre, dice, che nella Marca Trivigiana si cava una sorte di pietra, che si taglia con la sega, come il legno. Nelle quali nascono alcuni venti freschissimi, questi gentiluomini per certi volti sotterranei, ch'essi dimandano ventidotti; gli conducono alle loro case, e con canne simili alle sopraddette conducono poi quel vento fresco per tutte le stanze, otturandole e aprendole a lor piacere per pigliare più e manco fresco secondo le stagioni. E benché per questa grandissima comodità sia questo luogo meraviglioso; nondimeno molto più degno di essere goduto e visto lo rende il carcere de' venti che è una stanza sotterra fatta dall'eccellentissimo signor Francesco Trento e da lui chiamata *Æolia*: ove molti di detti ventidotti sboccano: nella quale per fare che sia ornata e bella e conforme al nome, egli ha sparagnato né a diligenza, né a spesa alcuna»¹²⁹.



152. Nella pagina precedente: torri del vento di un sistema di raffrescamento passivo "a cisterna" nell'area di Yazd, Iran, © Unsplash free.

153. Ingresso del ventidotto di Villa Garzadori da Schio a Costozza, Longare, © Sergio Zeiger.

Un altro esempio di architettura litica attraversata dal vento è rappresentato dal *trullo*, una tipologia di architettura spontanea realizzata in pietra a secco presente sull'altopiano pugliese della Murgia (fig.154).

L'architettura a *thòlos* del trullo fa parte di quella tipologia architettonica a pianta circolare con copertura a cupola costruita in pietra a secco. Si inserisce in quella categoria di architetture primitive molto diffuse e variegata in diverse aree del mediterraneo e del Nord Europa (come le *tholos* cretesi-micenee; le case celtibere dette *citânia* in Portogallo; le *casite* istriote; le *barraques* in Catalogna, i *bories* in Francia, i *kazumi* croati, le *clochans* della Scozia e dell'Irlanda, i *nuraghi* sardi, le *capanne abruzzesi* in pietra a secco sul massiccio della Majella, etc.) (figg.155-158).



154



155



157



156



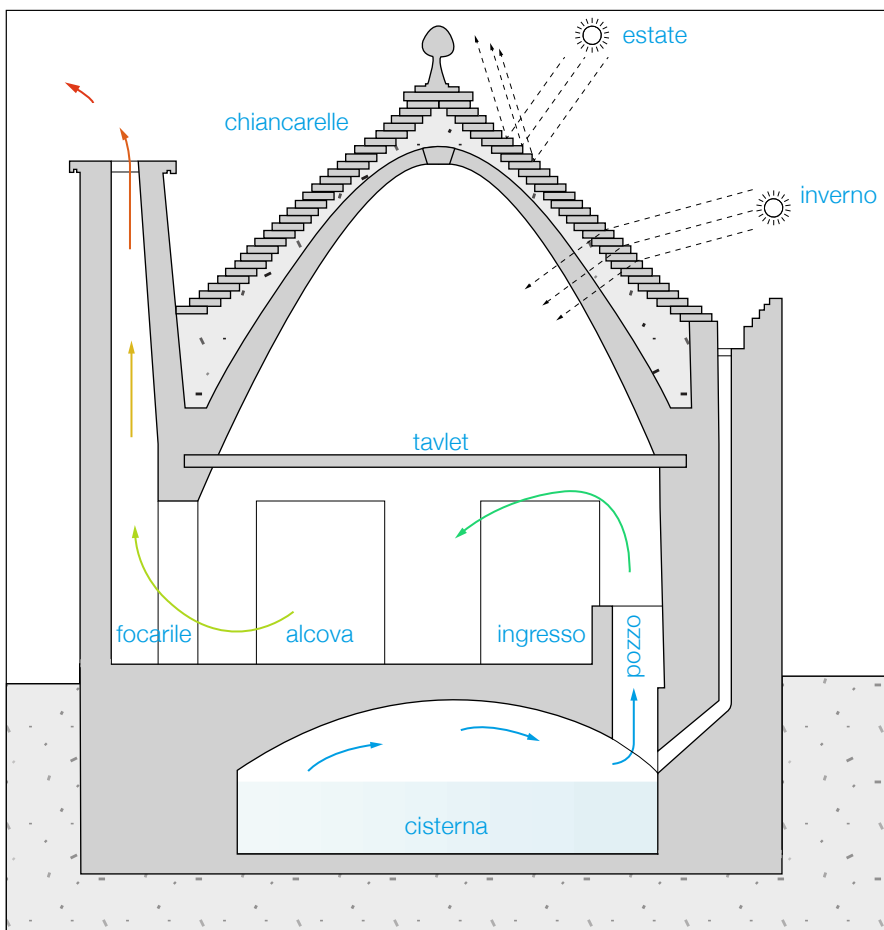
158

154. Nella pagina precedente: trullo nell'altopiano pugliese della Murgia.
155. Nella pagina precedente: *citânia* de Briteiros nel sito archeologico di Idade do Ferro, Guimarães - Braga, Portogallo, © Flickr - Manuela Marques & Rui Osório.
156. Nella pagina precedente: *casita istriana* nei pressi della città croata di Dignano, © Litany.
157. Nella pagina precedente: *bories* nel sito di Bories e Roussillon, Francia.
158. Nella pagina precedente: *clochan* dell'Oratorio di Gallarus, a Baile na nGall nella contea del Kerry, Irlanda, in www.richmorganphotos.com.
159. Schema funzionale del sistema di raffrescamento passivo di un trullo, architettura tipica dell'altopiano pugliese della Murgia.

I trulli nascono, quindi, dalla propensione dell'uomo nell'adattarsi ad un contesto ambientale costruendo manufatti derivati dall'impiego di risorse disponibili in loco e affinando tecniche tradizionali sviluppatesi con l'esperienza e tramandante di generazione in generazione in maniera empirica.

La pietra necessaria per la costruzione del trullo viene ricavata dallo scavo della cisterna per la raccolta dell'acqua piovana. La cisterna - alimentata mediante un canale di regimentazione delle acque meteoriche raccolte dalla copertura - ha solitamente un'altezza di 60-100 cm chiusa superiormente con una cupola ribassata. Essa non costituisce solo una preziosa scorta di acqua piovana, ma rappresenta un congeniale sistema di raffrescamento passivo dell'ambiente interno attraverso la ventilazione naturale regolata dal "focarile", una stanza-camino destinato alla cottura dei cibi. In estate, invece, il focari-

le funge da torre del vento per la mitigazione dell'aria calda. Le fondazioni del trullo sono realizzate direttamente sulla roccia affiorante sopra le quali viene elevata la muratura portante, realizzata con doppio paramento in pietra sbazzata legata con terra rossa (comunemente chiamata "bolo" o "vuolo")¹³⁰ e riempimento in materiale inerte. Lo stesso impasto di bolo è utilizzato per impermeabilizzare la cisterna e per realizzare lo strato di rinzafo dell'intonaco esterno, completato con arriccio di grassello di calce impastato a tufina e paglia e finitura con scialbo di latte di calce. A seconda della grandezza del trullo, le murature possono essere perfettamente a piombo o presentare sulla pelle esterna una leggera inclinazione per mitigare le sollecitazioni di pressoflessione derivanti dalla spinta della copertura conica. Le murature hanno uno spessore variabile tra i 100 ed i 160 cm e costituiscono una massa con altissima capacità di accumulo termico, sfasamento e smorzamento. Le ridotte dimensioni delle aperture limitano le perdite di calore in inverno e l'entrata di aria calda in estate. La particolare volta del trullo di forma conica è caratterizzata da due strati: quello interno chiamato "candela" costituita da una serie di anelli in aggetto progressivo ed uno esterno costituito dalla giustapposizione sfalsata di pietre inclinate dette "chiancarelle" che, oltre ad assicurare la tenuta all'acqua, favorisce la riflessione (in estate) o l'assorbimento (in inverno) di calore. Data l'esiguità dello spazio interno, il volume della copertura conica presenta un solaio intermedio in struttura lignea ("tavlet") a cui si accedeva attraverso una scala a pioli utilizzato per conservare le riserve alimentari, gli attrezzi o come camera da letto per i bambini. Gli spazi destinati al riposo, invece, erano ubicati in apposite nicchie praticate nella muratura o in piccoli vani adiacenti al trullo chiamati "alcove". La pavimentazione del trullo è in basole di pietra calcarea. La copertura è completata con un pinnacolo decorativo e simbolico (fig.159).



1.3. La “facciata”, evoluzione tecnologica della parete esterna e facies di una moderna civiltà

Nella parabola storico-evolutiva della pratica del costruire, lo spazio creato dall'uomo delimitato da massive murature inizia a rispondere ai requisiti e alle funzioni dettati dall'utilizzo e dal benessere abitativo. «*Il risultato tecnico nasce dalla combinazione tra materiali, costruzione, assemblaggio e processo di produzione, ma anche dai requisiti connessi alla forza di gravità e ad altri dati e fattori fisici interni ed esterni*»¹³¹. È in questo momento che la facciata ed il rivestimento rispecchiano l'evoluzione tecnologica della parete esterna in un processo simbiotico che caratterizzerà le moderne civiltà e del suo relativo progresso.

Il disegno formale delle facciate come messaggio semantico e del libero sviluppo delle forme

Il tema delle facciate come evoluzione del sistema parete porta al vaglio della nuova civiltà medievale - oltre alle funzioni primarie di protezione dalle intemperie e di benessere abitativo - un altro aspetto: quello della percezione dell'edificio attraverso il suo volto, «*concetto che deriva per vie traverse, passando per il francese façade, dal latino facies*»¹³². Con tale termine si intende, quindi, una architettura che “guarda verso” il contesto in cui si trova, o che da quest'ultimo viene perce-



161

pito come un messaggio semantico primario e di forte impatto. Le superfici strutturali e non costruite dall'uomo sono sempre servite come supporto per comunicare messaggi di natura politica, amministrativa, commerciale o religiosa, ancor prima che la scrittura si rendesse disponibile come forma astratta di comunicazione (figg.160-161).

Per la prima volta si edificano organismi edilizi con una forma propria e definita da codici di co-

160. Fregio artistico dell'Ospedale del Ceppo a Pistoia (1512), opera di Benedetto Buglioni (Firenze, 1461 - Firenze, 1521), © Luca Bertinotti.

161. Affreschi della facciata delle case Cazuffi-Rella a Trento, opera di Margello Fogolin (Vicenza, 1483/88 - 1558), © Sailko.



160



162

162. Facciata della Cattedrale di San Martino a Lucca (1070).

struzione che lasciano percepire all'esterno una varietà di caratteristiche grafiche, strutturali, di colori, incisioni, rilievi ed effetti materici. Sulla facciata si creano così nuovi effetti che nascono dalla sovrapposizione, dalla compenetrazione e dall'alternanza degli oggetti esposti o dal rapporto pieno/vuoto, muratura/apertura, luce/ombra. Si ottengono, quindi, intensità luminose differenti o mutevoli ed effetti di luce e ombra sul volume complessivo e sulle sue parti (fig.162). La logica della stereometria muraria viene accantonata a favore del libero sviluppo delle for-

me: ne deriva un'alternanza di superfici arrotondate, a curvatura semplice o doppia, che vengono messe in relazione con superfici piane a giacitura orizzontale, verticale, inclinata, sagomate o arricchite da altre membrature secondarie. L'aspetto caratteristico di ogni facciata e della forma del rivestimento è, quindi, esercitato dai fattori locali, dal tipo di società che risiede in una determinata area geografica, dalla sua storia ed etnografia, dal suo orientamento ideologico, dal clima del luogo o dalla disponibilità o meno di risorse locali. È così che l'aspetto esteriore degli edifici si qualifica come testimone del trascorrere del tempo: basti pensare alle influenze architettoniche, artistiche ed etnografiche bizantine, longobarde ed arabe in sovrapposizione agli antichi stilemi romani e alle grandiose città italiche a seguito della caduta dell'Impero Romano d'Occidente; alle grandiose cattedrali gotiche, la cui struttura litica diviene mezzo simbolico per arrivare a Dio; ai monumentali portici dell'età comunale (XI secolo), ricavati vuotando la base delle facciate prospicienti piazze, cortili e giardini; alle facciate "baroccheggianti" come supporto iconografico ornato di rilievi, sculture, pitture, mosaici, tutti oggetto della più raffinata arte decorativa. L'aspetto caratteristico di ogni facciata attraverso materiali, colori, proporzioni, volumetria e forma plastica indica le funzioni dei manufatti o il significato da attribuire ad essi.

Numerosi sono gli esempi che mostrano in quale misura, soprattutto nel Rinascimento, con il fiorire dell'Umanesimo, la parete esterna venne enfatizzata fino a diventare una vera "parete espositiva".

Tale sviluppo si accentua, come detto, in età barocca in cui le facciate rivolte verso strade e piazze si trasformano in grandiose opere scenografiche, finendo per svincolarsi quasi del tutto dalla struttura dell'organismo edilizio rivaleggiando con altre facciate esterne quanto a sovrabbondanza di forme, materiali pregiati e opere artistiche.



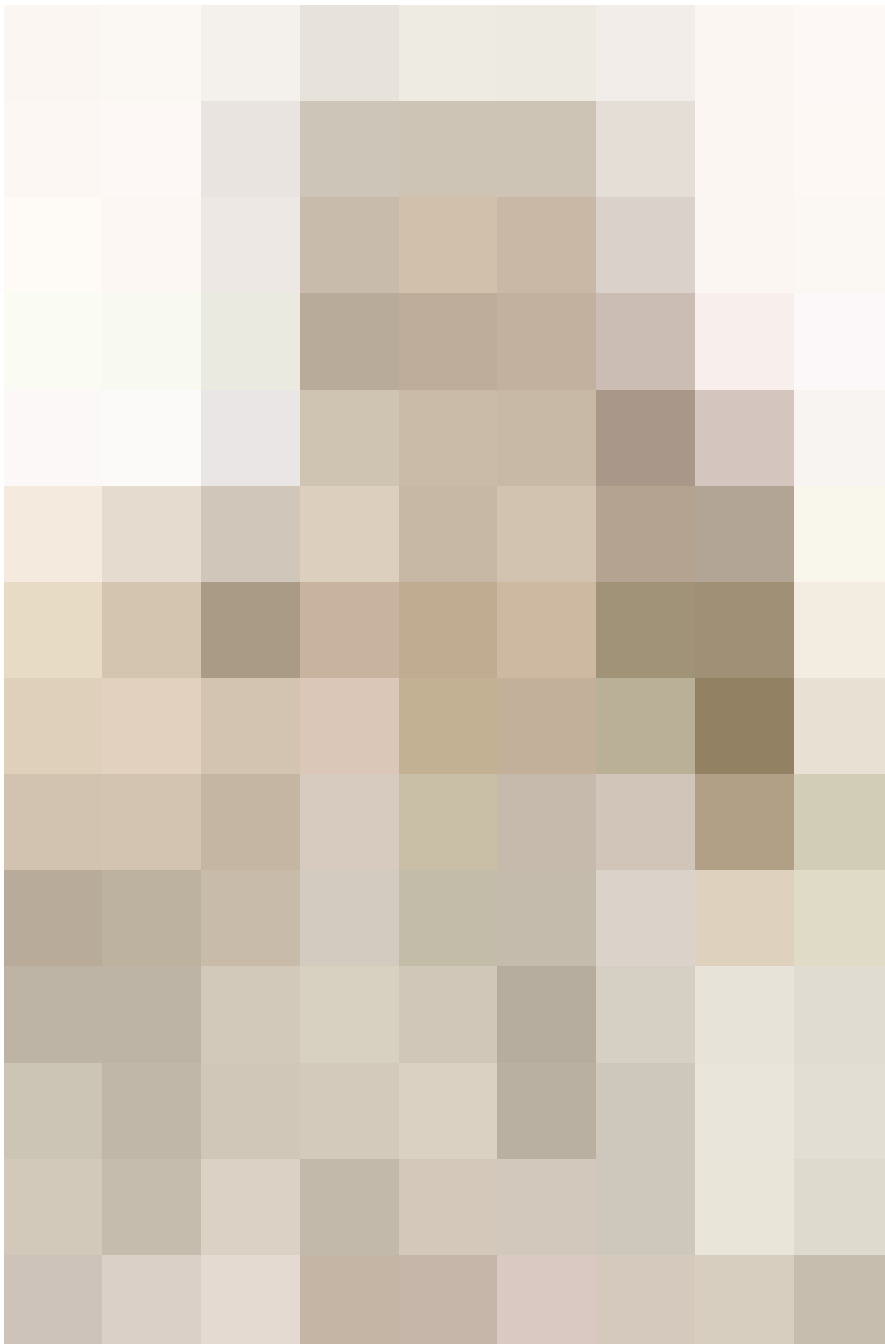
La facciata nel Medioevo, nel Rinascimento e nel Barocco come principio formale, espressivo, funzionale ed iconografico

Nel Tomo V del "Dictionnaire raisonné de l'architecture française du Xle au XVIe siècle", Eugène Viollet-le-Duc descrive l'elemento architettonico "facciata" come «qualsiasi ordinanza architettonica che si affaccia sull'esterno, sulla pubblica via, su un cortile, su un giardino. Ma è solo dal XVI secolo, in Francia, che le facciate sono state erette come decorazione davanti

a un edificio, senza preoccuparsi troppo del rapporto di questa pittura con la disposizione interna. Né gli antichi né gli architetti del Medioevo sapevano cosa volesse dire avere una facciata eretta con il solo pensiero di compiacere gli occhi dei passanti. Le facce esterne dei bei monumenti dell'antichità o del Medioevo sono solo l'espressione delle disposizioni interne. Per le chiese, ad esempio, le facciate principali, quelle opposte all'abside, non sono altro che la sezione trasversale delle navate»¹³³.

163. Facciata del Convento di Moldau, Sucevita, Romania (XVI secolo).

164. Elaborazione grafica di una casa-torre medievale.



Dalla descrizione fornita da Viollet-le-Duc il sistema facciata fino al XVI secolo è in stretta connessione con l'organismo architettonico, relegato ancora alla rigidità della muratura portante, soprattutto per quanto riguarda le grandi opere religiose e monumentali. La struttura morfologica della facciata, come afferma sempre l'architetto teorico francese è espressione della distribuzione interna dell'edificio esso sia una chiesa o una abitazione (fig.164).

Facciate lignee medievali

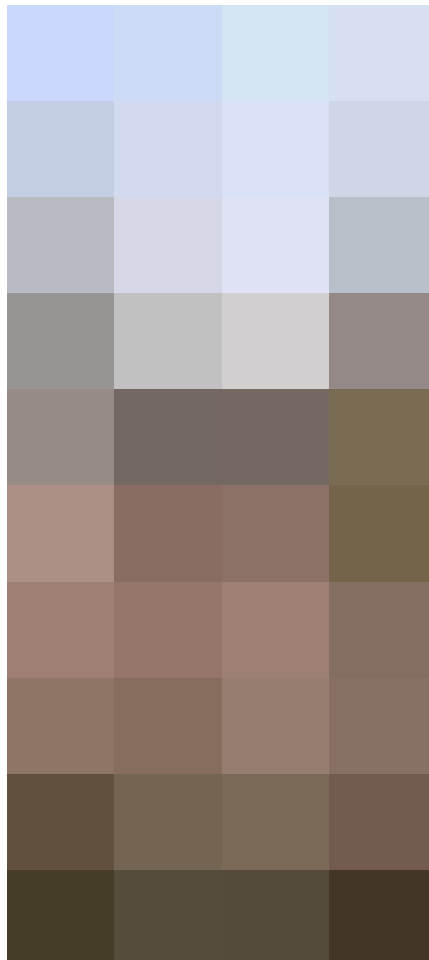
La struttura dell'architettura civile nel Medioevo è sostanzialmente muraria in cui le facciate dei palazzi più prestigiosi sono articolati da arcate, trifore, logge e merlature, mentre nell'edilizia privata le aperture non seguono codici di armonia e simmetria ma di funzionalità. Le abitazioni in pietra dalle sembianze molto modeste, soprattutto in contesti urbani, erano realizzate per lo più con materiale di spoglio proveniente da più antichi edifici di età classica. In questo periodo l'uso di pietra da cava è molto meno diffuso rispetto al passato, così come la produzione del laterizio e della malta, mentre è preponderante l'impiego del legno da costruzione dove appare evidente come le strutture lignee ripresero tecniche locali di romana memoria.

Nell'architettura di culto, invece, già in quella paleocristiana e successivamente in quella romana, con l'adozione dell'impiant-



165

to basilicale a tre o cinque navate, la facciata chiesastica assume la forma “a capanna”, la cui scansione a salienti fornisce una lettura immediata del numero di navate dell’impianto dell’edificio di culto. Diversi monasteri europei dell’VIII secolo, conservano ancora le antiche conoscenze costruttive, spesso riadattando antichi impianti in luoghi liturgici coevi e reimpiegando colonne e capitelli di età classica, come nel caso del monastero di San Salvatore e di Santa Giulia a Brescia (753), in parte realizzato da maestranze locali, in parte di influenza estetica e costruttiva longobarda (fig.165). Cambiano, invece, alcuni espedienti costruttivi e decorativi che scandiscono la facciata in una serie di artifici come l’impiego di logge, pronai, bifore, trifore, contrafforti, opere pittoriche e scultoree, etc.. Nell’Europa centro-settentrionale, invece, si diffonde il *Westwerk* che condizionerà numerose facciate romaniche e gotiche con la realizzazione di un vero e proprio avancorpo lambito da imponenti torri a chiusura dell’impianto chiesastico (fig.166).



166

165. Navata centrale della Chiesa di San Salvatore a Brescia, fondata nel 753 dal duca di Brescia Desiderio, futuro re dei Longobardi, © Alessandra Chemollo.

166. Westwerk della Chiesa dei Santi Stefano e Vito del complesso abbaziale di Corvey nell’odierna Renania Settentrionale-Vestfalia, © Tsungam.

L'architettura relativa le residenze del potere in questo periodo di transizione, invece, furono realizzati in legno, soprattutto nel Nord Europa, dove élite di carpentieri Franchi e Anglosassoni costruirono nuovi palazzi in legno, spesso fortificati all'interno di palizzate. Per la costruzione dei palazzi alto-medievali e medievali viene impiegato il legno secondo tecnologie particolari, in grado di attribuire una forte resistenza alla struttura, la cui solidità non risulta inferiore a quella degli edifici in pietra¹³⁴.

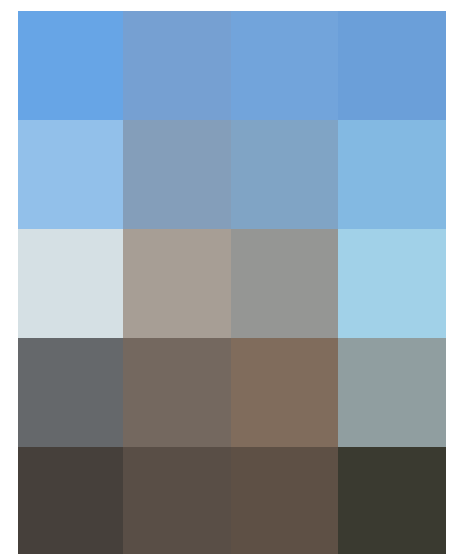
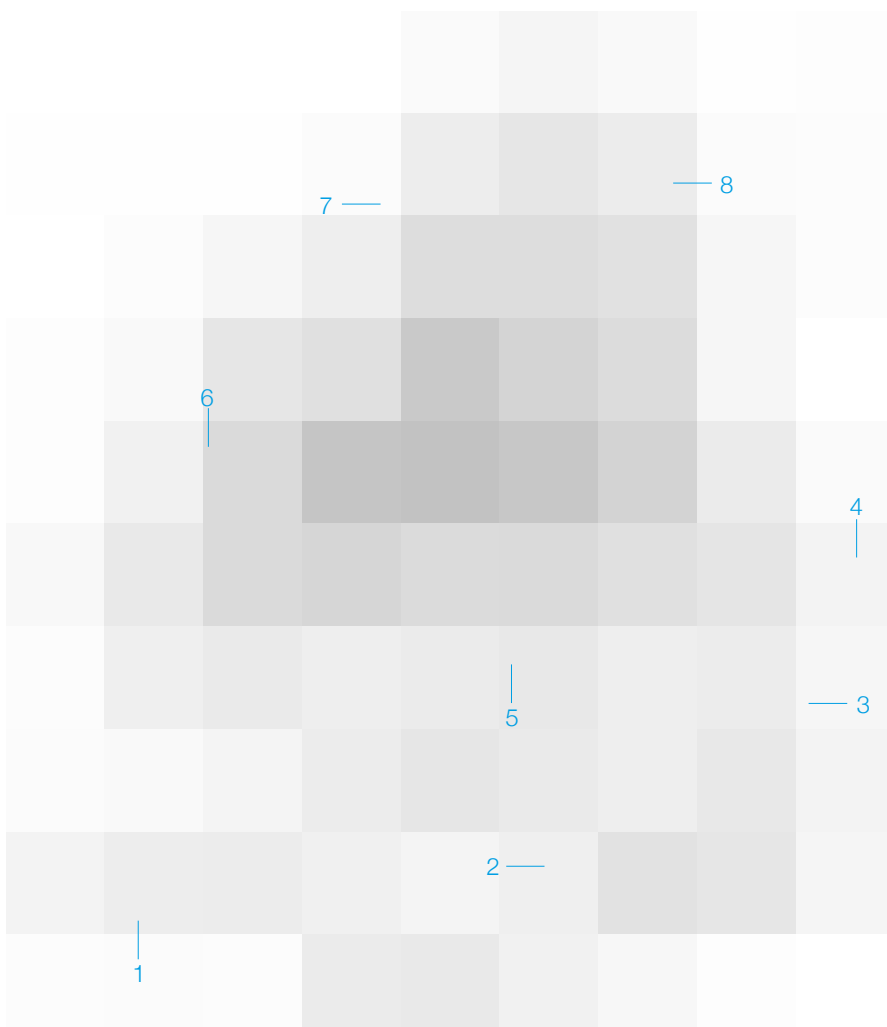
In Norvegia, per esempio, si realizzano le *Stavkirke*, chiese su pali ("stav" in lingua norrena) portanti realizzate interamente in legno (anche gli elementi di connessione), desunte dalle tecniche tradizionali Vichinghe per la costruzione delle imbarcazioni e delle palizzate. In un primo momento probabilmente le travi verticali di legno erano

inserite direttamente nel terreno, mentre successivamente si cominciò a posizionare la struttura lignea al di sopra delle fondazioni in pietra, in modo tale da evitare la precoce marcescenza del legno dovuta al contatto diretto con il terreno¹³⁵. «La concezione statica, basata sull'irrigidimento (soprattutto trasversale) dell'insieme, crea un sistema indeformabile costituito da un'intelaiatura a scatola con più pali portanti raccordati tra loro da travi orizzontali, in cui il trasferimento delle forze alle varie membrature è affidato ai puntoni delle navate laterali, alle capriate "a forbice" ed alle mensole "a quadrante". Le pareti esterne delle navate laterali, di tavole massicce, sono incastrate, alla base, in una traversa collegata alla trave di fondazione e alla sommità, in un longerone di rilevante sezione. Caratteristici i tetti, su più livelli, con pendenza delle falde molto accentuata»¹³⁶ (figg.167-169).

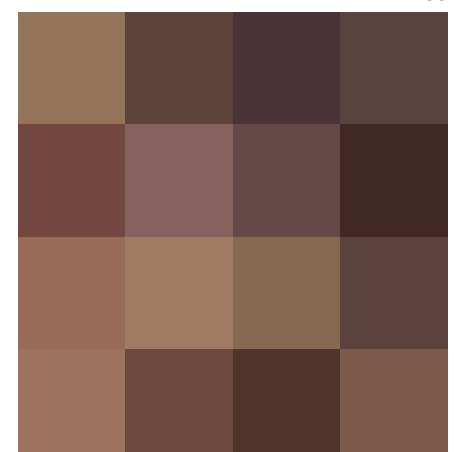
167. Particolare tecnologico della Stavkirke, chiesa su pali portanti in legno ("stav").
Legenda: 1 zattera lignea; 2 palo ligneo (stav); 3 rivestimento in doghe in legno; 4 pentice lignea (sbalzo copertura); 5 trave lignea; 6 staffa ad arco per collegamento dei quadranti; 7 capriata della tipologia "a forbice"; 8 arcarecci di copertura.

168. Stavkirke di Heddal presso Notodden in Norvegia (XIII secolo), © Delabat.

169. Particolare del rivestimento in scandole lignee della facciata e della copertura della Stavkirke di Heddal presso Notodden in Norvegia (XIII secolo), © Giorgio Panzeri.



168



169

Si distinguono dall'esempio norvegese i sistemi costruttivi del *Blockbau* (costruzione a blocco), del *Fachwerkbau* (costruzione a graticcio) e dello *Stabbau* (costruzione in tronchi o assi verticali, sistema adottato per la costruzione delle *Stavkirke*).

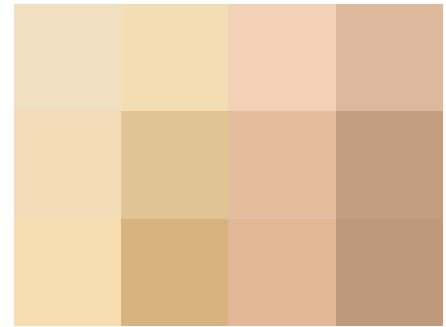
Il *Blockbau* è un tipo di costruzione massiccia in legno in cui tronchi di albero vengono giustapposti orizzontalmente a formare le pareti e mutuamente incastrati negli angoli in appositi giunti ricavati intagliando l'elemento ligneo. I giunti sono della tipologia "a culla" (intaglio circolare sulla parte superiore di ogni tronco), "a scanalatura" (intaglio regolare sia sulla parte superiore, sia inferiore del tronco), "a cuneo" (figg.170-173).

Il *Fachwerkbau* è un sistema costruttivo "a graticcio" ligneo, diffuso in tutta Europa a partire dal 1200, costituito da una griglia costituita da travi lignee (con essenze legnose resistenti alle intemperie quali la farnia, il rovere o l'abete), disposte verticalmente ed orizzontalmente e irrigidite da elementi lignei di controventamento. Gli interstizi del telaio ligneo (dal tedesco "*gefach*", "spazio") venivano tamponati con una cannicciata di rami sottili (in genere appartenenti alla famiglia delle salicacee) rivestita da argilla, *silt* o materiali limosi (fig.174). La facciata geometricamente definita dalla struttura a graticcio veniva spesso impreziosita mediante l'inserimento di ulteriori elementi lignei staticamente passivi finemente intagliati con dei bassorilievi. Le tamponature, invece, venivano tinteggiate o decorate.

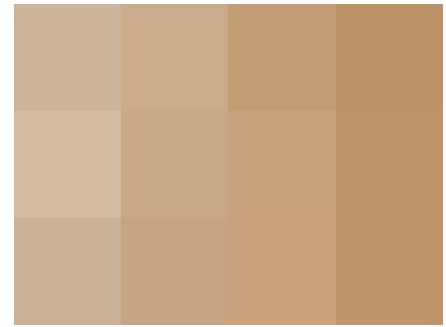
Il passaggio dall'edilizia abitativa lignea a quella in pietra è fondamentale nella storia della civiltà: nelle città mediterranee, soprattutto nell'Italia del Nord, la costruzione di edifici in materiali litici avvenne già a partire dai primi secoli del Bassomedioevo; nelle aree mitteleuropee si verificò solo nel XVII secolo, mentre nell'Est europeo solo alle soglie dell'Età contemporanea. Le ragioni di tali differenze temporali vanno ricercate non solo nella



170



171



172



173



174

170. Nella pagina precedente: sistema costruttivo Blockbau.
171. Nella pagina precedente: giunto "a culla" del sistema costruttivo Blockbau.
172. Nella pagina precedente: giunto "a scanalatura" del sistema costruttivo Blockbau.
173. Nella pagina precedente: giunto "a cuneo" del sistema costruttivo Blockbau.
174. Nella pagina precedente: sistema costruttivo Fachwerkbau.
175. Sezione ipotetica di un tempio ellenistico e rappresentazione della capriata lignea, in Palladio A., *Quattro libri dell'Architettura*, Libro Quarto, tavola 31, Domenico di Franceschi, Venezia, 1570, pag. 328.
176. Leonardo da Vinci, analisi dell'equilibrio della capriata.



175

particolare conformazione geomorfologica del territorio e nella disponibilità di determinate risorse, ma soprattutto negli aspetti di carattere sociale ed economico. La presenza di ceti mercantili ed artigianali, soprattutto in Italia, porterà questo ceto ad ostentare il proprio status, affrontando operazioni edilizie complesse atte alla realizzazione di opere in pietra ed in laterizio. Il legno, invece, rimase confinato ed utilizzato per la costruzione di annessi, loggiati, sporti ed incastellature¹³⁷.

Il legno verrà riscoperto nel VI secolo ed abbondantemente impiegato nella configurazione spaziale delle travi e delle capriate in legno, oggetto di importanti studi soprattutto nel Rinascimento attraverso la lettura delle antiche tecniche romane¹³⁸ e greche per la realizzazione delle coperture di templi e delle basiliche cristiane, costituite da travi, puntoni, monaco (o *colonnello*) e catena (semplice o doppia) saldamente uniti tramite chiodature e/o fasce metalliche.

Mariano di Jacopo detto il Taccolla o l'Archimede di Siena¹³⁹ (Siena, 1381 - 1453 circa), infatti, prospetta diverse configurazioni di capriate in legno: una con il monaco strettamente collegato alla catena, una capriata senza catena ed una senza monaco e catena in metallo.

La pratica di distaccare il monaco dalla catena trova incerta datazione. Nel 1539 Giovanni Battista da Sangallo (Firenze, 1496 - Roma, 1548) raffigura una capriata a tre monaci



176

e due saette in cui i monaci sono evidentemente staccati dalla catena. «Tale sistema costruttivo appare plausibilmente suggerito dalla necessità di non interferire nella catena cui spesso erano appesi delicati soffitti lignei intonacati e quindi affrescati, oppure pseudo-volte realizzate con centine in legno intonacate all'intradosso»¹⁴⁰.

Nei trattati di Andrea Palladio, invece, non è presente nessun esempio di capriata con il monaco distaccato dalla catena, anzi, in alcuni disegni lo stesso è fortemente solidarizzato alla catena mediante chiodature, realizzando, di fatto, nodi prossimi all'incastro (fig.175). Inoltre, le capriate presenti nei trattati palladiani ricorrono spesso ad appoggi intermedi in quanto, come lo stesso Palladio ricorda: «quando i muri di mezzo vanno a tor suso le travi, facilmente si accomodano, e mi piace molto, perché i muri di fuori non sentono molto carico e perché marcendosi una testa di qual che legno, non è però la coperta in pericolo»¹⁴¹.

La prima esplicitazione scientifica del sistema statico della capriata è fornita da Leonardo da Vinci che seguendo il principio statico dell'arco, valuterà lo stato di sollecitazione della catena tramite un sistema di pesi e carrucole (fig.176). I risultati si pongono alla base degli studi illuministici scientifici di Jacob Leupold (Planitz, 1674 - Leipzig, 1727)- fra i primi a tentare l'analisi dello stato deformativo della capriata, considerandola come una trave unitaria a sezione variabile - di Bernard Forest de Bélidor (Catalonia, 1698 - Parigi, 1761) che nel celebre trattato *La Science des Ingénieurs* del 1729, introduce il concetto della scomposizione delle forze in elementi strutturali inclinati, di Jean-Baptiste Rondelet che per primo chiarisce il concetto del sistema del triangolo indeformabile della capriata, fino a giungere alle soglie del Novecento, in cui con Odone Belluzzi (Bologna, 1892 - Bologna, 1956) si completa il ciclo di analisi delle capriate e delle strutture reticolari, con l'introduzione del *metodo degli elementi finiti*.

Facciate litiche medievali

La perdita delle conoscenze costruttive romane favorì, come già detto, la diffusione delle architetture a struttura lignea sia per l'edilizia di rappresentanza (palazzi, chiese, fortezze, etc.), sia per l'edilizia residenziale.

Solo con la Rinascenza Carolingia (768-814 d.C.) e la riscoperta delle arti classiche, degli antichi trattati e degli strumenti utilizzati per la produzione di mattoni ed impasti di malta di calce, vennero edificate nuove forme architettoniche tardoantiche in pietra, relegate solo agli edifici più importanti, mentre l'edilizia comune continuava a essere incentrata sull'impiego del legno come risorsa principale.

Un'altra caratteristica di questo periodo è la definizione dei castelli e dei nuovi impianti monastici in tutta Europa, imperniati intorno al chiostro secondo i precetti monastici del modello benedettino riformatore Benedetto di Aniane (Villeneuve-lès-Maguelone, 750 circa – Aquisgrana, 821).

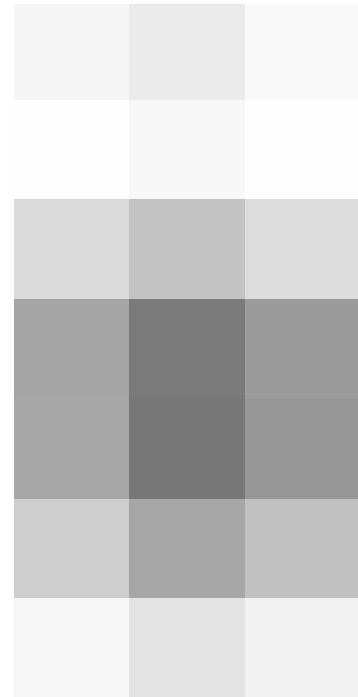
Gli stilemi e le tecniche costruttive caroline rappresentarono il punto di partenza della successiva diffusione dell'architettura e dell'arte romanica (X-XII secolo), in cui si riprese il concetto di estrazione della pietra di cava per la realizzazione di opere monumentali ed opere minori in contrasto all'uso preponderante della pietra non lavorata e dei materiali di spoglio delle antiche rovine¹⁴².

Le costruzioni in blocchi lapidei del tardo Romanico borgognone, anglosassone, catalano, lombardo, etc. sono riflesso evolutivo dell'antica arte di lavorazione della pietra da parte degli scalpellini, le cui capacità sono rintracciabili anche nella coeva architettura civile.

Un esempio sono le *casetorri* (o *casa torre*), costruzioni fortificate con funzioni sia abitative che militari diffuse dall'Asia (come l'insediamento di case torri in Inguscezia nel Caucaso) (fig.177) all'Europa (soprattutto nelle città medioevali centro-settentrionali italiane) (fig.178).

177. Antico insediamento di case torri in Inguscezia, sulle pendici settentrionali del Caucaso, © Vyacheslav Argenberg, www.vascoplanet.com.

178. Rappresentazione assonometrica di una casa torre europea.



178



174



(*opus romanum*), in pezzame lapideo (*opus antiquum*, *opus incertum* o *opus rusticum*) (fig.179), in opera mista (*opus mixtum*), in opera cementizia e lapidea (*opus caementicium*, *opus fusile*), in muratura a sacco (*opus implectum*) (fig.180) ed in muratura con elementi lapidei solidarizzati da grappe metalliche (*opus revinctum*)¹⁴³ (fig.181). La continuità tecnica fra i due sistemi d'apparecchiatura muraria (romana e medievale) coincide con una fase storica contraddistinta dall'aumento demografico e dal conseguente aumento dell'attività edilizia, ma che però presenta alcuni lievi differenze. Alla tecnica medievale, infatti, era richiesta una esecuzione veloce ed economica associata, però, ad un risultato estetico decoroso poiché la struttura muraria era lasciata a vista. Si svilupparono alcune peculiari caratteristiche della muratura medievale, volte alla regolarizzazione e finitura della superficie, della regolarità degli allineamenti, l'altezza costante dei filari, la squadratura dei blocchi e l'*allisciatura* dei giunti di malta¹⁴⁴.

179

179. Paramento murario in pietra sbazzata da taglio (*opus antiquum*).

180. Muratura a sacco (*opus implectum*).

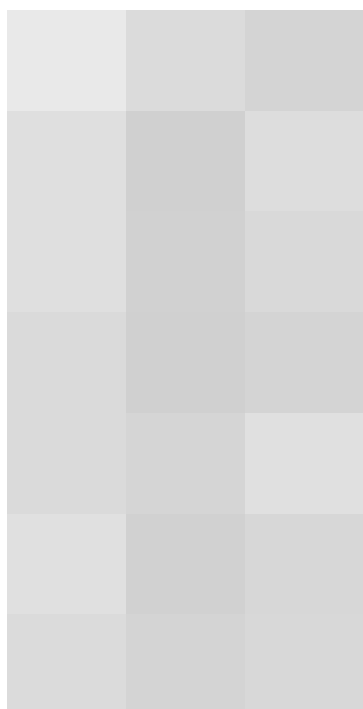
181. Collegamenti dei blocchi con grappe e perni metallici (*opus revinctum*).

In varie città italiane una ripresa dell'attività edilizia era certamente già in atto nel X secolo e si consolidò nei due secoli successivi. In alcune zone si assiste ad un'evoluzione parallela anche in ambito rurale, indicata dal miglioramento delle tecniche costruttive per la realizzazione di murature, che trovarono nella tipologia a sacco del XII secolo, la versione più completa e maggiormente resistente.

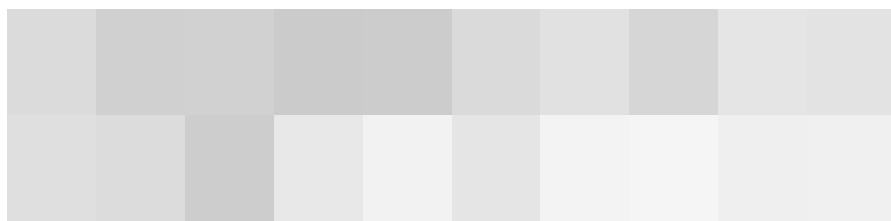
Con il miglioramento delle caratteristiche delle murature, già a partire dal X secolo era diffusa la tendenza allo sviluppo in altezza degli edifici. Si diffusero anche edifici in muratura che tendevano a disporsi con il lato corto sul fronte stradale e che in una fase più matura si tradussero in nuove tipologie con portici e loggiati addossati alla facciata del piano terra per ospitare le attività produttive e commerciali.

Le diverse tipologie di opere murarie desunte dall'ingegno costruttivo romano, permangono e si diffondono durante il Medioevo. Questo vale per le costruzioni in pietra o a blocchetti (*opus italicum*), in mattoni di laterizio (*opus latericium*), in pietra sbazzata da taglio

In ambito urbano, la crescita del tessuto abitativo fu segnata da una progressiva saturazione degli spazi ineditati, mediante l'accorpamento e la giustapposizione degli edifici, che diedero vita agli allineamenti di case a schiera, modello diffuso in tutta Europa¹⁴⁵.



180



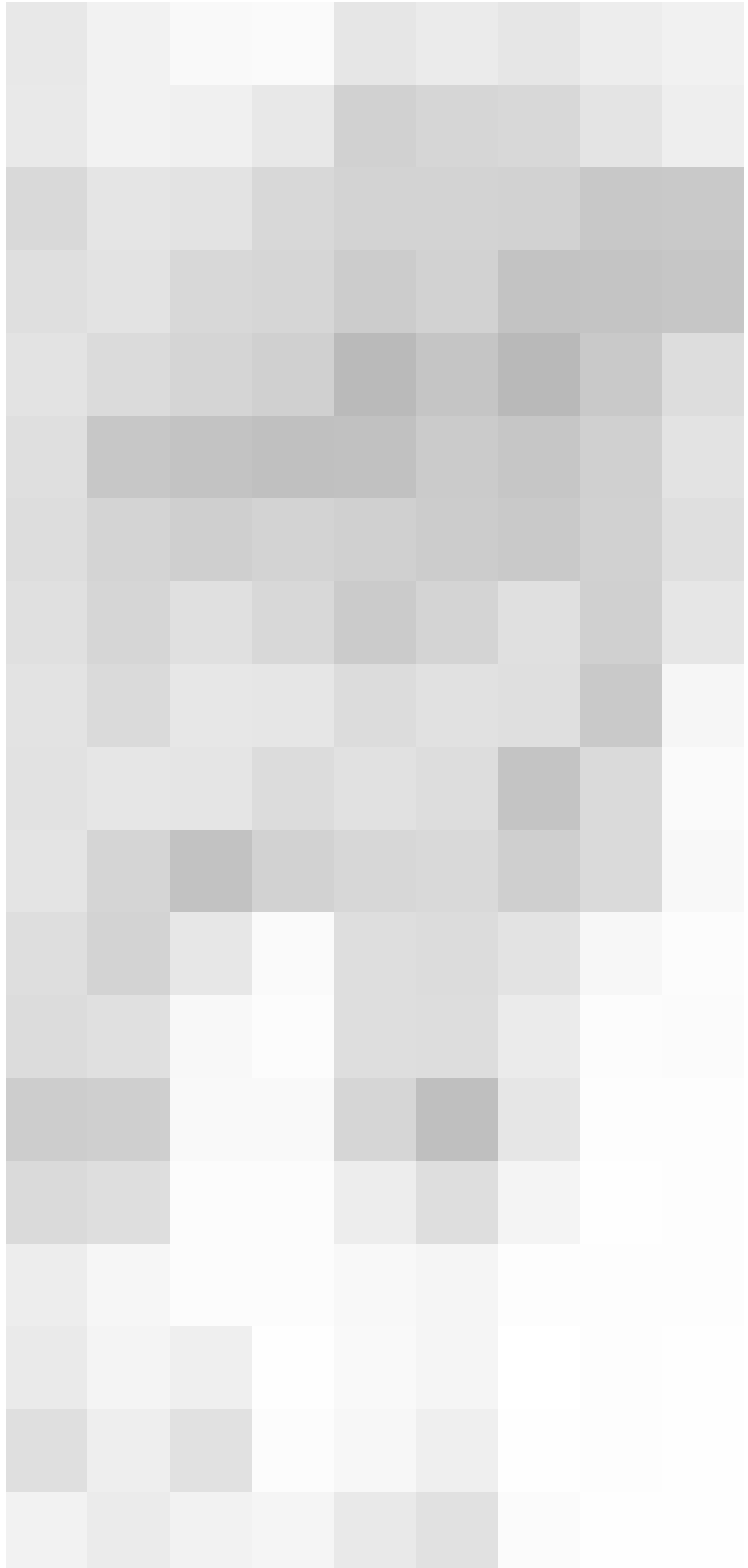
181

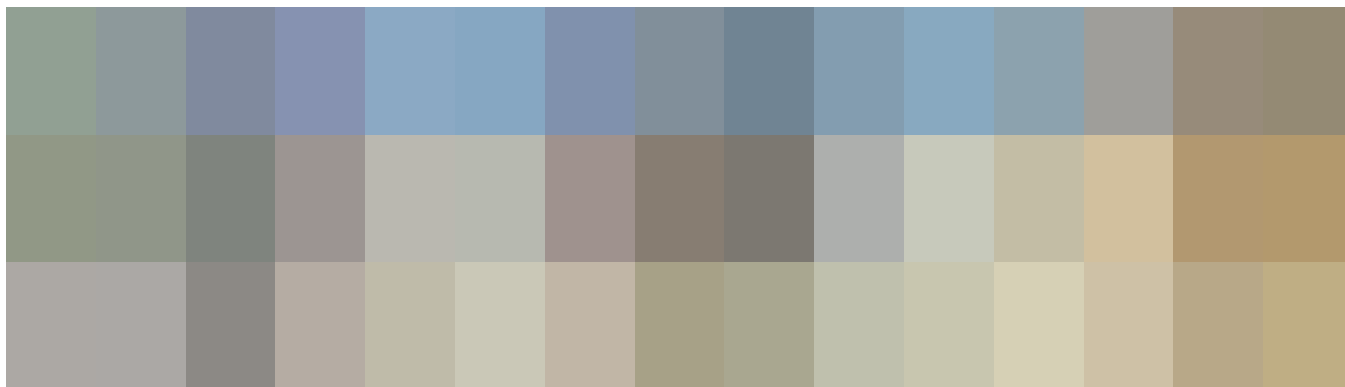
Dal tardo romanico al Gotico, lo sviluppo in altezza degli edifici viene esasperato nella costruzione delle grandiose cattedrali, le cui facciate sono rese svettanti da archi a sesto acuto che emergono dai frontoni appuntiti, da torri altissime, da intaccature e risalti in bicromia e dalle grandiose e sottili colonne polilobate, in grado di esaltarne la verticalità strutturale.

I primi che si fecero promotori nella creazione di ampi vuoti nelle superfici opache lapidee furono, infatti, gli scalpellini delle architetture gotiche. La massività dei corpi di fabbrica di chiese e cattedrali furono ridotti alla sola ossatura di elementi portanti e di appoggio sollecitati quasi esclusivamente a compressione. L'involucro si evolse in una struttura composta di nervature e volte, superfici murarie, archi rampanti, piloni e costolonature (fig.182).

L'apparato scultoreo-architettonico gotico esalta e arricchisce il processo, mentre la struttura e la distribuzione spaziale interna si manifestano in facciata con una chiara tripartizione verticale, sottolineata dalle torri laterali e dai risalti dei contrafforti, ma anche dalla concatenazione delle bucatore, collegate da cuspidi o altri elementi.

Anche ambienti liturgici secondari come il transetto, assumono notevole importanza con lo scopo di esaltare e sottolineare lo sviluppo delle facciate laterali: le testate si staccano dal piano retrostante e si caratterizzano per la dialettica tra linee orizzontali e verticali, con lo svuotamento del settore centrale stretto tra esili piloni, la leggerezza dei montanti delle bifore che si susseguono senza soluzione di continuità e la moltiplicazione di cuspidi e pinnacoli sovraccariche di decorazione, in alcuni casi trasponendo letteralmente la spazialità interna¹⁴⁶.





183

182. Nella pagina precedente: Le-Duc V., *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, Tomo IV, «Construction - Voûtes», Édition Bance – Morel, 1854-1868, pag.62.

183. Pittore dell'Italia centrale (già attribuita a Luciano Laurana), *Città ideale*, 1480-90, Galleria Nazionale delle Marche, Urbino.

184. Francesco Maurizio di Giorgio di Martino Pollaiuolo, *Veduta architettonica ideale*, 1490-1500.

Iconologia delle facciate Rinascimentali e barocche

Nel Rinascimento, con il fiorire dell'Umanesimo e della progressiva rivalutazione dell'autonomia dello spirito individuale (*homo faber ipsius fortunae*, «l'uomo è artefice della propria sorte»¹⁴⁷), la facciata esterna viene enfatizzata fino a divenire una parete da esposizione, assumendo una autonomia rispetto all'interno. L'importanza della facciata risiede molto più negli aspetti tecnici e funzionali: il suo divenire un mezzo per ottenere un particolare effetto architettonico attraverso l'architettura viene concepita, infatti, come scienza matematica e armonica¹⁴⁸ ed attraverso la codifica della prospettiva lineare, fondamento dell'antropocentrismo rinascimentale (figg.183-184).

La rigida geometria, l'ordine armonico, la serenità formale dell'architettura sono considerati l'espressione della perfezione, dell'onnipotenza, della verità e della bontà di Dio, definibile quindi geometricamente attraverso i simboli del cerchio (pianta circolare) e della sfera (la cupola, che secondo Marsilio Ficino è assimilata al cielo)¹⁴⁹. Antonio di Pietro Averlino, detto il Filarete (Firenze, 1400 circa – Roma, 1469) descrive questa analisi cosmico-filosofica con semplici considerazioni: un edificio circolare è rasserenante, perché lo sguardo del fedele non incontra ostacoli¹⁵⁰.

A Firenze, culla del Rinascimento, architetti eruditi fiorentini studiano la maniera classica delle costruzioni antiche e medie-



184

vali ed i relativi schemi compositivi. Il tratto distintivo dei primi esempi rinascimentali è rappresentato - rispetto alla tradizione medievale - di composizioni architettoniche complessivamente più ordinate che trovano nella facciata, l'elemento caratteristico e caratterizzante la nuova città. Si sviluppa una inedita tipologia abitativa, costituita come un blocco architettonico autonomo di notevole dimensione, a formare un intero isolato urbano. Il disegno dell'architettura e delle facciate non è affidato più alle maestranze locali, ma ad artisti ed architetti che reinterpretano il tema del volume edilizio, dell'organizzazione spaziale, delle accresciute superfici murarie, fra cui s'impone, per importanza gerarchica, la facciata principale su strada¹⁵¹.

All'assetto disarticolato dell'architettura medievale, si contrappone la linearità dei palazzi rinascimentali segnati unicamente da cornici marcapiano, bucatore, aperture secondo una concezione avviata già da Filippo Brunelleschi (Firenze, 1377 – Firenze, 1446) e da Michelozzo di Bartolomeo Michelozzi (Firenze, 1396 – Firenze, 1472), all'interno del quale la facciata, trattata nei casi più importanti a bugnato, diventa il principale elemento di qualificazione formale e, conseguentemente, di ostentazione sociale¹⁵².

Nell'edilizia privata l'uso delle bucatore non segue canoni di regolarità e simmetria ma di funzionalità, variando collocazione, forma e dimensioni a seconda dell'ambiente da illuminare. A partire dal Rinascimento, soprattutto italiano, la facciata di palazzo è simmetrica, con l'ingresso sull'asse e le bucatore disposte a intervalli regolari in genere su tre piani, divisi da cornici marcapiano. In alcuni casi la facciata sul giardino è aperta da logge (palazzo Piccolomini, Pienza) (fig.185). Con la ripresa del linguaggio classico si passa dalle bifore alle finestre rettangolari, modanate, o coronate da frontone, o a edicola. Il piano terra può essere caratterizzato da botteghe, aperte su strada con



185

arcate a tutto sesto o piattabande. La facciata è a bugne con aggetto degradante (palazzo Medici a Firenze), in laterizio, con rivestimento lapideo, oppure intonacata. Gli ordini architettonici possono ritmare la facciata, sovrapposti (palazzo Rucellai, Firenze), limitati a un livello, estesi a tutta l'altezza dell'edificio o essere assenti (figg.186-191).

L'incremento delle dimensioni del palazzo ed il potenziamento della sua visibilità architettonica mediante un sostenuto bugnato chiaroscurole in *pietraforte* (pietra arenaria a grana fine tipica dell'edilizia fiorentina), in pietra serena e con rivestimenti “commessi” in marmi bianchi e policromatici (rosso, verde serpentino, etc.), sono in relazione allo status economico e alle ambizioni del mecenate e del popolo. Tra questi il facoltoso Giovanni Rucellai conferì all'Alberti e al Rossellino l'incarico per il progetto di ampliamento della sua dimora cittadina. La facciata del palazzo, completamente in *pietraforte*, si pone come un restituzione ‘piatta’ del bugnato e con un prospetto scandito da lesene, ponendosi come variante tipologica delle facciate fiorentine, nel mezzo tra i palazzi “a bozze rustiche” ed i palazzi ad intonaco affrescato.

185. Dettaglio del raccordo tra facciata e loggia del Palazzo Piccolomini (Bernardo Rossellino, 1459), Pienza.

186. Nella pagina seguente: Palazzo Gondi (Giuliano da Sangallo, 1490-1498), Firenze, © Archivio Fotografico Marchesi Gondi.

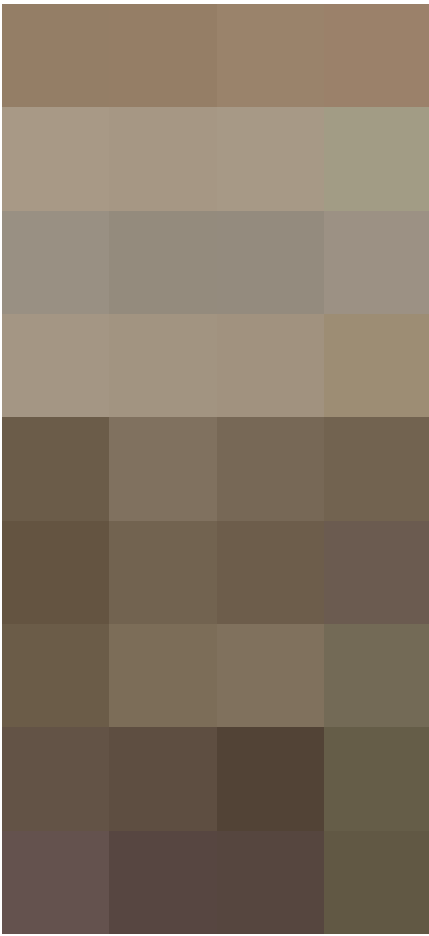
187. Nella pagina seguente: Palazzo Bartolini Salimbeni (Baccio d'Agnolo, 1520-1523), Firenze.

188. Nella pagina seguente: Palazzo Rucellai (Leon Battista Alberti-Bernardo Rossellino, 1446-1451), Firenze.

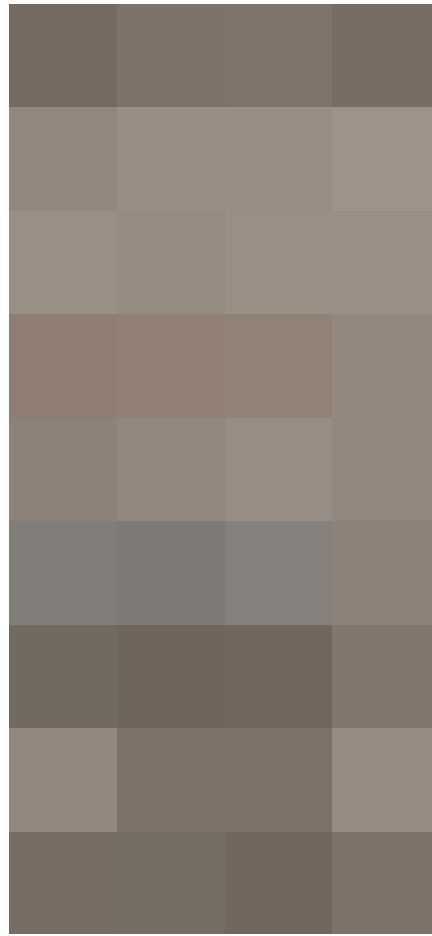
189. Nella pagina seguente: Palazzo Medici Riccardi (Michelozzo, 1444-1452), Firenze.

190. Nella pagina seguente: Palazzo Piccolomini (Bernardo Rossellino, 1459), Pienza.

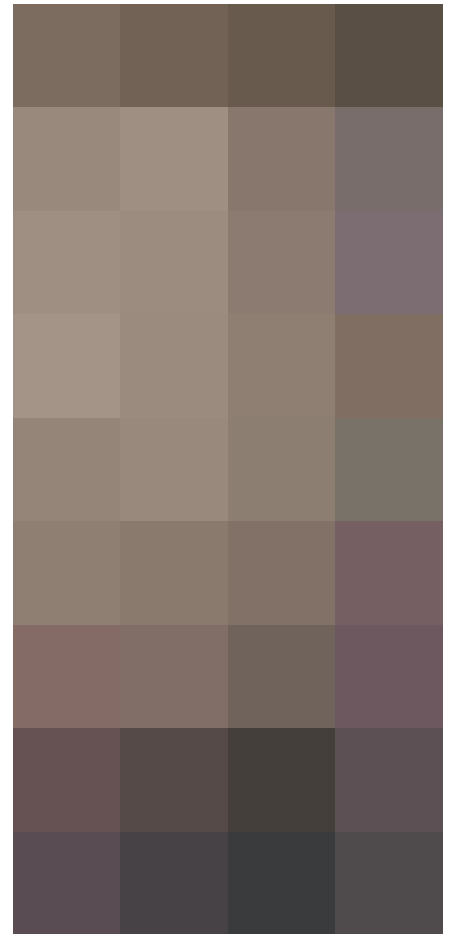
191. Nella pagina seguente: Palazzo Guadagni (Baccio d'Agnolo, 1502), Firenze.



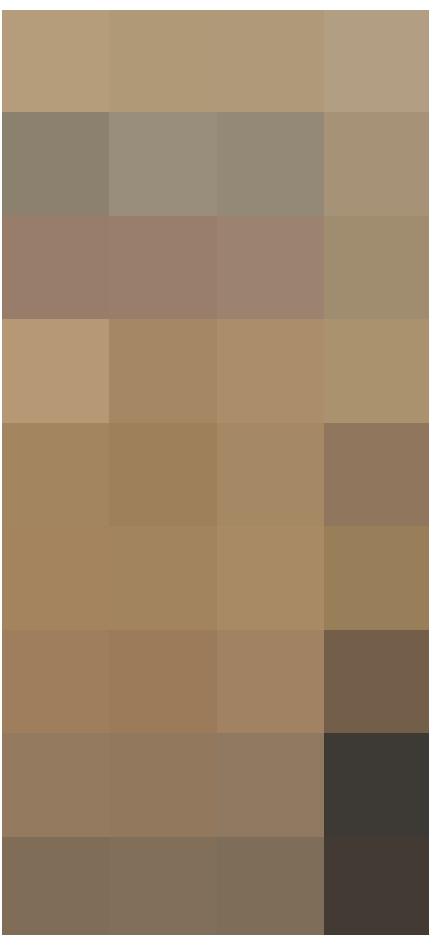
186



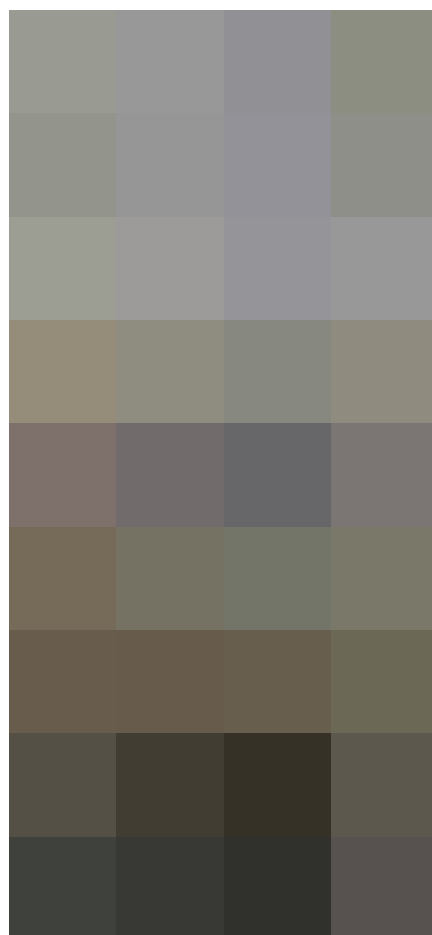
187



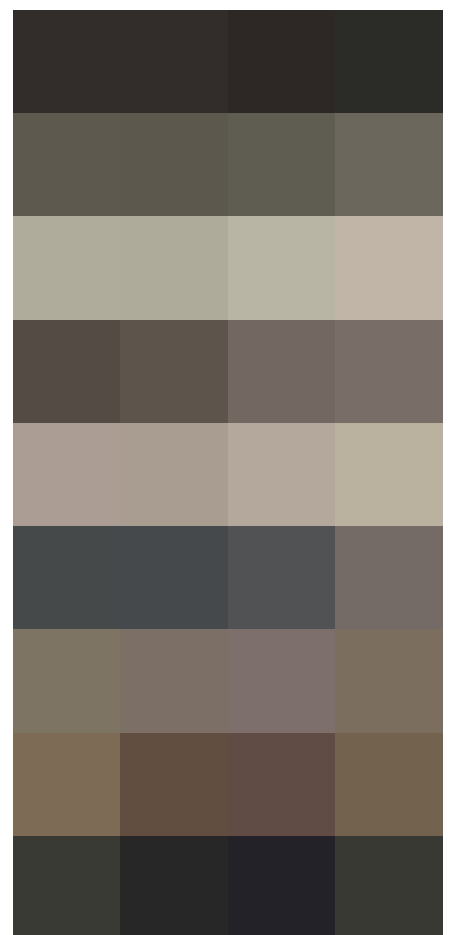
188



189



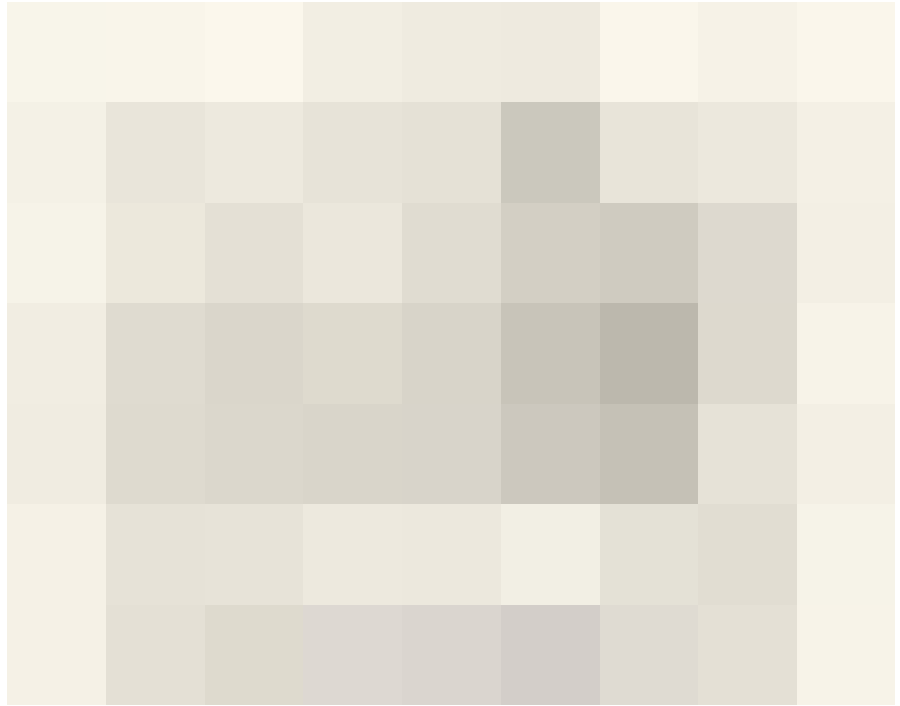
190



191

Se con il Rinascimento si ha una innovazione sostanziale del concetto di parete esterna come *facies* di una moderna civiltà, con l'avanzare del Seicento, in piena età del Barocco, si assiste ad un ulteriore rinnovamento del rapporto tra le diverse parti dell'edificio, il sistema tecnologico e la città. La riscoperta del pittoresco idilliaco, della natura, dei rapporti spaziali incentrati sulla prospettiva e dei nuovi materiali impiegati in una esuberanza decorativa si condensano in strutture aperte ed in organismi edilizi a pianta centrale. Artisti ed architetti barocchi conducono una ricerca rimasta sin dal Rinascimento irrisolta, ovvero il rapporto tra le singole parti dell'edificio e l'intero edificio, ossia tra le parti e il tutto e tra le parti fra loro. In modo particolare si rafforza il rapporto tra il telaio architettonico di facciata, sviluppando prima il sistema strutturale, poi l'involucro esterno ed, infine, l'intero organismo edilizio, ora integrato anche con il contesto. Come afferma De Fusco: «[...] si può dire che nell'architettura dell'età classica e del classicismo successivo le fronti sono generalmente più legate all'organismo architettonico che non al contesto urbanistico, mentre nell'età barocca esse assumono una loro autonomia, spesso motivata dall'intento di collegarsi all'ambiente circostante»¹⁵³.

Nel linguaggio barocco, la dialettica interno-esterno si pone come pietra miliare dell'architettura moderna, risolta interpretando lo spazio esterno con lo spazio interno, come lo saranno le strade intese come «*stanze della comunità, le cui pareti appartengono ai donatori e il cui cielo rappresenta il soffitto*»¹⁵⁴, definite da Louis Kahn in un suo schizzo (fig.192). Dal punto di vista dell'interpretazione semiologica, la facciata architettonica dell'età del Barocco smette di conformarsi secondo l'articolazione interna di un edificio (così come accadeva nella scansione seriale dei palazzi rinascimentali) assumendo, invece, una intenzionalità rappresentativa contribuendo a caratterizzare lo spazio urbanistico.



192

La "figura" facciata è tra le più ambigue dell'organismo architettonico. [...] Per alcuni, ed in alcune epoche, la facciata veniva considerata l'elemento di maggiore impegno architettonico, per altri il semplice risultato dello sviluppo di un interno; i razionalisti e i classicisti l'hanno sempre vista in un'unitaria connessione con la pianta e con l'interno in generale, mentre i romantici le hanno attribuito un'autonomia espressiva quasi assoluta. In realtà la facciata, pur essendo evidentemente in stretta relazione con l'intero organismo architettonico, conserva un certo grado di autonomia, tanto da essere il più problematico dei fattori costitutivi d'una fabbrica.

- Renato De Fusco

192. Nella pagina precedente: Kahn L., Drawing for City/2 Exhibition: The street is a Room, 1971 © The Museum of Modern Art, New York.

193. Camillo Guarino Guarini, Cappella della Santa Sindone a Torino, © LaPresse.

194. Camillo Guarino Guarini, pianta, sezione e prospetto della Cappella della Santa Sindone a Torino.



193

Il bisogno di stabilire una relazione tra ambiente esterno e spazio architettonico e nel dare unità generale all'edificio, conduce alla disgregazione dei volumi degli edifici che generano, quasi per gemmazione, piante geometriche complesse, ricche di simbologie teologiche e rituali all'interno del quale le singole parti ritrovano una loro gerarchia imperniata a sua volta di una propria centralità, costituita sempre da una figura geometrica simmetrica, semplice o poco complessa.

Un esempio fra tanti è la celebre Cappella della Santa Sindone a Torino, opera dell'architetto Camillo Guarino Guarini (Modena, 1624 – Milano, 1683), che più di tutti avrà il merito di dialettizzare le posizioni opposte di Gian Lorenzo Bernini (Napoli, 1598 – Roma, 1680) e di Francesco Borromini (Bissone, 1599 – Roma, 1667), anticipandone le istanze: «*la forma architettonica non è determinata da una concezione a priori dello spazio, ma è essa stessa determinante di spazio o, più precisamente, di immagini di spazio. Né lo spazio, che per il Guarini è infinitamente più esteso di quanto la*

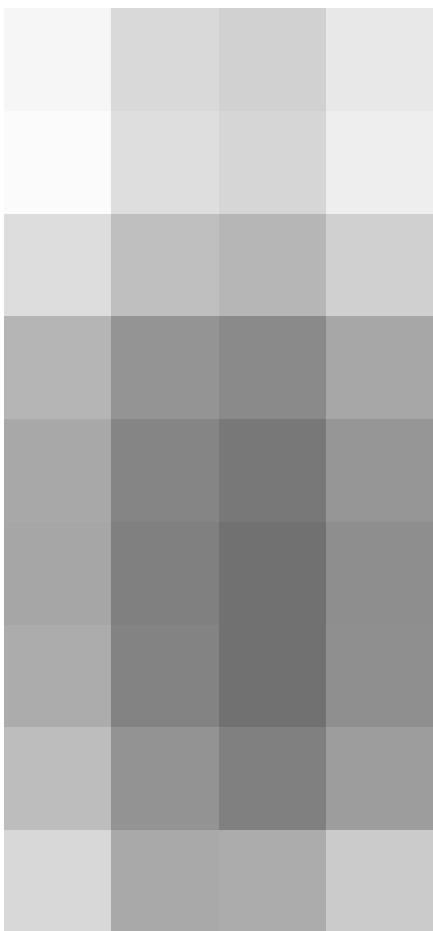
mente umana possa comprendere, può darsi altrimenti che per immagini. E' dunque la fine di tutte le tipologie classiche, che non erano altro che schemi di strutture spaziali; e l'inizio o il precorrimiento dell'architettura moderna che infatti non sarà più rappresentazione dello spazio, ma tecnica determinante di spazio»¹⁵⁵. Si veda, infatti, la struttura denunciata della cupola della Cappella della Santa Sindone, sovrapposta ad un tamburo costituito da tre grandi archi del bacino tronco, diminuendone l'ampiezza dell'anello su cui poggeranno le strutture superiori, riducendone il peso, in un ritmo serrato di segmenti curvilinei librati nello spazio vuoto, «*un istante di equilibrio miracolosamente fermato*»¹⁵⁶. Un'opera simil-teatrale proseguita da sei livelli di archi sovrapposti che si riducono man mano che salgono fino a convergere nella cupola stella-sole a dodici punte che richiamano l'*Empireo*, il più alto dei cieli, luogo della presenza fisica di Dio (figg.193-194).

«*Lo spazio assorbe le sollecitazioni trasmessa dall'architettura: il movimento barocco si fonda su "differenze cicliche", una*

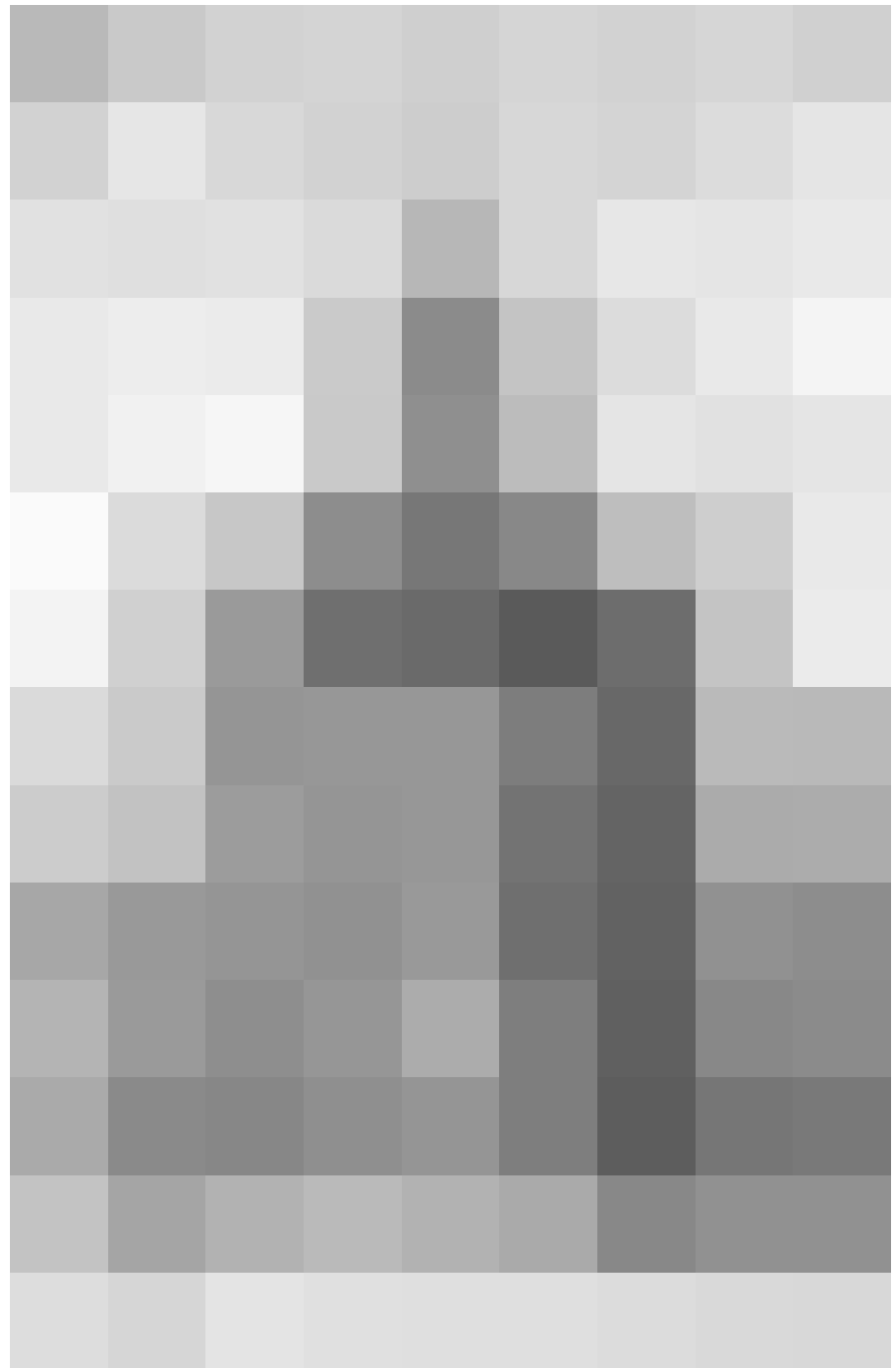


periodicità nella varietà delle forme. Allo stesso tempo il Barocco è un "sistema preordinato", che conserva il movimento rendendolo però costante e controllato. Così comprendiamo come i due aspetti del fenomeno barocco, sistematicità e dinamismo, apparentemente contraddittori, formino una totalità piena di significato»¹⁵⁷. Secondo Sigfried Giedion (Praga, 1888 – Zurigo, 1968), nella facciata di S. Carlo alle Quattro Fontane (1634-1640) a Roma, celebre opera di Borromini è possibile ravvisare una effettiva modellazione del *muro borrominiano* e dello spazio per mezzo di parti concave e convesse, un corollario naturale degli spazi fluenti della pianta flessibile (fig.195).

Così come la spazialità e flessibilità della pianta della Chiesa di S. Ivo alla Sapienza - Roma (1643-1660), il cui dialogo visivo in alzato mostra tutta la dinamicità dal basamento alla lanterna (fig.196), e con un involucro che assume il carattere di un guscio nervato reagente



195



196

all'azione concertata delle forze. In queste come tantissime opere del barocco, vi è una sostanziale scissione tra spazio interno e spazio esterno, non più corrispondenti e delimitati da due involucri indipendenti: all'organicità dello spazio interno si contrappone un prospetto esterno differente. «Questo confronto genera una tensione spaziale, ed un notevole sforzo progettuale, per trovare soluzione e coerenza complessiva»¹⁵⁸.

Gli artisti del Barocco si avvalgono, inoltre, di espedienti visivi per

195. Facciata della Chiesa di S. Carlo alle Quattro Fontane a Roma, in Riegl A., *Die Entstehung der barockkunst in Rom*, Anton Schroll & Co., Vienna, 1923.

196. Sezione della Chiesa di S.Ivo alla Sapienza, opera di Francesco Borromini.

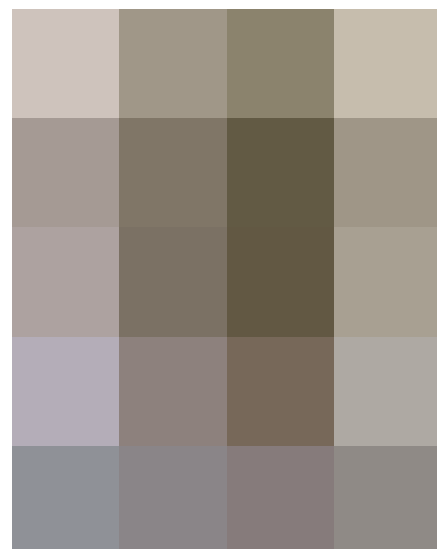
197. Finto coro della Chiesa di Santa Maria presso San Satiro, progettato da Donato Bramante.

198. Sezione di Galleria Spada, Roma.

199. La finta prospettiva di Galleria Spada, Roma, progettata da Francesco Borromini.



creare effetti artificiali, ingannando l'occhio umano e modificandone la percezione. Già nel Rinascimento, Donato Bramante (Fermignano, 1444 – Roma, 1514), nella Chiesa di Santa Maria (1478 - 1483) presso San Satiro progetta un finto coro per risolvere la mancanza di spazio, brillantemente risolto mediante la realizzazione di rilievi in cotto e successivamente dipinti ad emulare una fuga prospettica che ampliasse la percezione dello spazio (fig.197). Francesco Borromini, invece, sempre tramite l'illusione prospettica aumenta la profondità nella Galleria Spada (1652), inclinando il pavimento e riducendo gradatamente l'altezza delle colonne (figg.198-199).



197

199



198

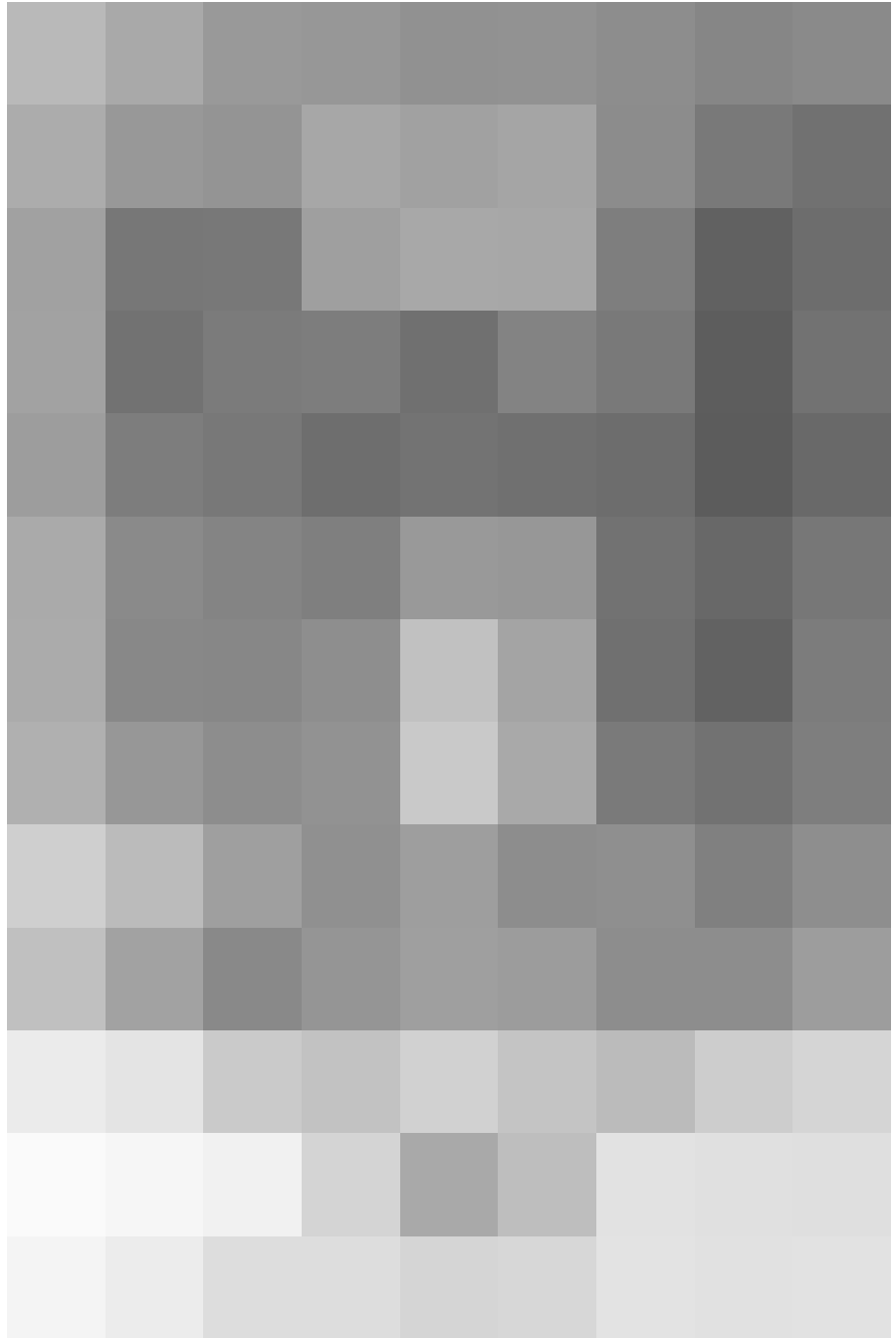
Alcuni di questi espedienti spaziali del Barocco, diverranno riferimento per alcuni autori decostruttivisti nella capacità di plasmare lo spazio e la materia, conferendole dinamicità.

Per Borromini l'unificazione spaziale è una delle principali ambizioni perseguibile attraverso la metrica dell'ordine, l'eliminazione di ogni ostacolo visivo e da un *continuum* plastico tra membrature e profili.

Sarà Pietro da Cortona (Cortona, 1597 – Roma, 1669) ad accogliere queste istanze ed a convogliarle all'interno della Chiesa dei Santi Luca e Martina (1634-1664), in una stratificazione spaziale su tre livelli e con sezioni murarie alternate a diaframmi colonnari permeati dalla luce e da un rapporto dialettico tra ordine architettonico e parete, basato sulla variazione ritmica innescata dagli arretramenti parietali, colonna binate e raccordi curvilinei (fig.200).

Il Barocco produce una mutazione profonda nella ricerca dell'autonomia delle parti non solo nelle plastiche strutture, ma attraverso la materia costituente la struttura stessa, in particolare la pietra, facilmente modellata secondo disegni organici, prevalentemente antropomorfi e vegetali. Il materiale litico 'sgorga' dalla facciata in una inebriante decorazione a cui poi si adattano altri materiali come legno, intonaco, laterizio, metalli e persino il vetro, in un processo integrativo delle arti che si rifà allo spirito berniniano del «*mirabile composto*»¹⁵⁹. La grandezza delle fabbriche, esasperate dalla tendenza del 'gigantismo', rende i cantieri sempre più complessi con la compresenza di artisti, tecnici, scarpellini, matematici che sperimentano e mettono a regime operative avanzate tecnologie, nuovi sistemi costruttivi e macchine inedite.

Il tema dell'ordine gigante, derivante da Bernini e da Fontana è adottato nel Tardo Barocco e nel proemio del neoclassicismo per la realizzazione dei fronti delle grandi architetture di rappresentanza, tipico della ricerca compositiva juvarriana e reiterato



200

dagli architetti di tutta Europa nella progettazione dei grandi palazzi reali (Palazzo Madama a Torino, Palazzo reale del Louvre a Parigi, Palazzo reale di Stoccolma, Palazzo reale di Madrid, etc.) le cui facciate sono scandite dal tema delle lesene giganti, dall'espediente michelangiolesco delle nicchie semicircolari e dall'impiego della colonna "alveolata", ossia parzialmente incastrata all'interno di lesene che ne costituiscono la cornice, adottata da Filippo Juvarra (Messina, 1678 – Madrid, 1736) come tributo dell'atrio michelangiolesco della Biblioteca Medicea Laurenziana di Firenze.

200. Facciata della Chiesa dei Santi Luca e Martina a Roma. Disegnato e Intagliato da Alessandro Specchi Architetto, Stampa di Domenico de Rossi, Roma.



201

**La facciata nel progresso industriale,
tra continuità e discontinuità
strutturale**

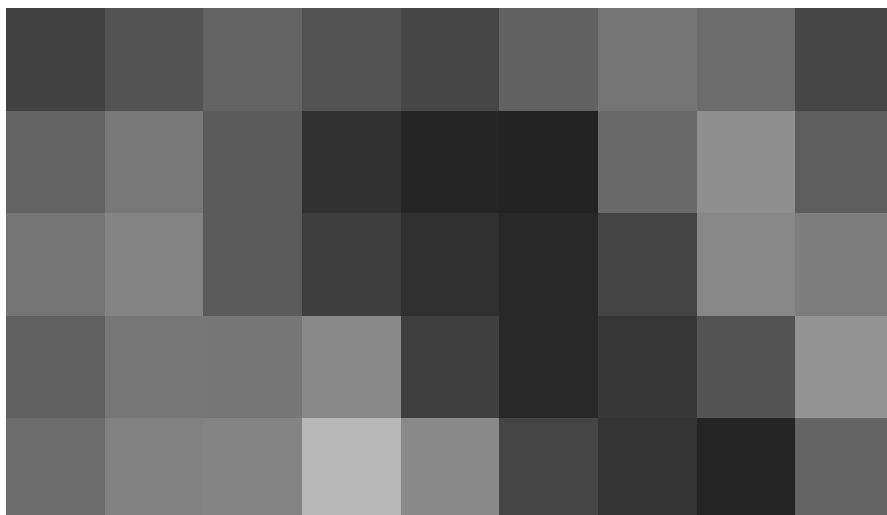
L'emblematica della tecnica

Il florilegio evolutivo della facciata e del sistema involucro che da epoche primitive, passando per le architetture litiche greco-romane e medievali, sino a giungere alle iniezioni di progresso tecnico-estetico del Rinascimento, del Barocco e dell'Assolutismo, rappresenta per ogni epoca una generale forma di *emblema*, diretto ai valori emergenti di una cultura e alla manifestazione di una nuova forma di

progresso nell'arte e nella tecnica. Con l'Illuminismo nasce una nuova tendenza costituita sui valori di *Libertà* e *Scienza*, declinati rispettivamente nel *Laissez-faire*¹⁶⁰ e nella *Tecnica* che trovano un punto di ricongiungimento nella generica egemonia dell'*Industria*. L'emblematica della tecnica nel Settecento in architettura è ascrivibile nella *fabbrica di cannoni di Chaux*, opera di Claude-Nicolas Ledoux (Dormans, 1736 – Parigi, 1806). La tecnica è intesa in quest'opera come soggetto, contemplata dall'esterno, celebrata nel "prodotto" (fig.201). La fabbrica dei cannoni è nel suo insieme, un monumento all'industria «dove l'accentuazione degli elementi più espliciti (i camini, enfatizzati ulteriormente nello stile del disegno) è perseguita mediante l'uso di una forma prestigiosa, per il suo valore simbolico più generale, quale è la piramide»¹⁶¹. Tale condizione Neoclassicista di Architettura rivoluzionaria vede nella grandiosità di scala e la predilezione per le forme geometriche elementari, una 'appropriazione' da parte degli architetti di un ricco repertorio di stili storici che venivano garantiti dalle risorse delle tecnica e dal processo di industrializzazione (fig.202).

201. Claude-Nicolas Ledoux, *Prospettiva della fabbrica di cannoni di Chaux*, litografia incisa da Coquet et Bovinet, Biblioteca Nazionale di Parigi.

202. Étienne-Louis Boullée (Parigi, 1728 – Parigi, 1799), *Cénotaphe de Newton*, Biblioteca Nazionale di Parigi, 1784.

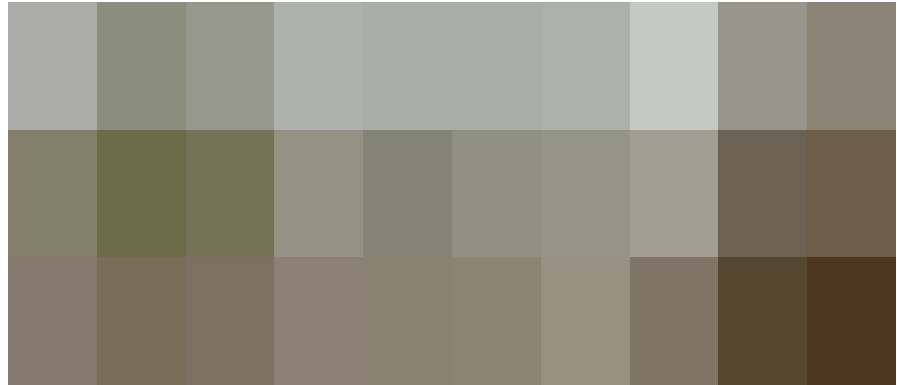


202

La rivalutazione dell'antichità fu enfatizzata dall'estensione del tradizionale *Grand Tour* oltre le frontiere di Roma, incoraggiato dalle scoperte delle città romane di Pompei ed Ercolano e di numerose località della Magna Grecia. Come affermerà Hippolyte Taine (Vouziers, 1828 – Parigi, 1893): «l'architetto avendo adottato un qualche carattere dominante, la serenità, la semplicità, la forza, l'eleganza, come ai tempi della Grecia e di Roma, ovvero la bizzarria, la varietà, l'infinità, la fantasia, come ai tempi gotici, può scegliere e combinare le relazioni, le proporzioni, le dimensioni, le forme, le posizioni; in breve i rapporti degli elementi, cioè di certe grandezze visibili, così da manifestare il carattere adottato»¹⁶². Una convinzione della coscienza umana in risposta ai principali mutamenti che diedero vita a nuove linee di pensiero in grado di mettere in discussione la validità degli stessi attributi vitruviani, cioè *utilitas*, *firmitas* e *venustas* (*utilità*, *solidità* e *bellezza*), con la triade codificata dall'Abbé de Cordemoy di *ordonnance*, *distribution* e *bienséance* (*ordine*, *distribuzione*, *convenienza*).

La Rivoluzione Industriale e la nascita delle strutture miste in architettura

Secondo la storiografia, la nascita dell'Architettura Moderna coincide con l'avvio della rivoluzione industriale moderna. Questo è dovuto in gran parte alla straordinaria accelerazione che il progresso tecnologico ha raggiunto in quel periodo, definendo la nostra attuale situazione socio-economica, la condizione ed il benessere abitativo, nonché il rapporto tra arte ed accelerazione tecnologica, definito nel saggio *Progetto e destino* di Giulio Carlo Argan. La Rivoluzione Industriale ha comportato un grande mutamento nell'assetto spaziale delle attività umane, dalla città al singolo edificio. Avviene che alla città antica si sovrappone una città differenziata per specializzazioni funzionali, il tutto rappresentato dal fenomeno dell'urbanesimo, e «cioè dalla conversione da attività rurali ad attività industriali della popolazione contribuendo, inoltre, a far sì che architettura e



203

città risultino sempre più identificate fra loro nella coscienza del pubblico: il concetto di "architettura civile" risente anche di questa parzializzazione»¹⁶³. Le imprese urbanistiche neoclassiche e ancor più chiaramente l'opera del Barone Georges Eugène Haussmann (Parigi, 1809 – Parigi, 1891), che fra il 1835 ed il 1869 ha monumentalmente modificato e sventrato l'assetto della città di Parigi, rappresenta uno dei molti tentativi, ancorché incompleti, di tenere in pugno la città sotto il profilo architettonico, funzionale ed igienico (fig.203).

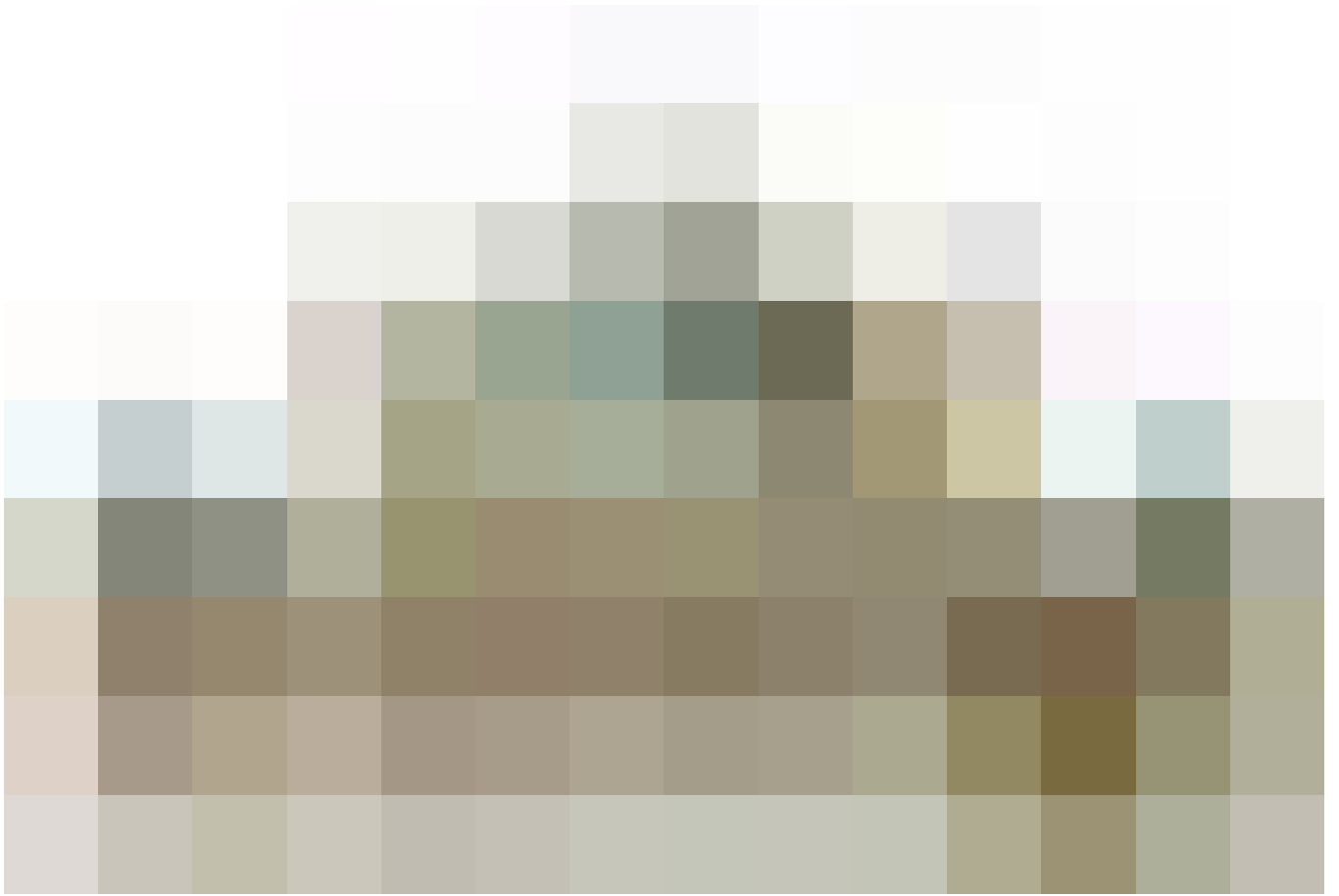
Segue nell'Ottocento un processo di rinnovamento tipologico fornito dalla vituperata architettura eclettica: sorgono musei, scuole, mercati, teatri, magazzini, parlamenti, prigioni e così via che con il Neoclassicismo assumono caratteristiche ben definite che resteranno immutate anche dalle successive influenze del Movimento Moderno. Nascono così le elaborazioni di modernità neoclassica ottocentesca come quelle di Jean-Louis-Charles Garnier (Parigi, 1825 – Parigi, 1898) per l'*Opéra di Parigi* (1875) (fig.204), o di Pierre-Francois-Henri Labrouste (Parigi, 1801 – Fontainebleau, 1875) con le sue due biblioteche (St. Geneviève e la Bibliothèque National). Nella Biblioteca di Saint-Geneviève, egli introduce per la prima volta nell'architettura rappresentativa la distinzione tra struttura intelaiata in ferro e ghisa, che sostiene la copertura a velario della sala di lettura e il recinto stereotomico murario (fig.205). L'aspetto più importante, però è la compresenza di materiali eterogenei nell'organismo architettonico, attraverso un sapiente

203. Le barrières de l'Etoile e i templi bugnati di Ledoux eretti durante l'Ancien Régime e abbattuti dal Barone Haussmann per far spazio all'attuale rond-point, ora noto come place Charles de Gaulle.

204. Nella pagina successiva: Opéra di Parigi (1875) di Jean-Louis-Charles Garnier.

205. Nella pagina successiva: sezione della Biblioteca Sainte-Geneviève di Henri Labrouste, in Labrouste H., *Plans et dessins relatifs à la construction et au décor de la bibliothèque Sainte-Geneviève*, Parigi, 1838-1850.

L'organismo architettonico a struttura mista della Biblioteca di St. Geneviève di Labrouste sancisce la perdita della purezza dell'architettura muraria tradizionale.



204



205

inserimento di barre metalliche destinate a collaborare strutturalmente con la massiva compagine litica e sancendo la perdita della purezza dell'architettura muraria tradizionale.

Anche nell'edilizia residenziale si assiste per la prima volta ad una doppia modificazione, una socio-economica ed una costruttiva: quella socio-economica vede la separazione tra residenza e lavoro le cui case d'affitto destinate al ceto medio diventano espressione del “civismo” borghese; quella costruttiva, invece, vede introdotto il concetto di prefabbricazione degli elementi costruttivi ed una eterogeneità dei materiali tradizionali ed innovativi (laterizio, ferro, ghisa, cemento) per far fronte alla richiesta urgente di nuove abitazioni della nascente civiltà industriale.

Nasce quindi il concetto di struttura mista, che è possibile definire come il complesso degli edifici che vedono la compresenza di materiali ed elementi riconducibili alla tradizione costruttiva premoderna (strutture portanti verticali costituite da murature in pietra e/o mattoni ed orizzontamenti costituiti da volte in pietra e/o mattoni e/o da solai in legno) e di nuovi materiali ed elementi desunti dal trasferimento di conoscenze dal nascente mondo industriale (ferro e cemento, orizzontamenti misti in legno e ferro, in ferro e laterizi, in laterocemento, e gli elementi verticali costituiti da colonne in ghisa, travi e pilastri in calcestruzzo armato).

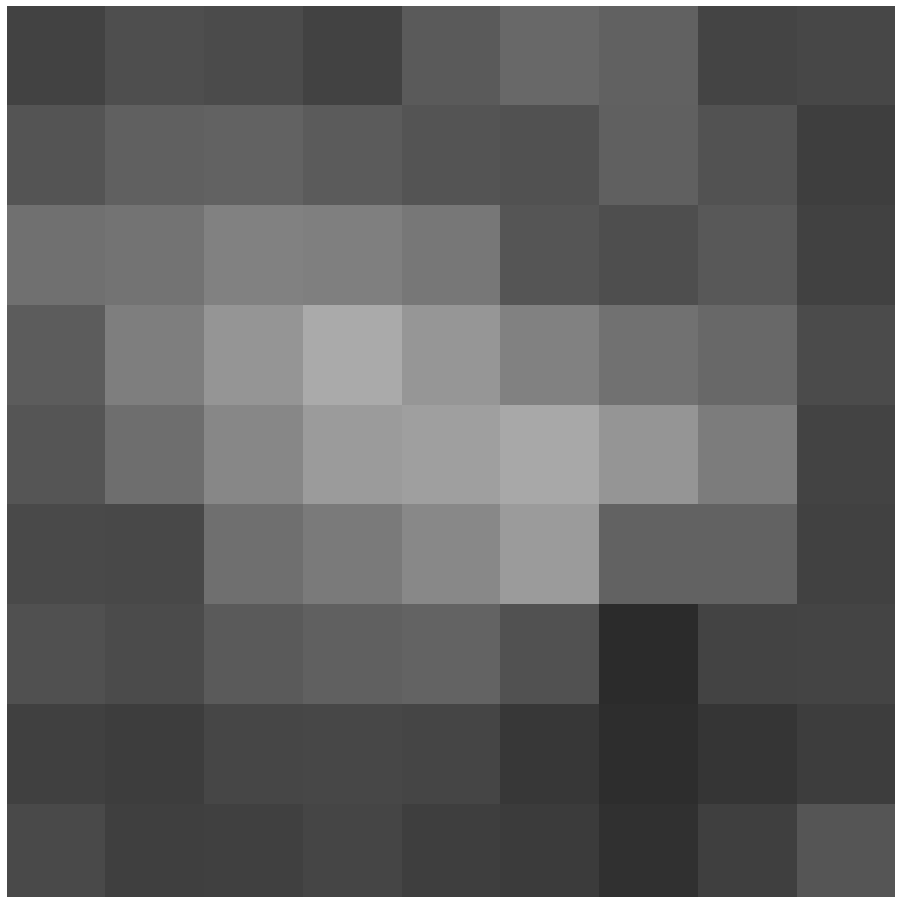
Il problema della casa, quindi, il cui sviluppo si era dipanato per secoli attraverso trasformazioni lente, costantemente in sincrono con l'altrettanto lento evolversi delle condizioni economiche e sociali, con la rivoluzione industriale entra in crisi. Secondo Achille Petrucci, nel libro “Industrializzazione dell'edilizia”, tre sono sostanzialmente le componenti che determinano tale crisi:

- le trasformazioni sociali connesse con il paesaggio della economia dalla fase agricolo-artigianale a quella industriale;

- l'intervento nell'edilizia residenziale di nuovi processi tecnologici, nuovi materiali, nuovi rapporti costo-prezzo-reddito;
- il mutare del costume di vita nella città determinato sia dalle nuove condizioni economiche e di lavoro, sia dal progressivo diffondersi a tutti i livelli sociali dell'igiene domestica e del desiderio di maggiore comfort¹⁶⁴.

Le trasformazioni sociali connesse con il paesaggio videro nell'*inurbamento* o *urbanesimo*, il fenomeno sociale per il quale significative porzioni di popolazione abbandonarono il paesaggio rurale per riversarsi stabilmente nella nascente e più opportunistica città industriale. Lo stesso volto della città proto-industriale era cambiato in maniera sconvolgente: svettanti ciminiere, densi aggregati urbani, imponenti magazzini, grandi alberghi ed edifici amministrativi accompagnati dalle pessime condizioni igieniche derivanti dal sovrappopolamento, costituivano lo sfondo della nuova città industriale (figg.206-207).

206. Gustave Doré, Quartiere operaio nel centro di Londra, Londra, 1872





207



208

207. La città di Sheffield (Inghilterra) in una litografia del 1855.

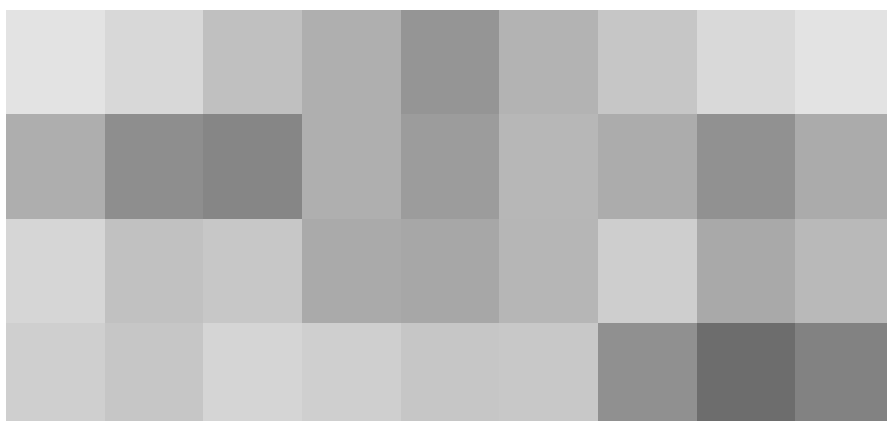
208. Modello di città industriale a pianta quadrata ideata da Robert Owen.

209. Il Falansterio, modello di città ideata da Charles Fourier.

L'Inghilterra è il primo teatro di questa condizione (Londra, per esempio, passa dagli 864.645 abitanti del 1801 ai 4.232.118 del 1891), a cui seguono Francia e Germania. Nel momento in cui le grandi città industriali iniziano ad assumere una propria fisionomia, gli individui che la abitano iniziano a sentirsi estranei: si

conducono studi per formulare leggi sullo sviluppo urbano, nasce la disciplina della sociologia urbana (fondata da importanti figure come Max Weber, Èmile Durkheim, Friedrich Engels, Lewis Mumford, etc.), accostata per la prima volta alla statistica (promossa dai precursori Pierre Èmile Levasseur e Alfred Legoyt) per formulare leggi sullo sviluppo urbano. Altre menti, tra i quali, Matthew Arnold, Charles Fourier, Robert Owen, John Ruskin concordano nel denunciare la deplorable igiene delle grandi città, accostata anche all'igiene morale messa in causa da studiosi e filosofi come Karl Marx nel suo "Capitale", Adam Smith, Georg Wilhelm Friedrich Hegel e molti altri.

Nascono modelli di città *preurbanistica progressista*, talvolta utopiche (come il *modello urbano a pianta quadrata* di Robert Owen (fig.208), il *Falansterio* di Charles Fourier (fig.209) e di Victor Considérant, il *Familisterio* di Jean-Baptiste Godin, le *città modello di Icaria* di Étienne Cabet e di *Hygeia* di Benjamin Ward Richardson) e modelli di *preurbanistica culturalista* (derivanti dalle opere di John Ruskin, di William Morris, Augustus Welby Northmore Pugin ed Ebenezer Howard, padre della *città-giardino*)¹⁶⁵.



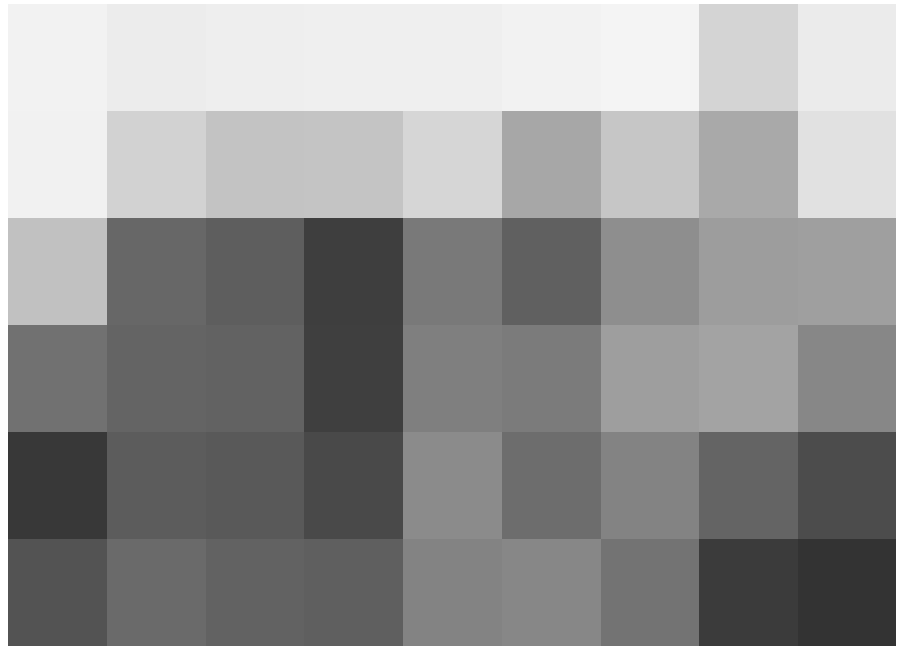
209

L'aspetto funzionalista fra razionalità tecnica e razionalità architettonica affonda le radici nel principio dello *standard*, inteso come incontro tra forma e materia nel rispetto delle condizioni funzionali (economiche, igieniche, etc.) quantitativamente definibili. Gli elementi costruttivi, diventano quindi fuochi della composizione in un determinismo tecnicistico e di una ripetizione seriale dei motivi e dei processi formali dell'artigianato, che fece sorgere innumerevoli polemiche da parte di John Ruskin (Londra, 1819 – Brantwood, 1900) e William Morris (Walthamstow, 1834 – Londra, 1896) che condannano l'industria e i suoi processi favorendo l'artigianato come estrinsecazione diretta della creatività del lavoro, liberato dal suo elemento servile e coatto¹⁶⁶, confluito e rinvigorito successivamente nel movimento artistico delle *Arts and Crafts* (arti e mestieri).

Infine, con il mutare delle nuove condizioni economiche, si sviluppa un progressivo diffondersi a tutti i livelli sociali dell'igiene domestica e del desiderio di maggiore comfort. Le Esposizioni Universali rappresentano l'occasione reale per dimostrare i progressi raggiunti in quel momento dall'intera umanità in innumerevoli settori, tra cui quello dell'architettura, delle tecniche costruttive e dei nuovi materiali.

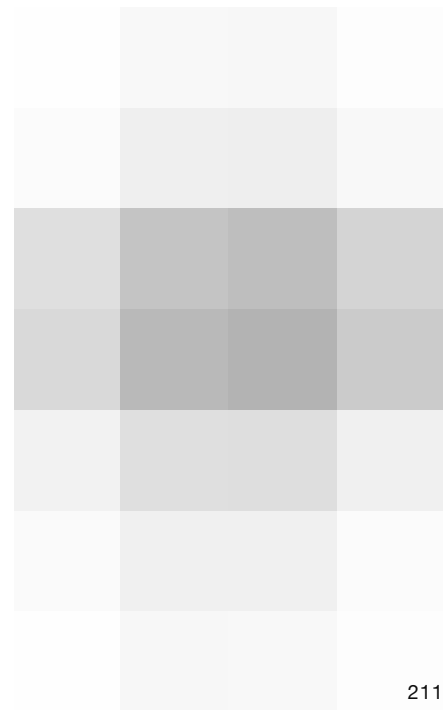
Il tema della casa popolare, era divenuto argomento di interesse pubblico con la prima Esposizione Universale di Londra del 1851, nella quale compariva anche un settore destinato alle case per operai.

Il prototipo di *casa per quattro famiglie operaie* (fig.210), nota anche come *Cottage del Principe Alberto* (denominata così grazie al sostegno del principe nel voler fornire degli alloggi alle famiglie povere) a Kennington Park e a Hertford nell'Hertfordshire progettata da Henry Roberts (1803-1876), architetto onorario della S.I.C.L.C - *Society for Improving the Condition of the Labouring Classes*, rappresentava un ottimo riferimento per l'elevazione dello



210

standard abitativo con contenimento dei costi ed espediente per eliminare la *tassa sui mattoni (brick tax)*¹⁶⁷, istituita nel 1756 come imposta sui mattoni, gravante soprattutto per la fascia di popolazione più povera, residente perlopiù in edilizia in mattoni, rispetto alle case dei ricchi costruite quasi esclusivamente in pietra. I due livelli della casa erano raggiungibili mediante una scala posta anteriormente nella piccola anticamera d'ingresso mentre il balcone-ballatoio in facciata disimpegnava quattro unità familiari. Il prototipo poteva essere congiunto in linea a un numero indefinito di analoghi corpi di fabbrica. Le scelte tipologiche proposte comprendevano: soggiorno con camino, cucina, un acquaio e la camera da letto padronale separata da quelle dei figli, queste ultime comunicanti con il soggiorno per consentire ai genitori un maggiore controllo (fig.211). Le murature sono in mattoni di laterizio forato garantendo per la prima volta prestazioni di coibenza termica; i solai resistenti al fuoco sono in laterizio, ferro e cemento Portland; la copertura è livellata con pietra pomice leggera e coibente al tempo stesso; si analizza anche il controllo acustico e del rumore ambientale e attraverso griglie di ventilazione e intonaci traspiranti si garantiscono i ricambi d'aria a favore di una maggiore salubrità degli ambienti.



211

210. Casa-prototipo per quattro famiglie operaie, progettata nel 1851 dall'architetto Henry Roberts, in *Exhibition of the Works of Industry of All Nations: Reports by the Juries on the Subjects in the Thirty Classes*, 1851.

211. *Ibidem*.

212. Casa-prototipo (*Carré Mulhousien*) della città operaia di Mulhouse progettata a partire dal 1853 dall'ingegnere Èmile Muller e finanziata dalla S.O.M.C.O. - Société Mulhousienne des Citée Ouvrières, © Archivio di Mulhouse.

213. Progetto della *Carré Mulhousien* di Èmile Muller, in Muller È., *Les Habitations Ouvrières en tous pays*, J.Dejeu & Cie. de l'Ecole Centrale des Arts ed Manufactures de la Société des Anciens Elèves des Ecoles des Arts ed Métiers et de l'Association Polytechnique, Parigi, 1879, Planche nn. 3-4.

Anche in Francia si sperimentano nuove tipologie di case-modello per il miglioramento del benessere abitativo della nuova classe operaia.

A partire dal 1853, la società filantropica S.O.M.C.O. - *Société Mulhousienne des Citée Ouvrières* diede incarico all'ingegnere Èmile Muller di elaborare e realizzare una progetto per una *Cité* operaia che avrebbe alloggiato i dipendenti delle fabbriche tessili della cittadina di Mulhouse,

stretta fra i confini con la Svizzera e la Germania. Incaricato di occupare un'area di 60 ha, Muller ideò una abitazione con un inedito schema distributivo cruciforme a quattro alloggi unifamiliari sotto un'unica copertura, ottenendo un modulo quadrangolare di due elevazioni fuori terra, detto *carré mulhousien* (figg.212-213) che, reiterato lungo le particelle di giardini presenti sull'intero lotto, avrebbe gettato le basi per l'ideazione del primo modello di garden-city. Oltre all'accortezza distributiva e alla generosità degli ambienti (di 47 mq) oltre gli standard, le case operai si distinsero anche per le qualità costruttive intrinseche, in modo particolare per un primordiale impiego di conglomerati cementizi per la realizzazione dei setti di fondazioni impermeabilizzati con asfalto e la realizzazione di un basamento distaccato dalla quota del terreno (limitando il fenomeno di risalita capillare di umidità), la realizzazione di canali di ventilazione naturale e l'apposizione di un inedito sistema impiantistico inglobato nella muratura per la canalizzazione dei fumi provenienti dal focolare e per la dismissione delle acque reflue provenienti dalla 'latrina'.



212

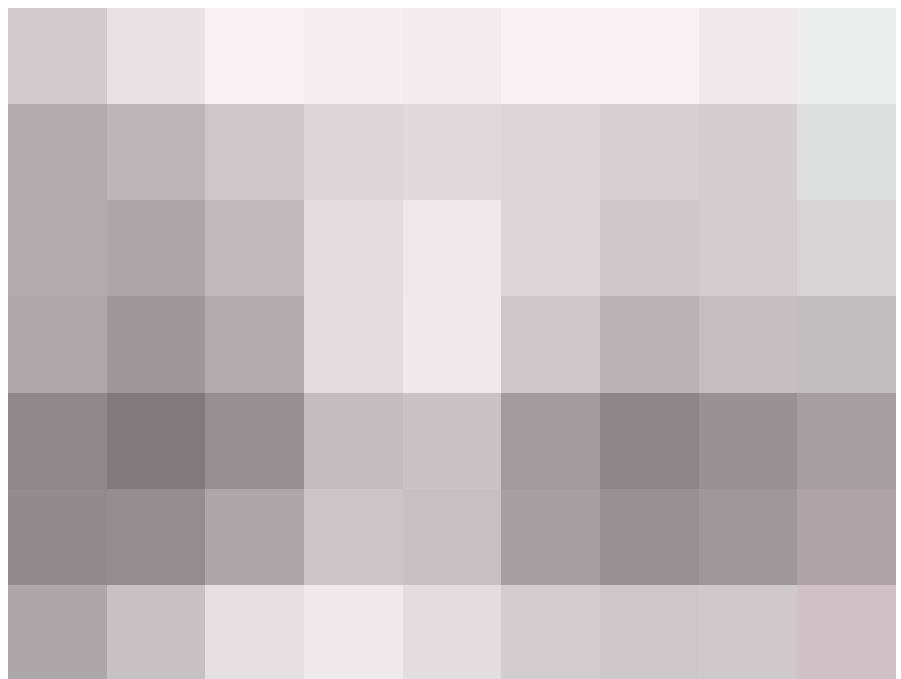


213



214

Nella disamina delle case-prototipo operaie, degno di nota è lo sviluppo e la diffusione dell'impiantistica domestica capace di mutare la morfologia dell'assetto murario tramite aperture, canalizzazioni e cavedi e l'integrazione delle prime tipologie di impianto idrico-sanitario, elettrico e termico, con soluzioni avveniristiche a cui corrispondono spesso nuovi materiali (figg.214-215). Gli impianti tecnologici rappresentano il concetto della “prefabbricazione totale” degli elementi e si pongono come soluzione integrale a tutti i problemi igienico-sanitario connessi all'intero edificio. Nacquero così le varie forme di specializzazione nei diversi settori interessanti l'organismo architettonico soprattutto nella fattura degli impianti tecnici che sono alla base della sua funzionalità. «Con il processo di specializzazione si inserì il lavoro di collaborazione. Dal professionista isolato che aveva sostituito il Maestro dell'età rinascimentale, si addiveniva ora al lavoro in équipe. Questo è stato



215

uno degli avvenimenti più salienti della epoca moderna, anzi dobbiamo dire dei tempi più recenti, che oltre a risolvere lo scisma, che è sempre esistito, fra arte e scienza, fra ingegneri e architetti, ha ricostituito la unità del lavoro»¹⁶⁸.

214. Nella pagina precedente: diramazione acqua e pozzi, in Musso G., Copperi G., *Particolari di costruzioni murali e finimenti di fabbricati*, Parte II - *Opere di finimento ed Affini*, G.B. Paravia e Comp., Torino, Roma, Milano, Firenze, Napoli, 1912, tav.XXVIII

215. Nella pagina precedente: l'ordinamento degli apparecchi per le latrine ed il loro montaggio ai tubi a colonna della fognatura a circolazione continua, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933.

216. Pilastrate complesse d'angolo in struttura mista, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933, tav.XXXVI.

L'edilizia assumeva in tutti questi processi il ruolo primario di trasformazione del territorio e dell'abitare moderno. Il superaffollamento dei centri urbani, però, aveva generato carenze endemiche degli aspetti più propriamente sanitari, provocando danni ed epidemie di colera. Da questi presupposti si sviluppano i primi criteri normativi in merito alla legislazione sanitaria, fornendo ai pubblici poteri gli strumenti amministrativi e giuridici più idonei allo scopo. Ebbero così origine, dapprima in Inghilterra, una serie di codificazioni di norme sanitarie che confluiscono nel 1848, nella prima legge generale: il *Public Health Act* che consentirà la costituzione di comitati locali (*Board of Health*) in grado di nominare ispettori sanitari, medici ed Ufficiali d'Igiene per il controllo delle fognature, il rispetto dell'obbligatorietà di installazione di servizi igienici per alloggio, la gestione dei rifiuti urbani, la disciplina dei macelli, la disciplina dell'abitabilità delle abitazioni (con il divieto dell'uso delle cantine come abitazione) e la disciplina dei contributi. L'applicazione di questa inedita legge incontrò naturalmente fomentate opposizioni, poiché per la prima volta si intaccava il concetto stesso di proprietà privata. Il vilipendio normativo che si protrarrà per oltre mezzo secolo, si risolve con l'istituzione del *Local Government Board* e con la prima legge sull'edilizia sovvenzionata e sulla sanità nell'*Housing of the Working Classes Act* votata nel 1851, l'anno dell'Esposizione Universale di Londra, del Crystal Palace dell'architetto Joseph Paxton (Milton Bryant, 1803 – Sydenham, 1865) e delle prime case-modello impostate sui nuovi criteri abitativi e normativi.

Sistemi e sub-sistemi degli organismi edilizi a struttura mista

Come già detto, gli organismi a struttura mista sono quel complesso degli edifici che vedono nei sistemi e sub-sistemi costruttivi la compresenza dicotomica di materiali ed elementi riconducibili alla tradizione costruttiva premoderna (legno, blocchi litici naturali ed artificiali, laterizio e terra cruda, etc.) e di nuovi materiali ed elementi desunti dal trasferimento di conoscenze dal nascente mondo industriale (ghisa, ferro, cemento, vetro, etc.) (fig.216).

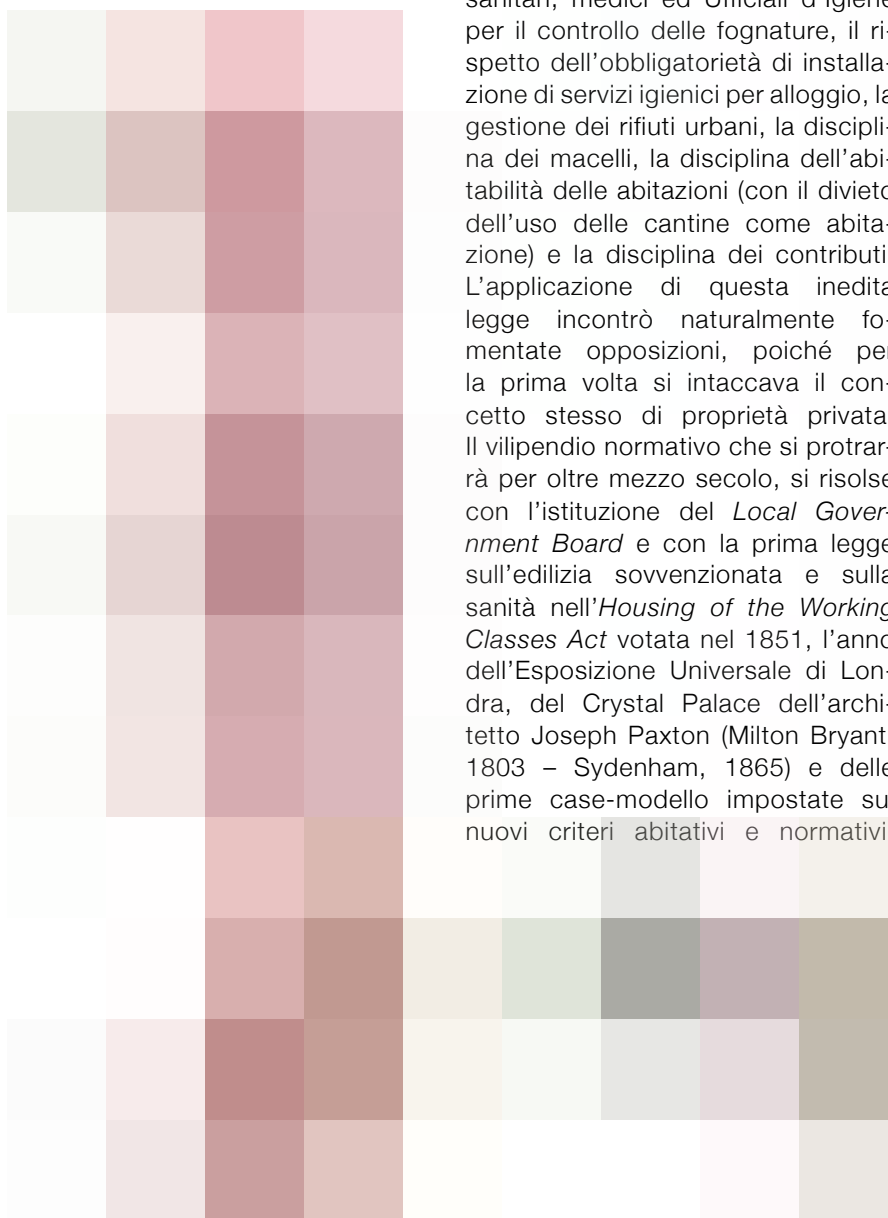
Prima di esaminare le novità costruttive introdotte nell'edilizia a struttura mista sarebbe opportuno fornire una panoramica generale sui sistemi e sub-sistemi degli organismi edilizi a struttura mista, attraverso una schematizzazione di tipo tassonomica riferita agli aspetti tipologico-strutturali e materici per i seguenti elementi tecnici:

- elemento tecnico «parete»;
- elemento tecnico «solaio»;
- elemento tecnico «scala».

A partire dalla definizione di struttura portante (come costituita da elementi di base principali) ed elementi secondari (struttura di "riempimento" o "compimento", si individuano per ciascun elemento tecnico:

- la «categoria», in forza della natura del materiale costituente la struttura principale;
- il «tipo», in base alla natura del materiale costituente gli elementi secondari "di compimento";
- il «sottotipo», in relazione agli aspetti geometrici degli elementi secondari (per esempio "a graticcio" per le pareti, "a voltine" per i solai, "rampante" per le scale)¹⁶⁹.

Per rendere più immediata la lettura tassonomica dei sistemi e dei sub-sistemi degli organismi edilizi a struttura mista, si riportano alcuni esempi di opere architettoniche storiche realizzate con i relativi sistemi e sub-sistemi tecnologici racchiusi in uno schema sinottico (fig.217).



Classificazione elemento tecnico «parete»			
Categoria	Tipo	Sottotipo	Esempio
Legno	Legno	A telaio (Balloon Frame)	<i>Quartiere residenziale Levittown, Philadelphia, 1956.</i>
	Terra cruda	A graticcio	<i>Casa Bonaria-Simonetti, Ozzano Monferrato, Piemonte (XV secolo)</i>
	Blocchi naturali o artificiali	A graticcio	
	Conglomerato cementizio		<i>Casa lingee e rivestimento in Cement-Asbestos Shingles (scadole in cemento-amianto, 1900.</i>
Ghisa	Legno		<i>Magazzino di stoccaggio dell'area navale di Sheerness Dockyard, Inghilterra, 1856.</i>
	Vetro		<i>Henry Holland, Carlton House, Londra, 1796.</i>
	Pietra	A telaio metallico inglobato nella muratura	<i>John Nash, Royal Pavilion, Brighton (Inghilterra), 1823</i>
	Laterizio	A telaio metallico inglobato nella muratura	<i>Rowland Mason Ordish, Watson's Hotel, Mumbai (India), 1867.</i>
	Ferro	Elementi strutturali misti in ferro pudellato e ghisa	<i>George Ledwell Taylor, Sheerness Dockyard Church, Inghilterra, 1828.</i>
Ferro	Vetro	Curtain Wall	<i>Ferdinand Dutert e Victor Contamin, Gallerie des Machines, Parigi, 1889.</i>
	Blocchi naturali o artificiali	A telaio metallico inglobato nella muratura	<i>Jules Saulnier, Moulin de la chocolaterie Menier, Noisiel (Francia), 1871.</i>
Calcestruzzo	Sviluppo e diffusione a partire dal Novecento con l'introduzione della struttura intelaiata in calcestruzzo armato		

Classificazione elemento tecnico «solaio»			
Categoria	Tipo	Sottotipo	Esempio
Legno	Legno	Semplice orditura	
		Doppia orditura	
	Ferro		
Ferro	Legno	Semplice orditura	<i>Leonardo Ridola, Mulino Alvino, Matera, 1884.</i>
		Doppia orditura	
	Pietra	Voltine	
		Piattabanda	
	Laterizio	Voltine	
		Piattabanda	
		Tavelloni	
		Pignatte	
	Ferro	Voltine	<i>Samuel Wyatt, strutture verticali e orizzontali ignifughe in ferro.</i>
		Piattabanda	
Cemento	Curvo	<i>Lagerhauser del Porto Vecchio di Trieste (soletta Monier).</i>	
	Piano		
Calcestruzzo	Calcestruzzo armato	Curvo	<i>Applicazioni sperimentali</i>
		Piano	
	Blocchi artificiali	Curvo	<i>Applicazioni sperimentali</i>
		Piano	

Classificazione elemento tecnico «scala»		
Categoria	Tipo	Sottotipo
Legno	Laterizio	Rampante a intradosso piano
Ferro	Elementi naturali o artificiali	Rampante ad intradosso piano su putrella longitudinale
		Rampante ad intradosso piano su putrella trasversale
		Rampante ad intradosso a volta
		Gradino autoportante
	Materiali cementizi	Rampante ad intradosso piano
		Rampante ad intradosso a volta
Calcestruzzo	Elementi artificiali	Rampante ad intradosso piano
	Calcestruzzo armato	Rampante ad intradosso piano

217. Nella pagina precedente: schematizzazione tassonomica dei sistemi e dei sub-sistemi degli organismi edilizi a struttura mista e classificazione degli elementi tecnici (parete, solaio, scala).

218. Superficie di un elemento in ghisa.

219. Diversi tipi di colonne dei ponti della metropolitana di Berlino. Diversi tipi di colonne dei ponti della Metropolitana di Berlino. Tutte queste colonne sono caratterizzate dalla interessante presenza di uno snodo sferico tra la colonna e il capitello, per eliminare i momenti flettenti e quindi le tensioni di trazione, Breymann G.A., *Trattato generale di costruzioni civili con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose guida all'insegnamento ed allo studio di Breymann G.A.: Costruzioni metalliche (costruzioni in ferro)*, Volume 3, Antica casa editrice Dottor Francesco Vallardi, Milano, Torino, Napoli, Firenze, Roma, Bologna, Palermo, Catania, 1853.

L'avvento della ghisa e della struttura metallica a telaio

Il primo materiale foriero della fervente rivoluzione industriale introdotto nell'organismo edilizio fu la ghisa, prodotto primario dell'altoforno (fig.218). Le strutture in ghisa e in ferro costituirono dalla metà del XIX secolo e per almeno cinquanta anni, la grande novità dell'architettura: forse la più importante innovazione dall'inizio della storia delle costruzioni. La ghisa fu inizialmente il materiale preferito per la sua semplicità di lavorazione e per la maggiore economia rispetto al ferro; inoltre Gustav Adolf Breymann (Blankenburg Harz, 1807 - Stoccarda, 1859) individuò, tra le ragioni dell'utilizzo della ghisa, «la plasticità, come maggiore semplicità ad assumere quelle forme e quella resistenza alla compres-

sione che possano occorrere nelle costruzioni edilizie»¹⁷⁰. La caratteristica di plasticità è dovuta dall'alto tenore di carbonio, normalmente compreso tra il 2 ed il 5% e rilevanti percentuali di silicio (>2%), manganese, fosforo e zolfo. Essa costituisce essenzialmente, grazie alla bassa temperatura di fusione (1150°C circa) e all'elevata fluidità, la lega di ferro più utilizzata in fonderia.

Nelle ghise bianche il carbonio è legato al ferro sotto forma di cementite (Fe₃C); nelle più comuni ghise grigie parte del carbonio si separa in forma grafitica durante la solidificazione e il raffreddamento, riducendo fortemente i fenomeni di ritiro e favorendo un efficace colaggio in stampi dalle forme anche molto complesse. La grafite possiede anche ottime proprietà lubrificanti, sfruttate utilmente durante le fasi di colata continua. Le caratteristiche meccaniche della ghisa la distinguono nettamente dalle altre leghe di ferro. In particolare essa possiede ottime proprietà di resistenza a compressione, ma cede per bassi carichi con minimi allungamenti se sollecitata a trazione. Esibisce buon comportamento al fuoco e discreta resistenza alla corrosione. Le forme degli elementi in ghisa più frequentemente riscontrabili sono quelle tipiche dei materiali colati in stampo (forme massicce e spesso ripetitive, come capitelli o colonne)¹⁷¹ (fig.219).



218

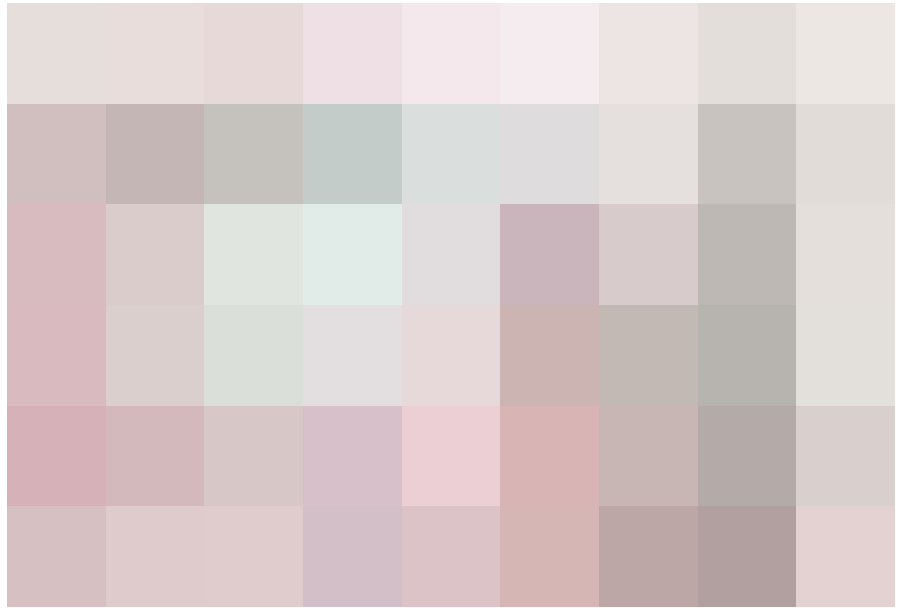
Ghisa		
Composizione	ferro e grafite	
Peso specifico	[g/cm ³]	7,9
Temperatura di fusione	[°C]	1150
Resistenza a compressione	[Kg/m ²]	>900
Durezza	[Kg/mm ²]	>180



219

La prima applicazione di un elemento costruttivo in ghisa risale al 1780, quando ritti in legno vengono sostituiti da colonne di ghisa a sostegno della copertura delle prime filande di cotone inglesi che, essendo ancora attività relegate alla sfera domestica, furono dapprincipio sistemate nei sottotetti delle case operaie (fig.220). Il processo di meccanizzazione in serie durante la rivoluzione industriale, introdusse le prime filatrici meccaniche che ponevano un problema legato allo spazio. Così man mano che le dimensioni delle filatrici aumentavano, la struttura lignea delle filande venne sostituita da impalcati sostenuti da colonne in ghisa e travi in ferro, in grado di coprire luci maggiori grazie alla migliore resistenza e portanza del materiale metallico. Nel 1836, con l'introduzione del profilo metallico a doppio T, l'intero impalcato ligneo viene sostituito con solai a struttura mista in ferro e laterizio (mattoni pieni, mattoni forati, volterrane) (figg.221-222).

Il primo intervento dell'età dell'industria, quindi, fu una semplice operazione di sostituzione o sovrapposizione degli elementi strutturali lignei con elementi strutturali metallici, senza l'implicazione di alcuna sostanziale modifica degli aspetti compositivi, distributivi e costruttivi. Gli antichi costruttori, infatti, «*parvero non accorgersi delle molteplici potenzialità del ferro, così come non si posero il problema di inventare nuove tipologie distributive consone alle esigenze funzionali degli organismi produttivi di tipo industriale. Preferirono la via più immediata ma non per questo semplice, dell'adattamento delle nuove necessità e dei nuovi mezzi a concetti noti e tecniche stabilizzate, ma gravate da una sorta di inerzia che le repentine trasformazioni economiche stentavano a superare*»¹⁷². Quindi anche l'involucro edilizio nei primi esempi di costruzioni a struttura mista, rimase relegato alla tradizionale scatola muraria. Gli unici miglioramenti di tipo prestazionale, furono l'inserimento di *bolzoni* o *capochiave* (della tipologia a *paletto*) e *chiavarde* metalliche collegati alla testa della trave



220



221



222

220. Nella pagina precedente: le travi in ferro nei muri e le colonne in ghisa, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933, tav.XXXVIII.

221. Nella pagina precedente: le impalcature da solaio in ferro, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933, tav.XLV.

222. Nella pagina precedente: le impalcature da solaio in ferro, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933, tav.XLVI.

223. Ammorsamento di una struttura muraria con un sistema di ancoraggio metallico costituito da catena metallica e capochiave della tipologia "a paletto".

224. Tipologie di tessiture murarie, in Rondelet G., *Trattato Teorico e pratico dell'arte di edificare*, Planches CLXXXII, Stabilimento tipografico di Francesco del Vecchio, Napoli, 1840.

linea e/o metallica o di una catena metallica con lo scopo di migliorare l'ammorsamento tra struttura verticale e struttura orizzontale, a vantaggio dell'effetto scatolare dell'intero organismo edilizio (fig.223).

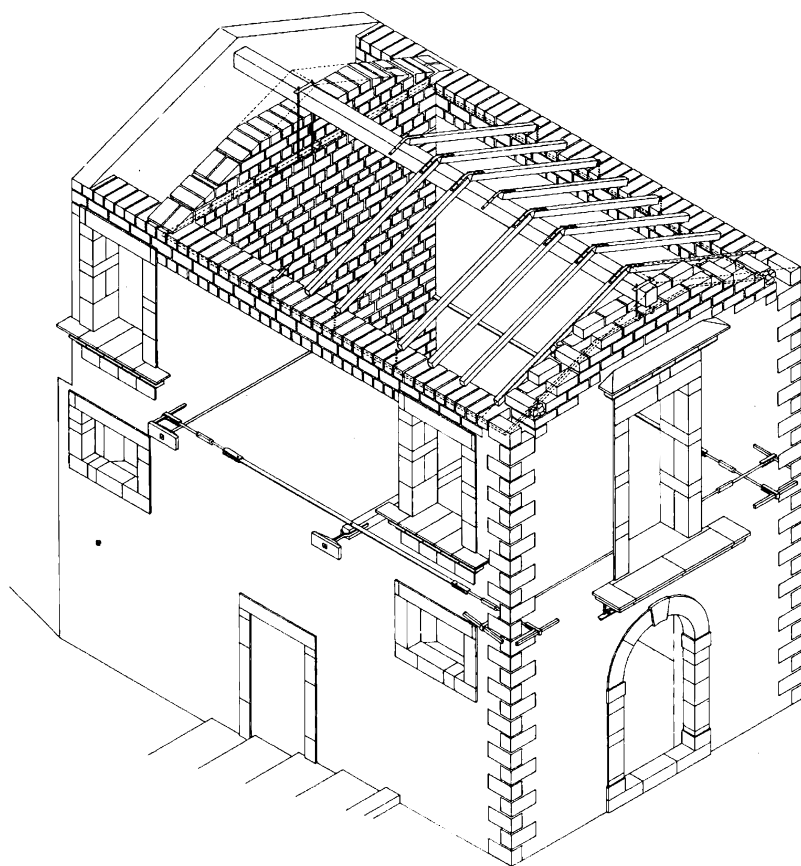
Lo studio dei dissesti dell'organismo edilizio ed in modo particolare delle opere murarie, infatti, viene introdotto proprio a partire dal XIX secolo, in cui alle regole empiriche sull'equilibrio viene accostato il calcolo scientifico, introdotto dalla moderna Scienza delle Costruzioni. Le costruzioni in muratura, iperstatiche in alcune situazioni di carico e labili per altre, sono oggetto di approfonditi studi che analizzano per la prima volta il comportamento cinematico della concrezione muraria e

dei meccanismi di danno e di collasso, ma con notevolissime difficoltà di calcolo dovute alla complessità geometrica, la mancanza di omogeneità dei materiali, l'anisotropia e le modificazioni spazio-temporali subite dalla muratura indagata.

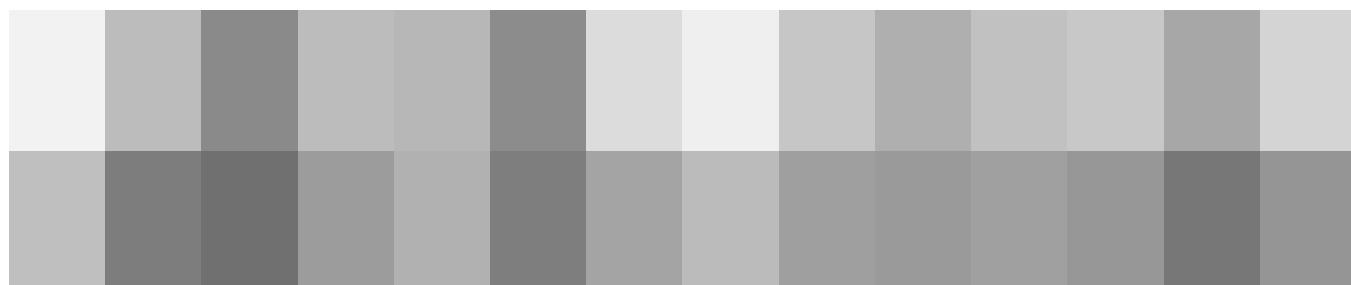
Un esempio è il notissimo metodo di analisi della stabilità degli archi proposto da Édouard-Henry-François Méry (Rouen, 1805 – Rouen, 1866) nel saggio *Mémoire sur l'équilibre des voûtes en berceau*, *Annales des Ponts et Chaussées*, XIX (1840) basato sugli studi riguardo i meccanismi di collasso di archi e piattabande secondo gli storici Danytzy, Poleni e Mascheroni.

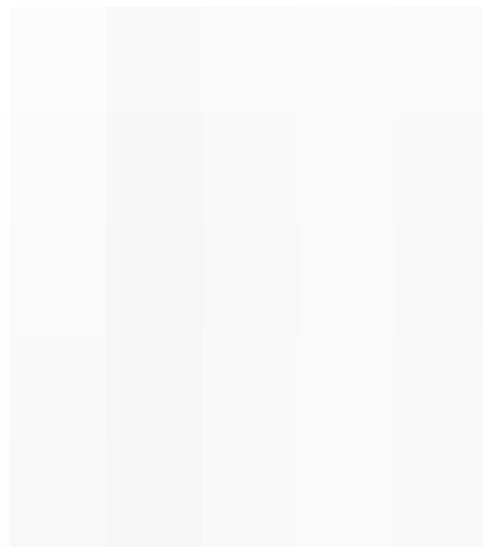
Anche Jean-Baptiste Rondelet (Lione, 1743 – Parigi, 1829) fornisce un contributo notevole sul comportamento cinematico di archi, cupole e murature. Il comportamento di una muratura sollecitata fuori dal piano, fu indagato nel 1802 con riferimento a modelli sperimentali realizzati con blocchi a secco in cui individuò tre diversi meccanismi:

- ribaltamento di una muratura - soggetta ad una forza orizzontale - attorno ad una cerniera cilindrica posta in corrispondenza del piano di appoggio del terreno;
- ribaltamento di una muratura - vincolata da un solo lato - attorno ad una cerniera cilindrica posta lungo l'asse individuato dal rapporto tra base e altezza;
- ribaltamento di una muratura - vincolata da entrambi i lati - mediante formazione di cerniere a seguito di spostamenti laterali delle connessioni angolari e scorrimento tra giunti a causa dell'ingranamento sulla linea di frattura verticale¹⁷³ (fig.224).



223





225

Tra i primi esempi di applicazione pionieristica della struttura in ghisa è il Magazzino di Milford progettato nel 1792 da William Strutt (1756–1830) in cui è presente un particolare nodo costruttivo fra l'esile colonna in ghisa e la trave in legno rinforzata all'intradosso da uno speciale profilo in ferro che oltre a garantire la tenuta al fuoco della struttura lignea, forniva il piano d'imposta delle voltine in mattoni di laterizio.

La lungimiranza tecnica dell'architetto inglese fornì la base per lo sviluppo di innumerevoli profili trasversali di travi in ghisa nelle organizzazioni strutturali a prova d'incendio per diverse filande inglesi (Charles Bage, filanda a Shrewsbury - 1796; Matthew Boulton e James Watt, filanda a Salford - 1801, William Strutt filanda di Belper - 1803) (fig.225).

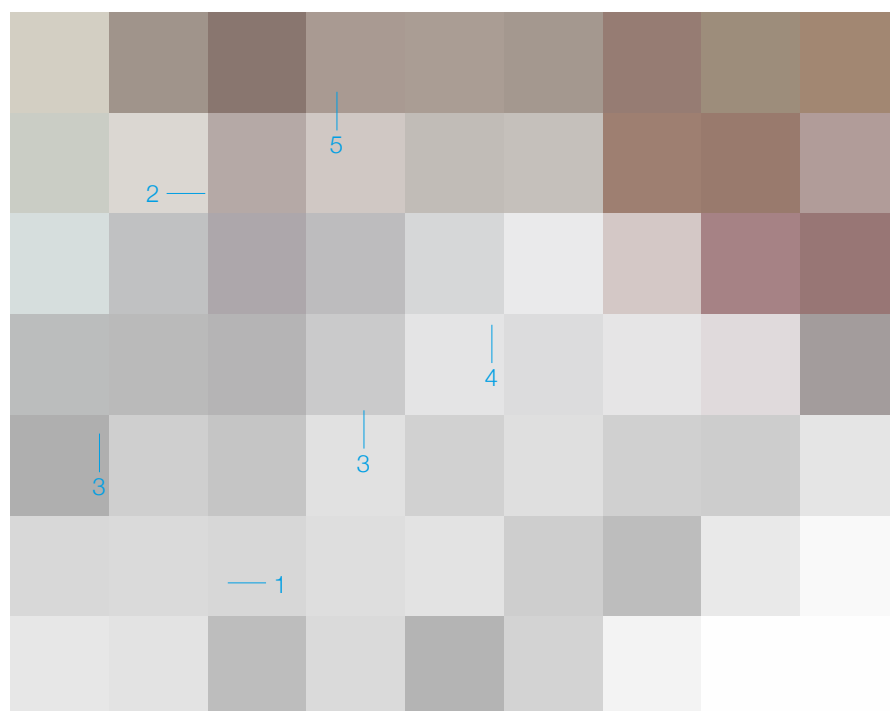
L'esempio più concreto di struttura in ghisa è la filanda di cotone Phillips Wood & Lee Cotton Twist Mill costruita nel 1801 a Salford (Manchester), progettata da Matthew Boulton (Birmingham, 1728 – 1809) e James Watt (Greenock, 1736 – Handsworth, 1819), l'inventore della macchina a vapore. La struttura della filanda è interamente in ghisa, sia per i pilastri cavi disposti in doppia fila (con un diametro di circa 23cm) che per le travi con sezione a doppio T, in grado di coprire le notevoli dimensioni dell'edificio (42m di lunghezza, 12,50m di larghezza per una altezza di sette piani).

La struttura è inglobata all'interno di un involucro murario in mattoni di laterizio, mentre i solai sono costituiti da voltine di laterizio livellate con conglomerato cementizio (fig.226).

Nel 1847, John Gardner e Peter William Barlow (1809 - 1885) proposero la prima trave in ghisa rinforzata da un'armatura in nastri di *ferro fucinato*¹⁷⁴ inseriti in apposite sedi predisposte entro lo spessore della flangia tesa inferiore per compensare la fragilità della ghisa, migliorarne la duttilità sezionale e la resistenza a flessione della trave. Questo accoppiamento di ferro e ghisa, costituisce il primo esem-

225. A sinistra: magazzino di Milfors: particolare costruttivo del nodo fra la colonna in ghisa e la trave in legno rinforzata con piastra in ferro. A destra: successive trasformazioni del profilo trasversale della trave in ghisa nelle organizzazioni strutturali a prova d'incendio degli edifici industriali inglesi adibiti a filanda nel periodo 1792-1803.

226. Particolare tecnologico della struttura in ghisa della filanda di cotone Phillips Wood & Lee Cotton Twist Mill costruita nel 1801 a Salford (Manchester), progettata da Matthew Boulton e James Watt. Legenda: 1 colonna cava in ghisa; 2 giunto a manicotto in ghisa; 3 travi principali in ghisa; 4 travi secondarie in ghisa; 5 solaio in voltine di laterizio e riempimento in conglomerato cementizio e assito ligneo.



226



227

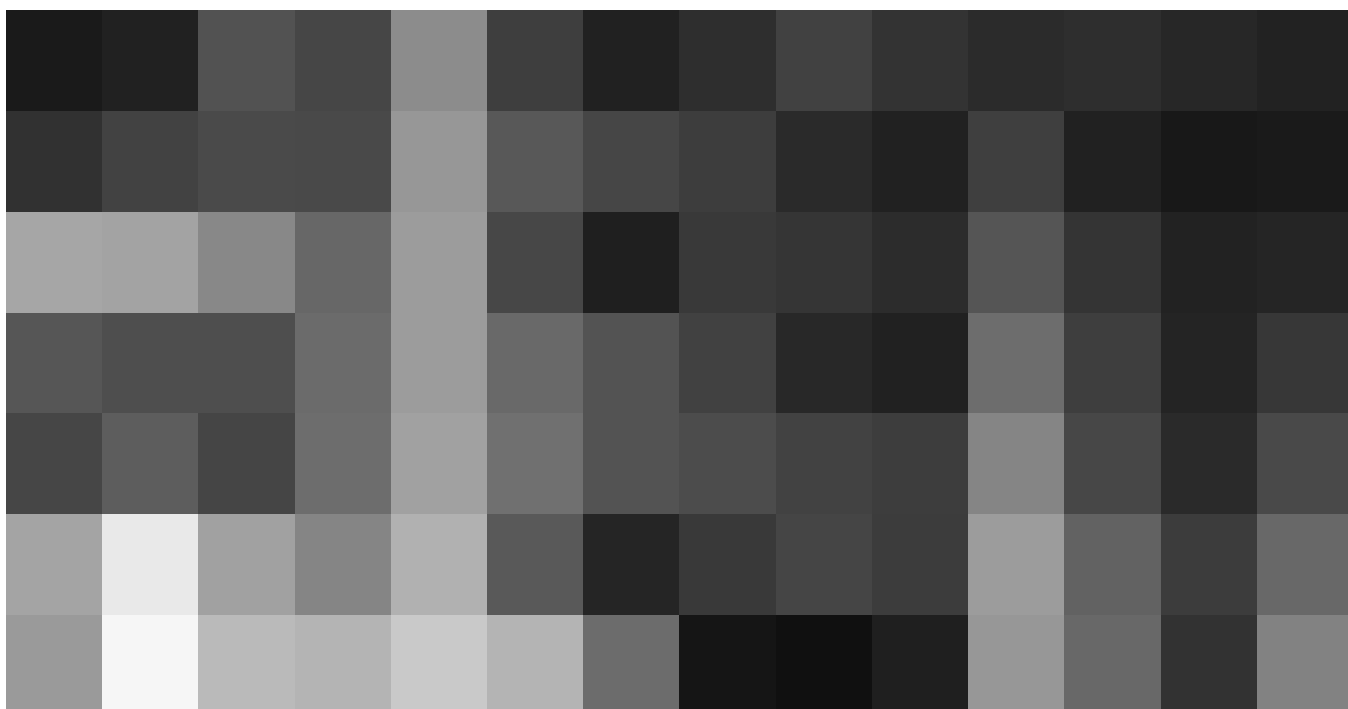
227. A sinistra: trave in ghisa rinforzata con basse di ferro fucinato (brevetto di John Gardner, 1847). Al centro: applicazione di trave rinforzata secondo il brevetto di Gardner per la realizzazione di un ponte ferroviario di circa 7,70m di luce progettato da Peter William Barlow. A destra: tipologie ricorrenti degli ancoraggi delle barre di ferro nelle «trussed-girders» (travi reticolari) realizzate tra gli anni '30 e '40 dell'Ottocento.

228. Travi di ghisa armata con barre di ferro a percorso trapezoidale in un edificio adibito a magazzino nel cantiere navale di Portsmouth, 1845.

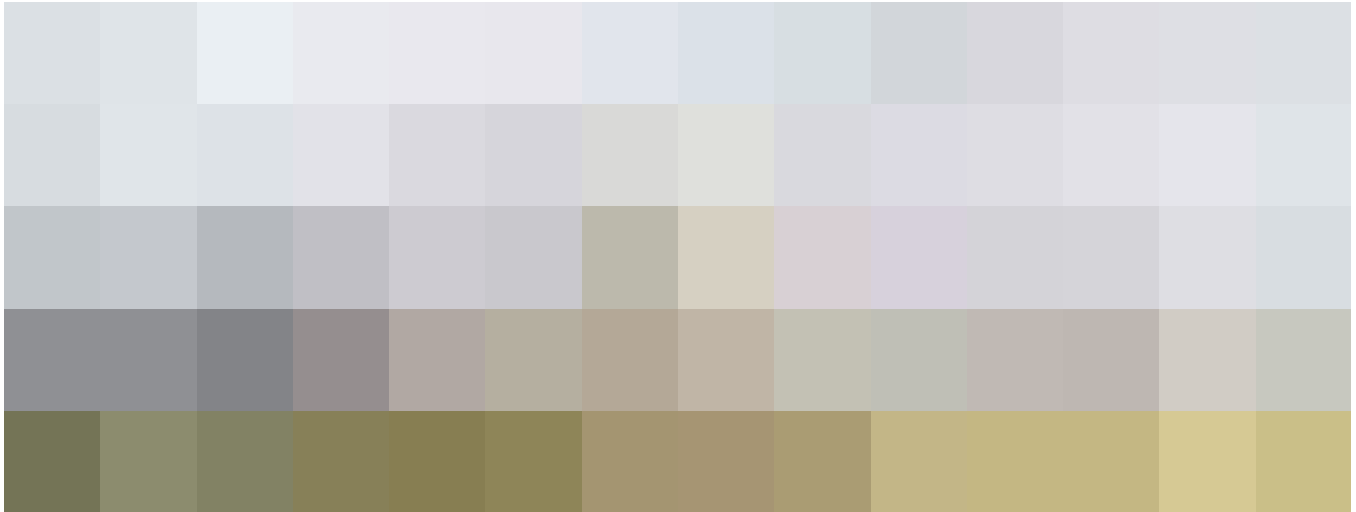
pio di precompressione della trave, espediente che troverà similitudini e maggiore sviluppo con l'introduzione del calcestruzzo armato e del relativo processo di prefabbricazione industriale (fig.227).

Successivamente le travi in ghisa armata si evolvono in soluzioni più ardite con barre di ferro a percorso trapezoidale, con campate di oltre i 10m di luce, costituendo di fatto l'antesignano delle soluzioni strutturali a trave reticolare (*trussed-girders*). Un'ultima testimonianza di tale sistema è presente nell'edificio adibito a magazzino nel cantiere navale di Portsmouth (1845) (fig.228).

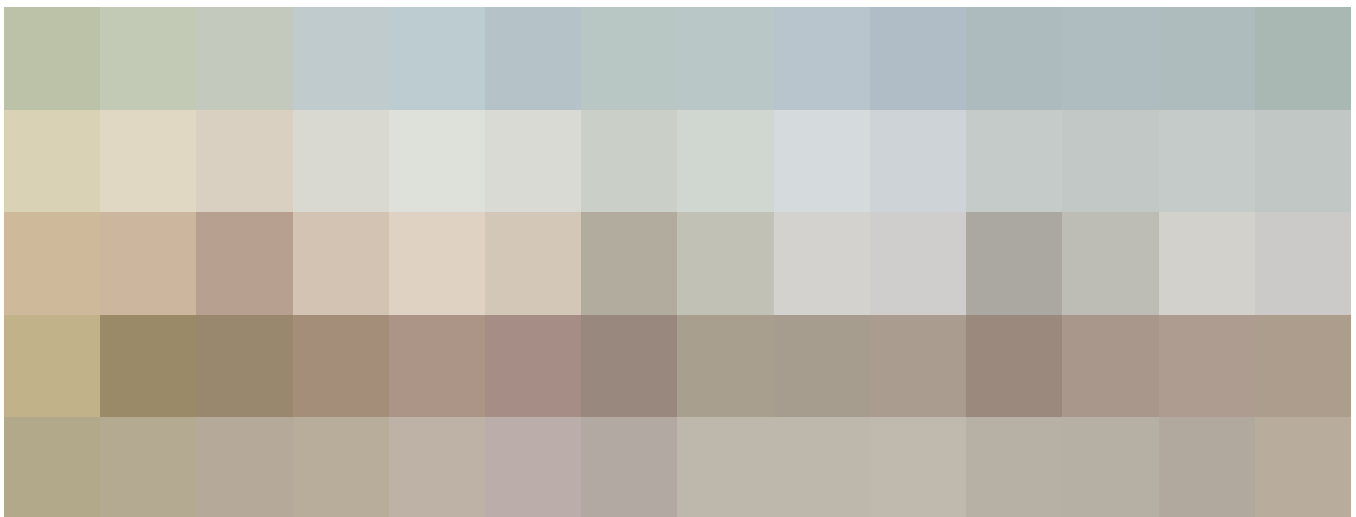
La struttura in ghisa costituita nella sola accezione di colonna e trave in ghisa, si diffuse molto rapidamente in tutto il mondo e, forse per quel tanto di avveniristico che sempre accompagna la scoperta di nuovi materiali, entusiasmò moltissimi architetti ed ingegneri che ne fecero un elemento non solo strutturale, ma artisticamente espressivo. La facilità di realizzazione degli elementi in ghisa gettò le basi per lo sviluppo del fenomeno della prefabbricazione, in modo particolare per la costruzione di città, padiglioni ed importanti opere infrastrutturali (soprattutto ponti) nelle regioni industrializzate, come ad esempio il



228



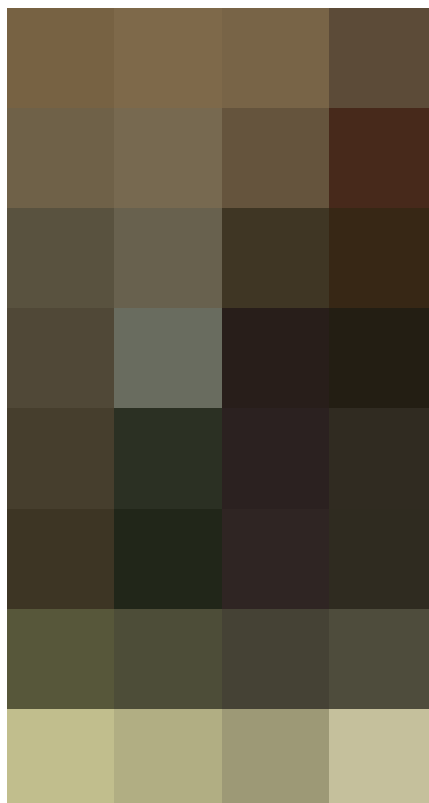
229



230

Royal Pavilion (1812-1823) di John Nash (figg.229-203) e la Carlton House (1796-1811) a Londra, progettata da Henry Holland, in cui nella sala del conservatorio è possibile osservare un primordiale e goticizzante accostamento del vetro alla struttura in ghisa (fig.231).

Il fenomeno della prefabbricazione interessò in particolar modo anche l'impero coloniale (soprattutto quello inglese). Gli edifici, soprattutto quelli di rappresentanza, erano prefabbricati nei più grandi porti inglesi e trasportati via mare nelle terre coloniali, come per esempio la Commissioner's House (1822) nelle isole Bermuda progettato da Edward Holl, la Corio Villa interamente realizzata in ghisa e trasportata in apposite scatole da Edimburgo a Geelong (Australia) e il John Watson's Hotel a Mumbai (Bombay), il più antico edificio multipiano in ghi-

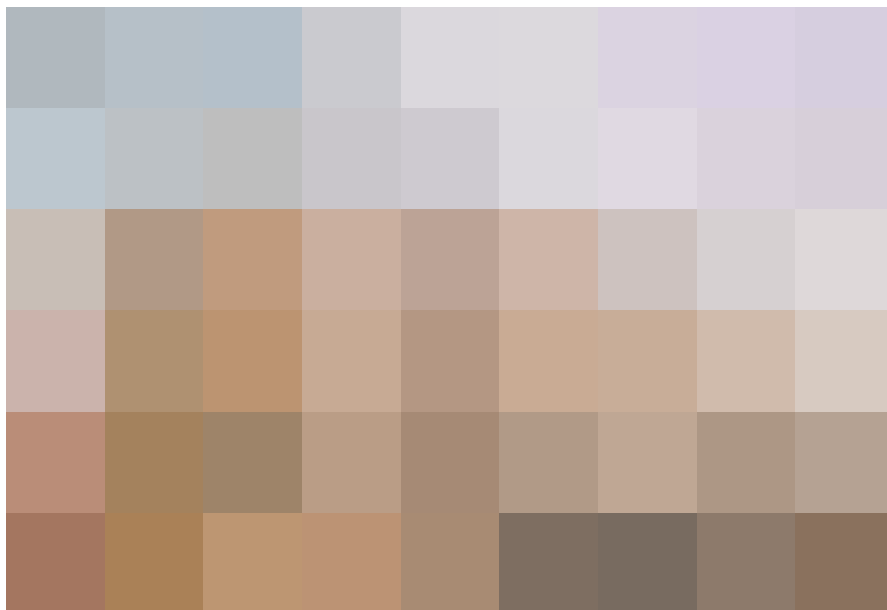


231

229. Royal Pavilion di Londra, progettato nel 1821 dall'architetto John Nash, © Royal Pavilion & Museums, Brighton & Hove.

230. *Ibidem*.

231. Carlton House di Londra, progettato nel 1821 dall'architetto John Nash, in Ackermann R., *The Repository of arts, literature, commerce, manufactures, fashions and politics*, Sherwood & Co. and Walker & Co, Philadelphia Museum of Art, Library, 1811, pag.166.



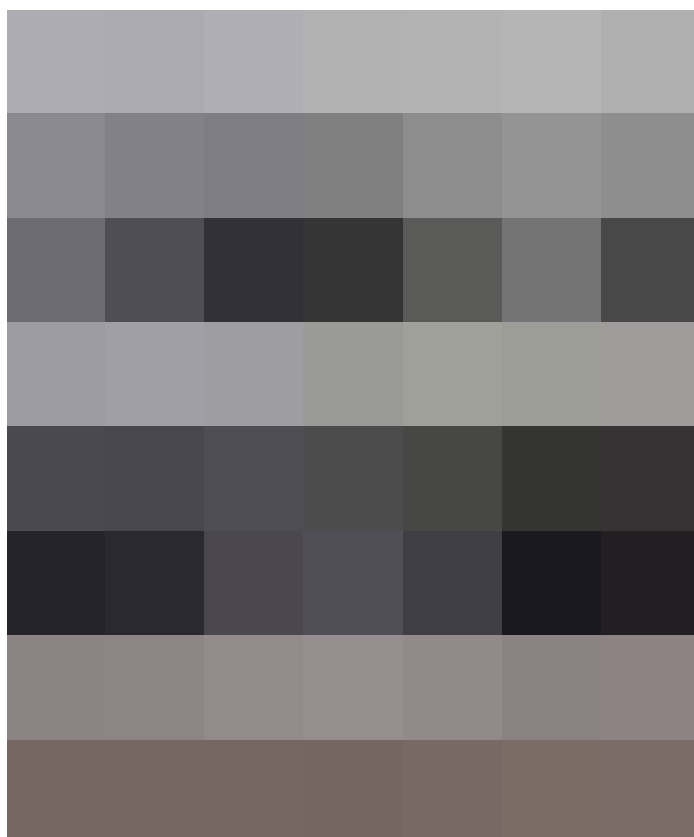
232

232. The John Watson Building, progettato dall'ingegnere civile Rowland Mason Ordish nel 1867 a Mumbai (Bombay).

233. Confronto tra le *weaver's windows* (finestre del tessitore) di un cottage a Rawtenstall (Inghilterra) e la *fenêtre en longueur* (finestra a nastro) di Villa Savoye a Poissy (Francia), progettata nel 1928 da Charles-Eduard Jeanneret (noto come Le Corbusier) e Pierre Jeanneret.

sa superstite in India, prodotto dalla Phoenix Foundry Company a Derby sulla base di progettazione sviluppata nel 1867 dall'ingegnere civile Rowland Mason Ordish (1824-1886) dopo una fruttuosa collaborazione con Paxton per la realizzazione del Crystal Palace di Londra (fig.232). In molti di questi edifici, quindi, si verifica un processo lento ma capillare di sostituzione degli elementi della costruzione tradizionale con

altri la cui novità sostanziale è nel nuovo materiale impiegato (ghisa e vetro), nel processo produttivo (profili metallici, colonne, controventi, infissi, etc.) e nella trasposizione di soluzioni innovative dell'architettura domestica ad edifici con destinazione produttiva/industriale. Un esempio in tal senso che ha apportato modifiche al sistema facciata, ancora relegata agli stilemi murari di tipo medievale è la *weaver's windows*, letteralmente la *finestre del tessitore*, una piccola finestra a comparti continui tipica delle case-filande, declinata successivamente come apertura caratteristica degli edifici industriali in genere. Con la finestra del tessitore le cui peculiarità saranno rintracciabili nella successiva *fenêtre en longueur* (*finestra a nastro*) dell'ingegnere lecorbusierano (fig.233) è in questo momento che prendono forma alcuni elementi tecnici di un nuovo linguaggio architettonico in grado di destare notevole interesse per i futuri pionieri dell'architettura moderna, che rintracceranno qui i segni della continuità tecnico-espressiva con l'unica parte per loro accettabile della tradizione.



233

Struttura e involucro. Origini, forme e tecniche innovative

I folgoranti prolegòmeni nel *Der Stil* di Semper ci riportano come l'Ottocento sia un periodo di transizione tra modelli artistici ormai consumati e nuove forme architettoniche e tecniche d'avanguardia che stanno nascendo dal caos delle arti.

Uno degli aspetti più importanti di questo stadio di transizione è la separazione tra la struttura architettonica e l'involucro degli edifici, considerato da Semper uno dei fondamenti della sua teoria architettonica, in stretta assonanza con l'episteme del rivestimento tessile. «La storia delle relazioni tra struttura architettonica e involucro edilizio, della loro progressiva scissione, della loro reciproca interdipendenza, è una storia tortuosa e complessa, fatta di avvicendamenti teorici e di fatti pratici, una storia strettamente legata all'evoluzione delle tecniche costruttive e largamente influenzata dai fattori di produzione materiale dell'architettura»¹⁷⁵. Uno dei fattori determinanti della scissione tra struttura e involucro è sicuramente ascrivibile alla fase di avvento delle moderne tecnologie per la costruzione di strutture a telaio con i materiali simbolo dell'industria, quali la ghisa, il ferro, l'acciaio ed, in seguito, il calcestruzzo

Con l'introduzione di elementi in ghisa nell'edilizia moderna si assiste ad un fenomeno prettamente utilitaristico e funzionale della struttura a telaio ancora racchiuso all'interno di un involucro murario e vincolato rigidamente per rispondere alle ridotte caratteristiche tensionali del materiale metallico. Il motivo delle ridotte qualità meccaniche (soprattutto per le tensioni di trazione) è demandato al processo di affinamento della ghisa in altoforno, ancora poco evoluto e dipendente della cottura tra minerale e carbone fossile (successivamente sostituito dal *carbon coke*)¹⁷⁶ a basse temperature (fig.234). Con il processo di decarburazione e con l'insufflaggio di aria con *mantici* (strumento meccanico utilizzato per alimentare il fuoco di fucine e forni



234

con la spinta dell'aria), si ottenne il *ferro fucinato*, sufficientemente affidabile per resistere a sollecitazioni di flessione, torsione e taglio, impiegato soprattutto per la realizzazione di chiodi, catene, nastri e collegamenti.

Posteriormente venne adottato il processo di *pudellatura*, brevettato in Inghilterra nel 1783 da Henry Cort, che consisteva nell'insufflare aria all'interno di un *forno di riverbero* raffreddato con acqua, contenente ghisa o minerali di ferro. Nonostante l'eliminazione di un quantitativo considerevole di carbonio, la qualità del *ferro pudellato* era comunque discontinua e poco adatta alle necessità della pratica del costruire. Il processo di *laminazione* produsse un notevole miglioramento contro la fragilità del ferro pudellato, ma ancora troppo lontano dall'ottenimento di un materiale omogeneo. Nel 1856, Sir Henry Bessemer (Charlton, 1813 – Londra, 1898) è tra i pionieri della siderurgia per la produzione dell'acciaio. Il processo avveniva in un grande recipiente a forma di pipa «sostenuto da due perni e girevole intorno ad essi, con il fondo munito di fori in comunicazione con le pompe d'aria ed il suo vertice aperto in cui viene versata la ghisa fusa proveniente dai cubilotti. Le pompe d'aria producono l'effetto di ossidazione del silicio e manganese, nonché di una parte del fer-

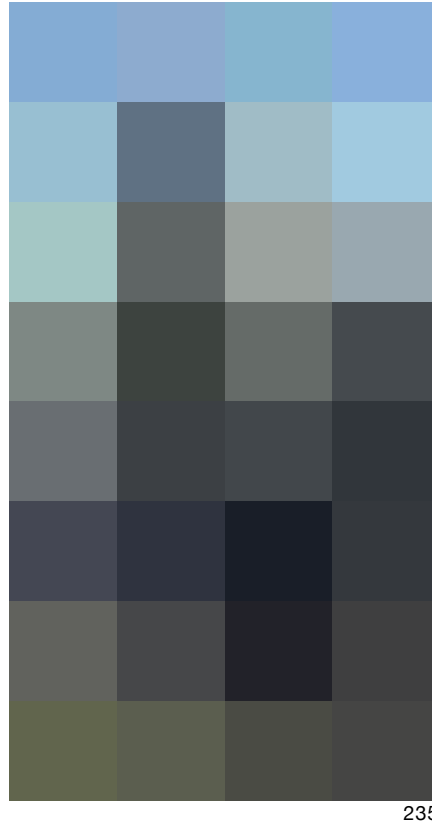
Ferro fucinato e pudellato

Contenuto di carbonio	%	0,5-1,5
Peso specifico	[g/cm ³]	-
Temperatura di fusione	[°C]	~1500
Caratteristiche meccaniche	malleabile, saldabile, non temperabile	

Acciaio

Contenuto di carbonio	%	1,5-2,0
Peso specifico	[g/cm ³]	-
Temperatura di fusione	[°C]	1200-1500
Caratteristiche meccaniche	omogeneo, poco malleabile, temperabile	

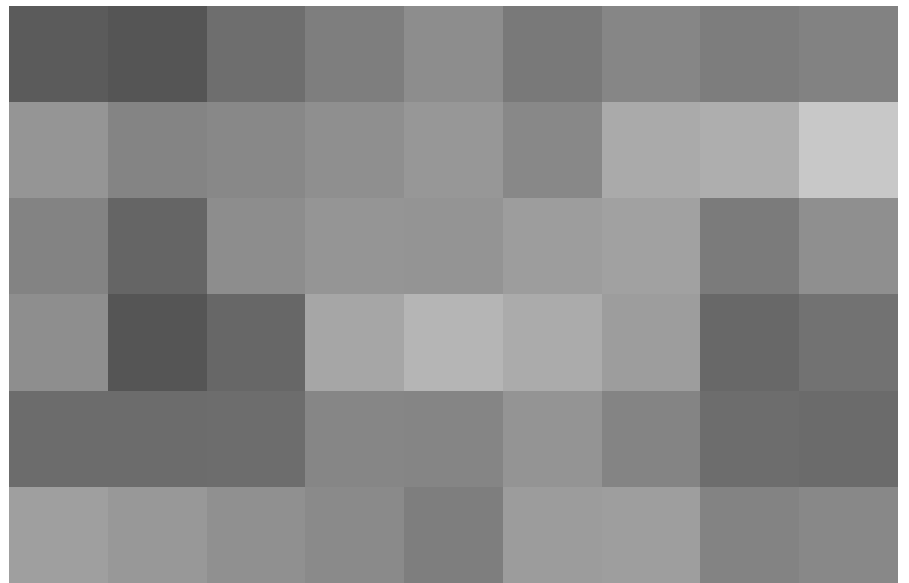
- 235. Antico convertitore Bessemer dell'acciaieria in Fagersta, Svezia, © Magnus Binnerstam.
- 236. Processo di Bessemer per la produzione di acciaio mediante conversione della ghisa, Sheffield, Inghilterra, 1888, © Universal History Archive.
- 237. Fasi di produzione del ferro e dell'acciaio secondo Werner e Seidel.



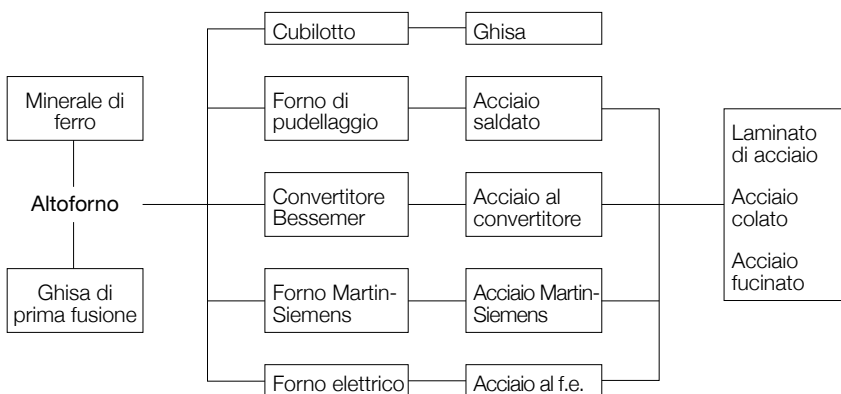
ro. Si formano così le scorie; ma poiché il processo di ossidazione è accompagnato da una emissione di calore, con conseguente aumento di temperatura, così la massa che si trasforma in ferro ed acciaio a punto di fusione più elevato che non la ghisa, trova la quantità necessaria e sufficiente di calore per fondere nello stesso processo di ossidazione dei silicio. Se la rapidità del processo appena descritto è un vantaggio economico è contemporaneamente uno svantaggio dal punto di vista tecnico, in quanto non si può sorvegliare minutamente l'operazione con prelievi di campioni e conseguenti variazioni di miscele»¹⁷⁷ (figg.235-236).

Nel 1865, il metodo Martin-Siemens risolse la problematica legata all'esatta dosatura di carbonio, ottenendo un materiale metallico particolarmente omogeneo e adatto per la produzione di profili strutturali.

235

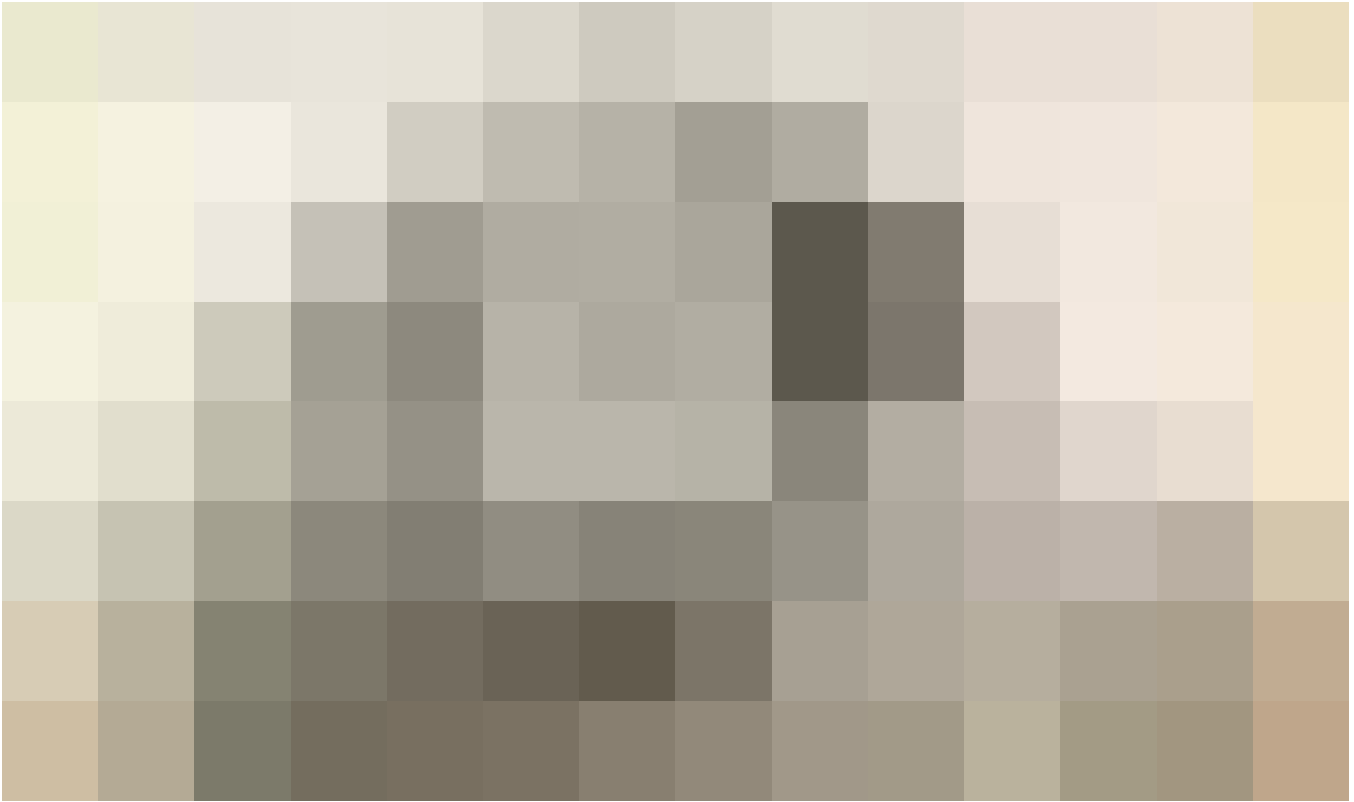


236



L'invenzione del convertitore Bessemer avrebbe reso possibile la realizzazione dei cosiddetti *santuari della tecnica moderna*, aprendo il filone tecnologico delle grandi coperture nei quali entrano a far parte quel gruppo di edifici, quali mercati, grandi magazzini, palazzi per uffici, stazioni ferroviarie, padiglioni e industrie. Tali opere, talvolta espressione di grandiosità e progresso, sono il primo esempio di libertà progettuale, non più relegata ai precetti dell'architettura tradizionale.

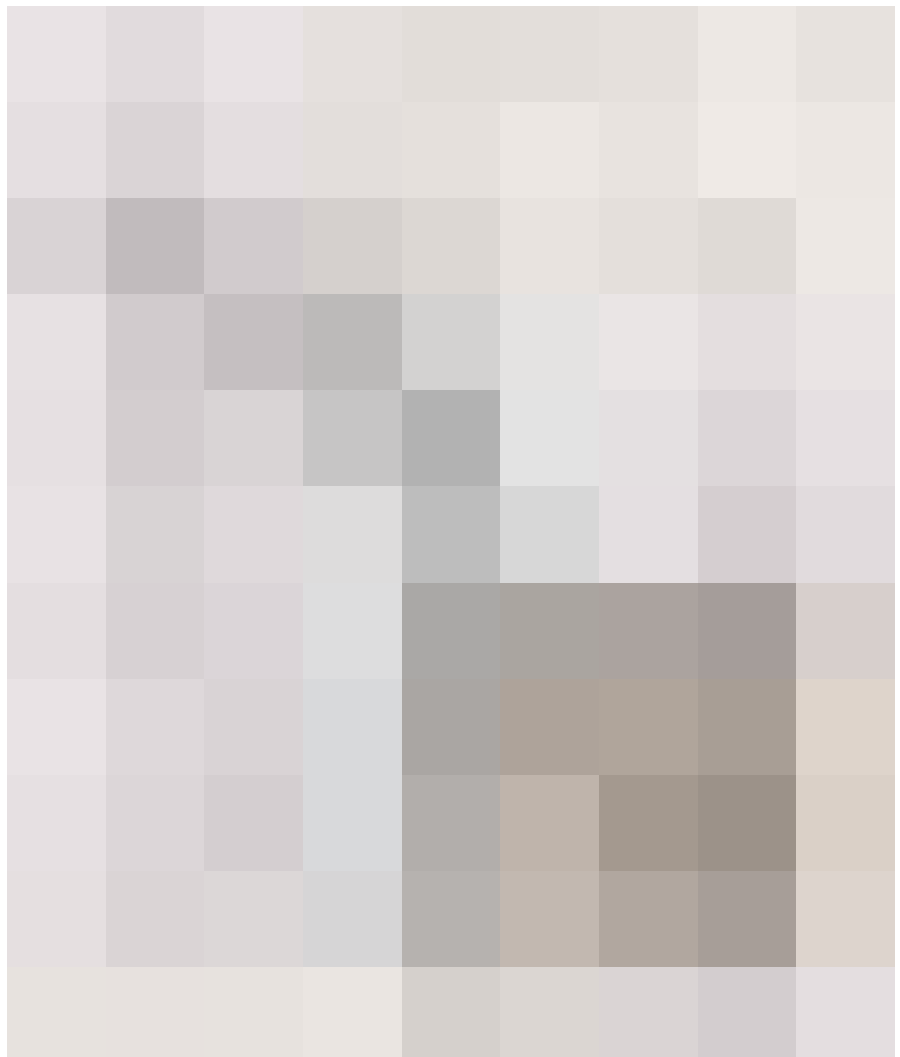
237



238

Tra i primi esempi di copertura di notevole dimensione, secondo una declinazione strutturale derivante dalla costruzione dei primi ponti in struttura metallica (come l'Iron Bridge, il primo ponte in ghisa sul fiume Severn a Coalbrookdale) è la cupola in ghisa della *Halle aux Blés* di Parigi, trasformata nel 1888 nella *Bourse du Commerce*. Ideata dall'architetto Francois-Joseph Bélanger (Parigi, 1744 – Parigi, 1818) e costruita in sostituzione della precedente cupola in legno, distrutta da un incendio nel 1802. La cupola con una luce di 40m è costituita da un rete estremamente sottile di costoloni di ferro e arcarecci metallici circolari (fig.238).

Sempre in Francia, un altro grandioso esempio è il *Mercato a Les Halles* a Parigi, progettato nel 1851 da Victor Baltard (1805-1874) e diventato prestigioso non solo per la sua struttura innovativa in ferro battuto, vetro e laterizio (figg.239-240), ma per il celebre romanzo *Il ventre di Parigi* di Émile Zola. Tra le numerose richieste progettuali, Baltard si ritrova a dover affrontare le restrittive normative igieniche: a tal proposito progetta un innovativo in-



239

238. Nella pagina precedente: Jacques Ignace Hittorff, Plan d'étude pour la conception de la coupole, 1811, © Wallraff-Richartz-Museum et Fondation Corboud, Colonia.

239. Dettaglio dell'involucro in ghisa e laterizio del Mercato a Les Halles a Parigi, progettato nel 1851 da Victor Baltard, in Vierendeel A., *La construction architecturale en fonte, fer et acier*, planche 15, Louvain: A. Uystpruyst, Parigi, 1902.

240. Struttura metallica del mercato a Les Halles a Parigi, © Archivio di Parigi, fondo Documents figurés, 1863.

241. Capannone della fonderia Sayner, © Lothar Spurzem.



240

volucro alternando campate in laterizio e ghisa con campate trasparenti utilizzando vetri smerigliati in modo tale da evitare che i raggi solari riscaldino troppo l'ambiente interno, preservando la merce del mercato. Progetta, inoltre, un innovativo sistema di evacuazione delle acque reflue - soprattutto quelle derivanti dai padiglioni destinati alla lavorazione delle carni - e di un sistema a pozzi dotati di pompe idrauliche per la raccolta dell'acqua piovana necessaria alle operazioni di lavorazione di alcuni prodotti. Una grande innovazione fu la sostituzione dell'impianto di illuminazione

con lanterne alimentate a petrolio, prima con un impianto illuminotecnico a gas, collegato direttamente ai collettori cittadini, poi con l'impianto elettrico con *lampade ad arco* (ideata da Humphrey Davy), di cui Parigi era già dotata dal 1841.

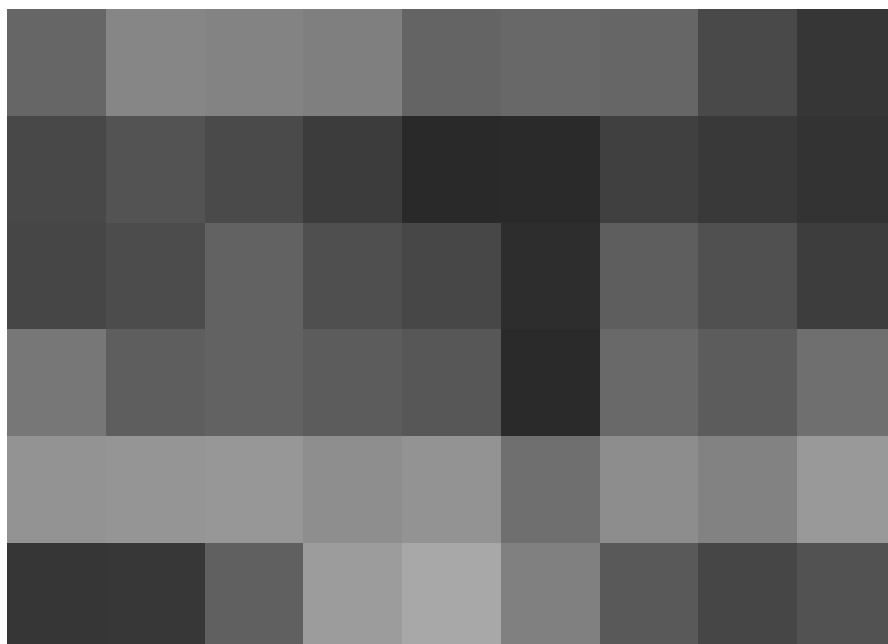
Un altro santuario della tecnica moderna, soprattutto per il suo impianto basilicale e con elementi decorativi goticizzanti (in modo particolare nella facciata trasparente in ghisa e vetro) è il capannone colate della *fonderia Sayner* (*Sayner Hütte*), progettato nel 1830 da Karl Ludwig Althans a Bendorf (fig.241).

242. Nella pagina successiva: dettaglio della struttura metallica della stazione di Londra St Pancras, in Vierendeel A., *La construction architecturale en fonte, fer et acier*, planche 22, Louvain: A. Uystpruyst, Parigi, 1902.

243. Nella pagina successiva: dettaglio della struttura metallica della stazione di Berlino Lehrte, in Vierendeel A., *La construction architecturale en fonte, fer et acier*, planche 23, Louvain: A. Uystpruyst, Parigi, 1902.

244. Nella pagina successiva: dettaglio della struttura metallica della stazione di Bruges, in Vierendeel A., *La construction architecturale en fonte, fer et acier*, planche 71, Louvain: A. Uystpruyst, Parigi, 1902.

245. Nella pagina successiva: dettaglio della struttura metallica della stazione a Lille, in Vierendeel A., *La construction architecturale en fonte, fer et acier*, planche 89, Louvain: A. Uystpruyst, Parigi, 1902.



241

Le architetture che più di tutte segneranno il progresso dell'industria, sono sicuramente le stazioni ferroviarie la cui struttura metallica ha il compito di segnare l'impressione spaziale della città attraverso grandiosi vestiboli illuminanti dalla fulgida copertura vetrata. L'eccelsa capacità tecnica è ascrivibile a numerosi fattori, quali l'affinamento del calcolo nel dimensionamento degli elementi, nello sviluppo di nuove forme costruttive (come le travi reticolari in ferro) e soprattutto nel processo di prefabbricazione industriale caratterizzata - attraverso i nuovi metodi produttivi - da una elevata qualità e precisione di tutti gli elementi costruttivi.

Tra i numerosi esempi si riportano alcune delle stazioni europee più importanti, quali: la *stazione ferroviaria di Londra St Pancras* in Inghilterra (1868) (fig.242), la *stazione di Berlino Lehrte* in Germania (1871) (fig.243), la *stazione di Bruges* in Belgio (1876) (fig.244), la *stazione a Lille* in Francia (1848) (fig.245).



242



243



244

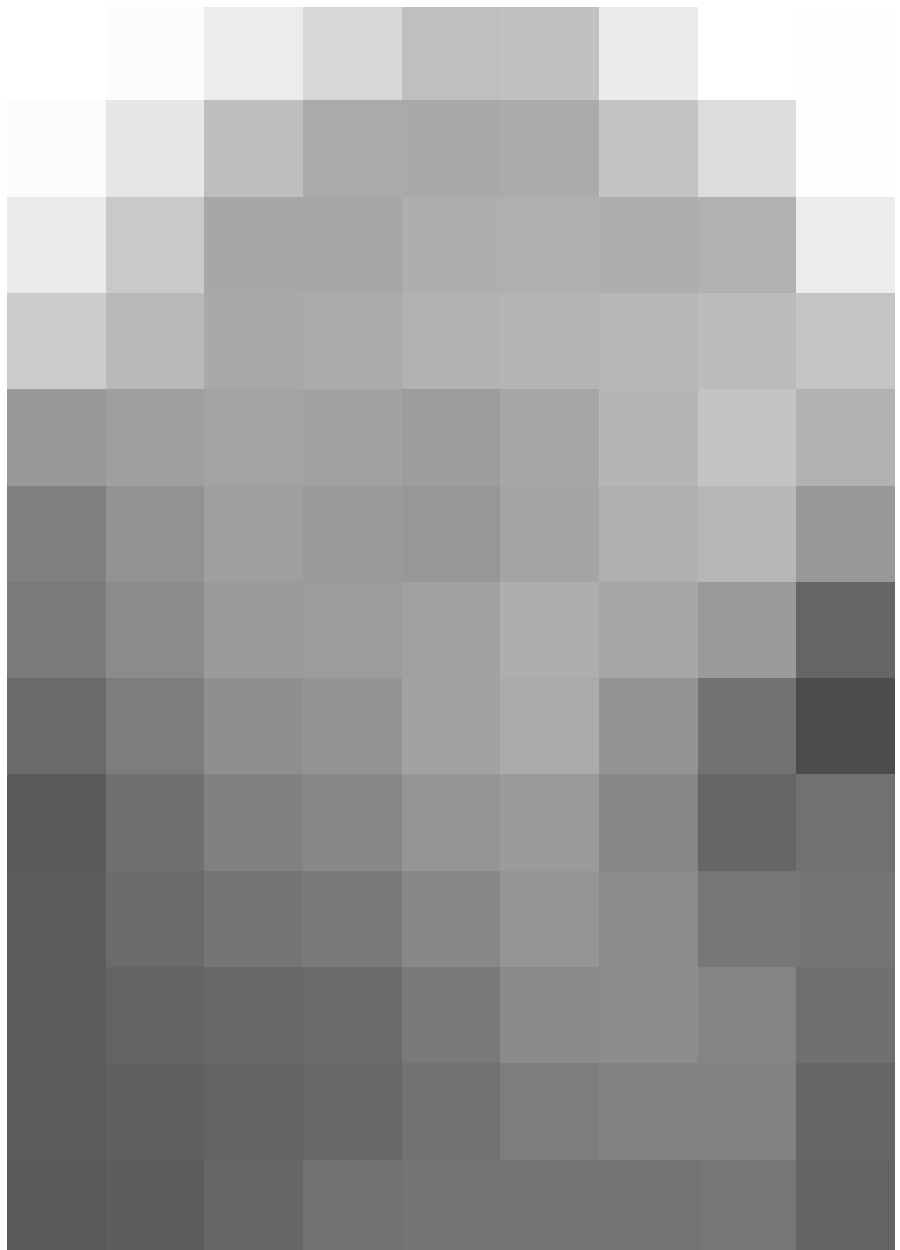


245



246

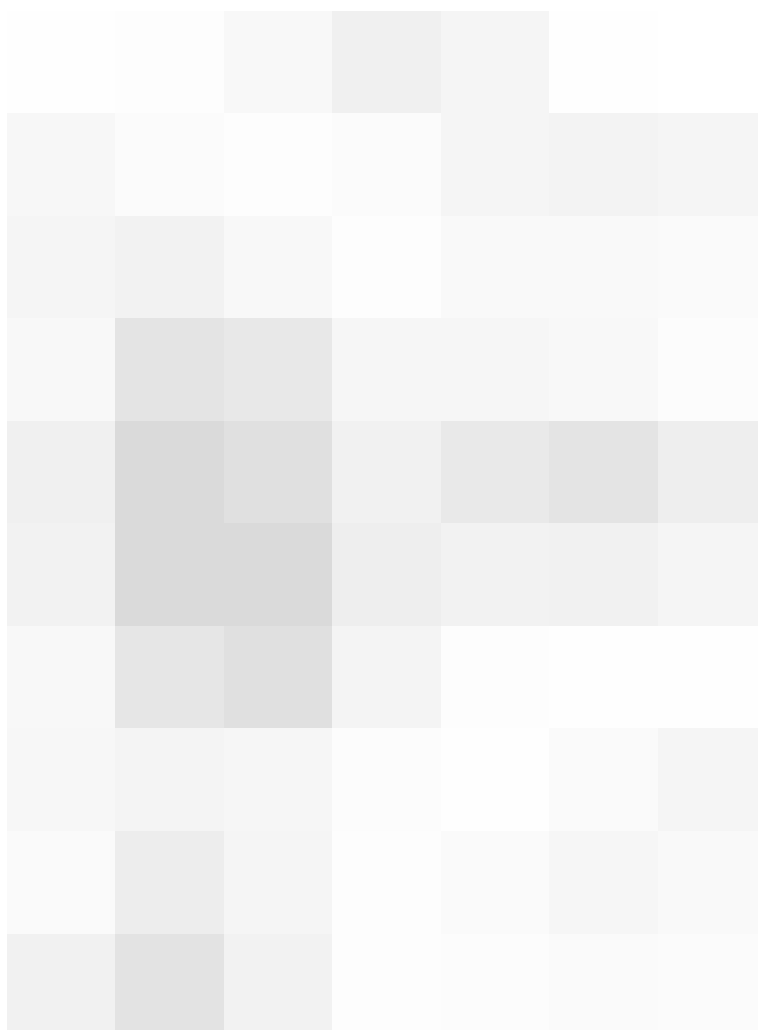
Tuttavia sarà il ciclo delle grandi esposizioni universali dell'Ottocento a riassumere ed esaltare l'esperienza tecnica ed espressiva delle grandi coperture in vetro e ferro/ghisa. Tra il 1801 ed il 1849 solo in Francia si susseguono ben sedici esposizioni. Sarà solo nel 1851 quando in Inghilterra, forti della fiducia nel progresso industriale, che si propose la prima Esposizione Universale in terra inglese. La mostra venne impostata entro un unico grandioso edificio e indetto un concorso cui parteciparono 225 architetti e che non diede alcun risultato soddisfacente. «Mentre si porta avanti con scarsa convinzione un progetto d'ufficio, il giornale *Illustrated London pubblica*, nel luglio del 1850 un progetto di Joseph Paxton (Milton Bryant, 1803 – Sydenham, 1865), che il *Punch* riprende battezzandolo "Crystal Palace". Il progetto suscita immediato entusiasmo nella Commissione per l'Esposizione e nel Principe Alberto che ne è l'animatore, e si decide di realizzarlo; è il 15 Luglio 1850, il 1° Maggio del 1851 l'Esposizione Universale di Londra si inaugura»¹⁷⁸ (fig.246). Il monumento all'industria moderna, realizzato in soli quattro mesi, rappresenta uno dei più completi esempi di architettura metallica prefabbricata, in cui Paxton elimina completamente il concetto di concrezione muraria a favore di una libera struttura a telaio metallico (fig.247).



247



248



Nel complesso dell'Esposizione mondiale del 1867 a Parigi, oltre all'enorme vestibolo ovale a campata unica in ferro, ghisa e vetro (fig.248), sono presenti numerosi padiglioni progettati da Frédéric Le Play la cui copertura presenta uno sviluppo inedito della tradizionale capriata lignea, la cosiddetta *capriata Polonceau*, denominata così dall'omonimo inventore Jean-Barthélémy Camille Polonceau (Chambéry, 1813 - Viry-Châtillon, 1859) (fig.249).

La capriata in legno, infatti, viene gradualmente migliorata per coprire luci maggiori - dalla struttura di sospensione fino alla struttura portante reticolare in ghisa e ferro - inventata rispettivamente dagli ingegneri Wiegmann nel 1836 e, come detto, da Polonceau nel 1839.

Anche nella quarta Esposizione Universale di Parigi del 1878, viene riproposta la *Galerie des Machines* un edificio provvisorio al Campo Di Marte, su progetto di Lèopold Hardy e dell'ingegner De Dion, che rispetto alla versione precedente presenta membrature più snelle ed elimina i contrafforti.

249



250

Nella quinta Esposizione Universale di Parigi del 1889, la *Galerie de Machines*, progettata da Ferdinand Dudert (Douai, 1845 – Parigi, 1906) con l'aiuto degli ingegneri Victor Contamin (1840-1893), Pierron e Charton assumerà la forma più completa e raffinata rispetto alle precedenti versioni, segnando insieme alla *Tour Eiffel* - progettata da Alexandre Gustave Eiffel (Digione, 1832 – Parigi, 1923) - il trionfo delle strutture metalliche ed il raggiungimento della padronanza totale delle conoscenze tecniche sulle strutture metalliche in ghisa, ferro ed acciaio (fig.250).

L'edificio aveva un monumentale ingresso che immetteva in un largo vestibolo a tre navate situato sull'asse principale del Campo di Marte, in cui erano presenti gli espositori provenienti da tutto il mondo (fig.251). La facciata in continuità con l'*avenue de la Bourdonnais*, fu realizzata

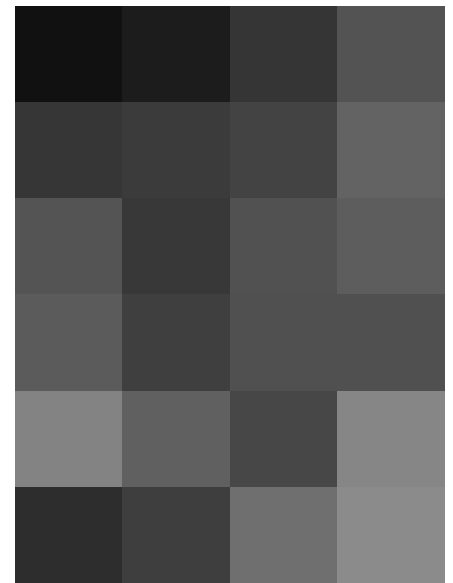


251

246. Nelle pagine precedenti: vista esterna del Crystal Palace, progettato nel 1850 da Joseph Paxton, © Royaume-Uni, Londres, The British Museum, Londra, 1854.
247. Nelle pagine precedenti: John Saddler, vista interna del Crystal Palace, 1851,
248. Nelle pagine precedenti: dettaglio dell'involucro in ghisa, ferro e vetro della *Galerie des machines* (1867), in Vierendeel A., *La construction architecturale en fonte, fer et acier*, planche 24, Louvain: A. Uystpruyt, Parigi, 1902.
249. Nelle pagine precedenti: dettaglio della capriata a struttura mista Polonceau, in Musso G., Copperi G., *Particolari di costruzioni murali e finimenti di fabbricati*, Parte II - *Opere di finimento ed Affini*, G.B. Paravia e Comp., Torino, Roma, Milano, Firenze, Napoli, 1912.
250. Nella pagina precedente: Lucien Baylac, vista panoramica dell'Esposizione Universale di Parigi del 1889-1900.
251. Nella pagina precedente: vista interna della *Galerie de Machines* progettata da Ferdinand Dudert per l'Esposizione Universale di Parigi del 1889-1900.
252. Dettaglio del piede di imposta delle campate metalliche della *Galerie des machines* (1889), in Vierendeel A. (1902), op. cit., planche 81.
253. *Ibidem*.

con una soluzione di parete continua, la più grande mai vista prima, con la particolarità di sopportare soltanto il peso proprio e la spinta del vento, con elementi in ferro puledellato e acciaio alternati da vetrate colorate e sormontate in sommità da una serie di archetti e da un enorme arco centrale ubicato in corrispondenza dell'ingresso, richiamando la struttura del Crystal Palace. La facciata, inoltre, può essere considerata il primo esempio, seppur primordiale, di *curtain wall*, sviluppato nel secolo successivo dalla scuola di Chicago per la realizzazione degli edifici direzionali e dei primi grattacieli. La padronanza tecnica dei progettisti, però, è rintracciabile nei raffinati nodi costruttivi, in modo particolare nel piede di imposta delle campate metalliche ed al punto d'intersezione al colmo della copertura (fig.252). Tutto lo sviluppo ad arco della copertura ad elementi tralicciati presentava tre cerniere, due alla base ed una all'estremo superiore, in modo da compensare il fenomeno delle dilatazioni termiche e di ritiro degli elementi metallici al variare della temperatura ambientale.

I grandi semiarchi trovavano appoggio su un piatto-cerniera solidarizzato alla struttura muraria di fondazione profonda quattro metri (fig.253). Una struttura isostatica ed in perfetto equilibrio, emblema di una audacia ingegneristica oltre i limiti della fisica, riferimento assoluto per il successivo testo aforistico *Glasarchitektur* di Paul Scheerbart (Danzica, 1863 – Berlino, 1915) e del *Padiglione di Vetro* di Bruno Taut (Königsberg, 1880 – Istanbul, 1938).



253



252

Nell'edilizia minore, infine, continua il processo di rinnovamento dei sistemi costruttivi, lasciando inalterati la distribuzione, l'architettura e l'involucro degli edifici, quest'ultimo racchiuso all'interno di una muratura in blocchi litici o di laterizio (fig.254). L'aspetto legato all'incombustibilità dei materiali viene ulteriormente indagato sperimentando nuove soluzioni tecniche a prova d'incendio (come per esempio la struttura a prova di incendio interamente metallica brevettata nel 1800 da Samuel Wyatt), soprattutto per solai e plafonature, da realizzare ex novo a da sostituire o sovrapporre all'organismo edilizio esistente (figg.255-256).

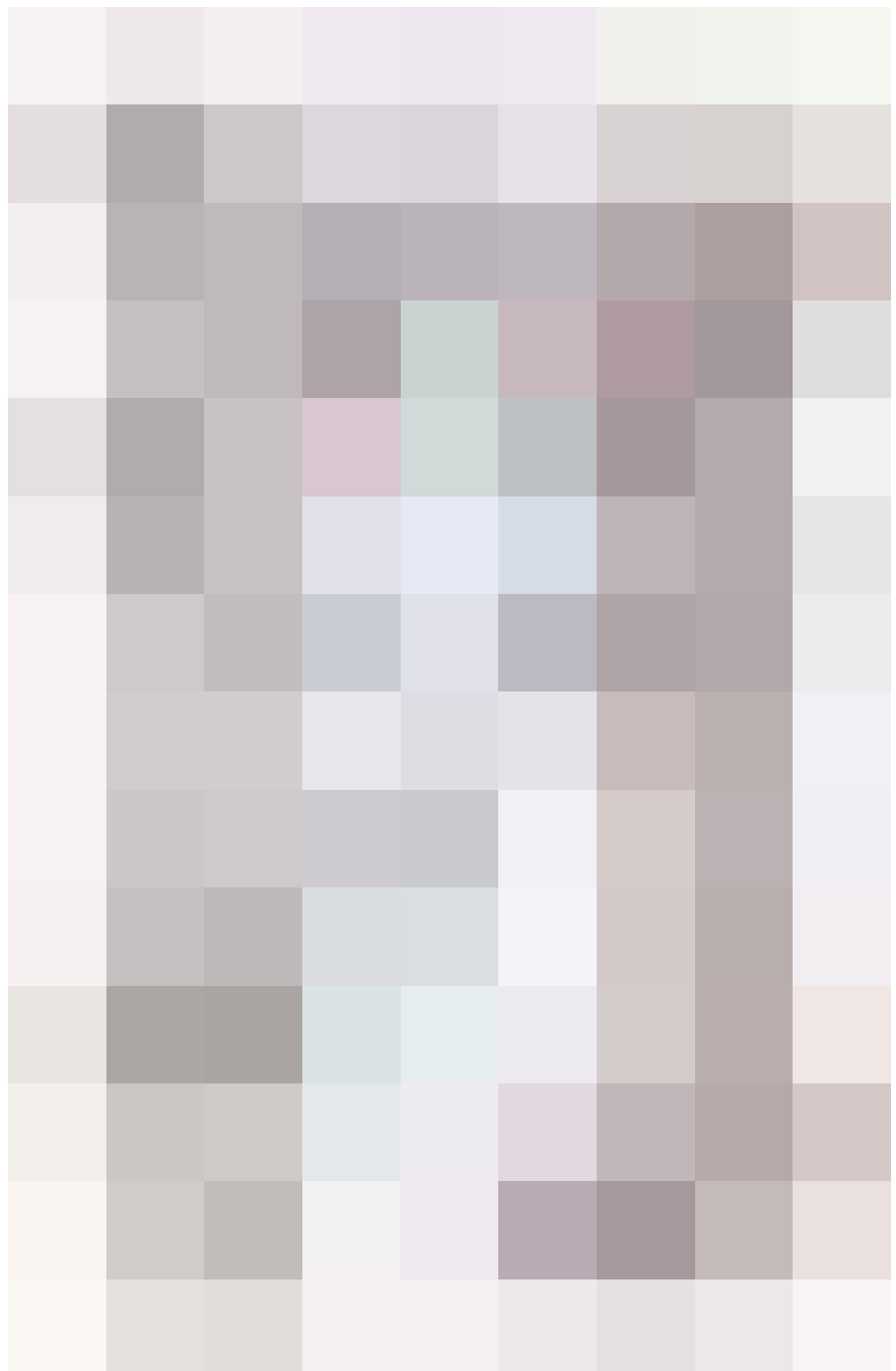
Si tratta del primo processo di rinnovamento attuato su manufatti esistenti secondo il principio della *manutenzione*¹⁷⁹ e della *manutenibilità*¹⁸⁰. L'esperienza ha mostrato che tali edifici sono stati oggetto, nel corso degli anni, ad un processo di *obsolescenza* riconducibile ad un degrado materico e “tecnologico”, cui ha fatto seguito un non meno importante “invecchiamento tipologico” riferibile alla organizzazione e distribuzione degli spazi interni; e ciò pur nella continuità dell'uso. Manifestazioni obsolescenziali e patologie appaiono accentuate ed impreviste in relazione ai caratteri tecnologici di tali fabbricati, ideati e realizzati con il connubio tra tecniche e materiali profondamente diversi secondo un processo di sostituzione e sovrapposizione che, agli apparenti e immediatamente percepibili effetti positivi, affiancava incongruenze e potenziali “aspetti di crisi”. A ciò si deve aggiungere la particolare vita di questi immobili che, progettati e realizzati all'alba della nascente architettura moderna, sono stati oggetto di un continuo adeguamento alle nuove esigenze sia sotto il profilo della abitabilità sia sotto quello della sicurezza e del rispetto di norme sempre più rigide e particolareggiate (soprattutto quelle igienico-sanitarie). Tali “adeguamenti” eseguiti peraltro al di fuori di ogni controllo e spesso da soggetti inconsapevoli della particolare delicatezza delle struttu-

re su cui stavano operando, ripetuti nel tempo ed in totale autonomia - dagli orizzontamenti, alla diminuzione delle sezioni murarie resistenti, all'alterazione delle connessioni tra gli elementi di fabbrica, e così via, a cui si devono aggiungere gli effetti di inconsulte sopraelevazioni, spesso sono stati causa di una significativa diminuzione dei caratteri di sicurezza degli elementi strutturali e dell'intero complesso edilizio, il cui recupero resta quindi centrale nella più ampia e complessa operazione di riuso e riqualificazione degli immobili¹⁸¹.

254. Involucro in pietra, laterizio e acciaio: le pilastrate complesse per le botteghe, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933, tav.XXXV.

255. Nella pagina successiva: solai e plafoni incombustibili, in Vierendeel A., *La construction architecturale en fonte, fer et acier*, planche 98, Louvain: A. Uystpruyt, Parigi, 1902.

256. Nella pagina successiva: rivestimento di solai e controsoffitti lignei con lamine incombustibili di acciaio, in Vierendeel A., *La construction architecturale en fonte, fer et acier*, planche 103, Louvain: A. Uystpruyt, Parigi, 1902.



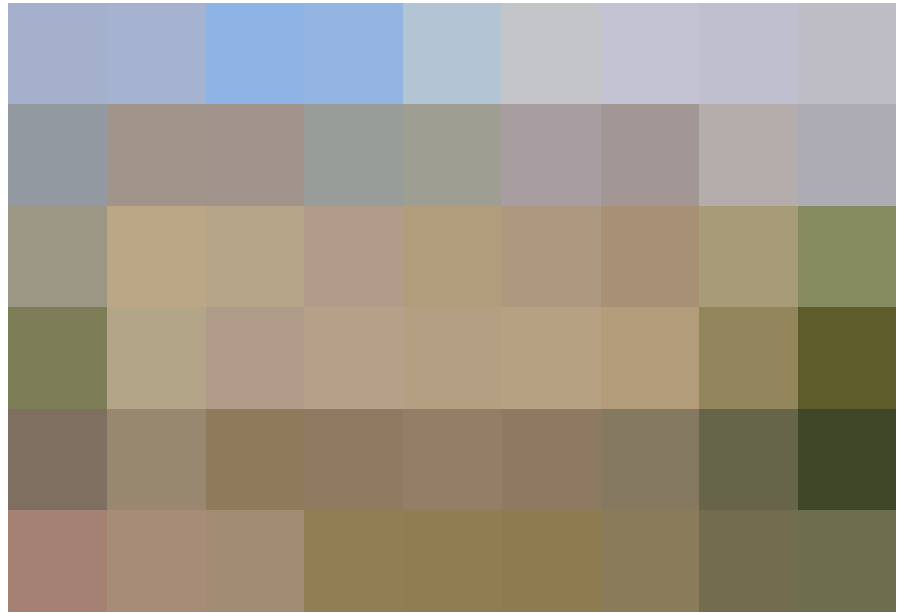


255



256

Un sintomo di questa mutazione già in atto, soprattutto nella scissione tra struttura e involucro, può essere rintracciato in numerosi episodi della storia dell'architettura. Il celebre *Moulin de la chocolaterie Menier* a Noisiel (Francia), progettato nel 1871 da Jules Saulnier, può essere considerata la prima architettura in cui si manifesta chiaramente una organica e compiuta separazione tra la struttura metallica pluripiano e l'involucro in mattoni di laterizio (figg.257-264). La struttura metallica costituita da montanti verticali, orizzontali e controventi diagonali è, infatti, inglobata nella muratura secondo un gioco espressivo di planarità e sottosquadro rispetto al filo esterno della muratura. Nel progetto, l'architetto rinuncia peraltro a qualsiasi forma di gerarchizzazione dettata dagli ordini esibendo, invece, un onesto disegno di pura espressione ornamentale, coerente con la raffinatezza della esile struttura intelaiata. «*La compagine tiene insieme in modo perfettamente coerente il disegno della delicata struttura intelaiata e la natura di rivestimento della parete. Il disegno geometrico della parete di tamponamento presenta un motivo in diagonale che amplifica quello delle losanghe metalliche, addensando attorno all'asse verticale delle bifore una composizione a rosoni, un fregio piatto di forme circolari e semicircolari. Per il resto, nella facciata, non è rappresentato nessun basamento, nessuna cornice, solo un semplice coronamento nel lembo di chiusura finale. La fabbrica Ménier rappresenta forse la prima edizione di un edificio schiettamente semperiano, dove è disvelato un nuovo principio di ordine, appropriato alla nuova epoca, affiorante dallo stato di “caos” descritto dal maestro tedesco. Nella sua struttura sono chiaramente distinguibili ed evidenziati i famosi “quattro elementi” dell'architettura semperiana: la modellazione plastica e stratificata del basamento, l'intelaiatura portante indipendente come montaggio di elementi elastici collegati alla copertura (metallici o lignei, spesso montati a secco), e il rivestimento-involucro come dispositivo di definizione dello spa-*



257

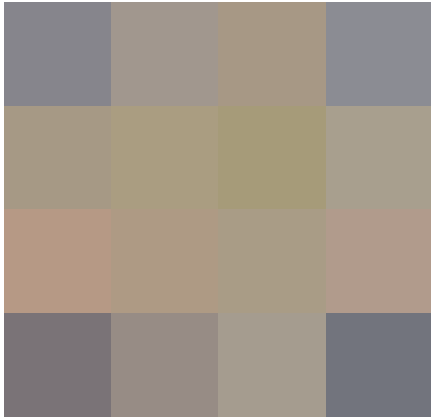
zio di natura tessile e stratificata, spesso e caratterizzato dalla smaterializzazione della sua superficie»¹⁸². Questa spregiudicata linea di interpretazione della natura intelaiata e stratificata dell'architettura di cui Semper si fa portatore pervade tutto il contesto geografico e culturale dell'Europa centro-settentrionale, dove già era presente una tradizione costruttiva elastico-lignea che, a differenza di quella muraria, già esibiva gli elementi del telaio e del rivestimento-involucro nella loro distinzione. Tradizione che ha profondamente influenzato le tecniche costruttive e le forme dell'architettura. Essa sarà portatrice di profonde trasformazioni e influssi destinati a produrre gli esiti più recenti, quelli sotto i nostri occhi: uno scenario dell'architettura dove la pratica e l'estetica dell'involucro sono diventate tema quasi esclusivo dell'architettura contemporanea. Una cultura progettuale diffusa che presuppone non solo il principio della separazione tra struttura e involucro, ma da esso fa discendere in linea retta la concezione della parete-diaframma, la cui natura tessuta e stratificata è ormai universalmente riconosciuta. Con questa diventa possibile la liberazione di una molteplicità di inedite risorse espressive e da essa prende avvio la rivalutazione della componente della “superficie” intesa come campo di applicazioni tattili, figurative ed esplicitamente decorative¹⁸³.

257. *Moulin de la chocolaterie Menier* a Noisiel (Francia), progettato nel 1871 da Jules Saulnier, © Détours en France - Hugues Derouard.

258. Nella pagina successiva: dettaglio dell'involucro del *Moulin de la chocolaterie Menier* a Noisiel (Francia).

259. Ibidem.

Nel *Moulin de la chocolaterie* di Noisiel, Saulnier prende la decisione di svelare la struttura metallica su tutti i lati dell'edificio. Questo gesto innovativo rende questo mulino uno dei primi edifici industriali al mondo con una struttura portante in metallo visibile sulla facciata.



258

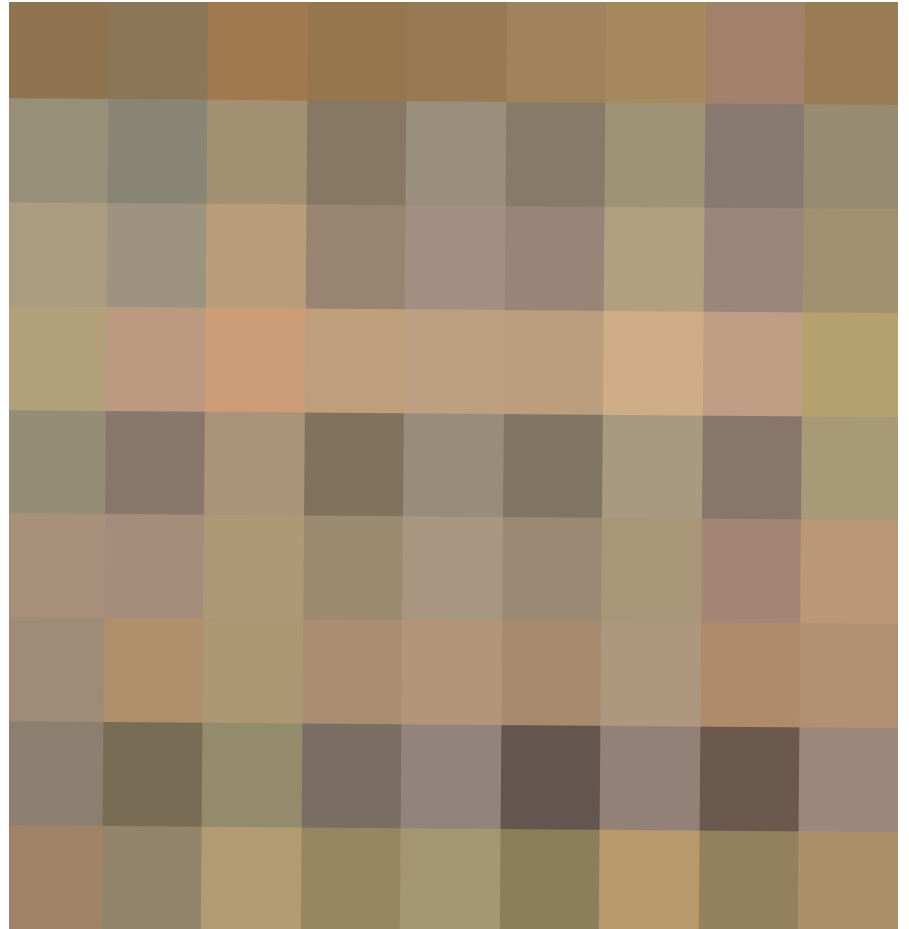
260. Vista generale del Moulin de la chocolaterie Menier a Noisiel, in Calliat V., Lance A., Encyclopédie d'architecture, planches 234-235, Bance Editeur, 1857.

261. Nella pagina successiva: Moulin de la chocolaterie Menier a Noisiel, © Cité de l'architecture & du patrimoine/MMF/Gaston Bergeret.

262. Nelle pagine successive: tavola tecnica del Moulin de la chocolaterie Menier a Noisiel, in Calliat V., Lance A., (1857), op. cit. planche 183.

263. /vi, planche 464.

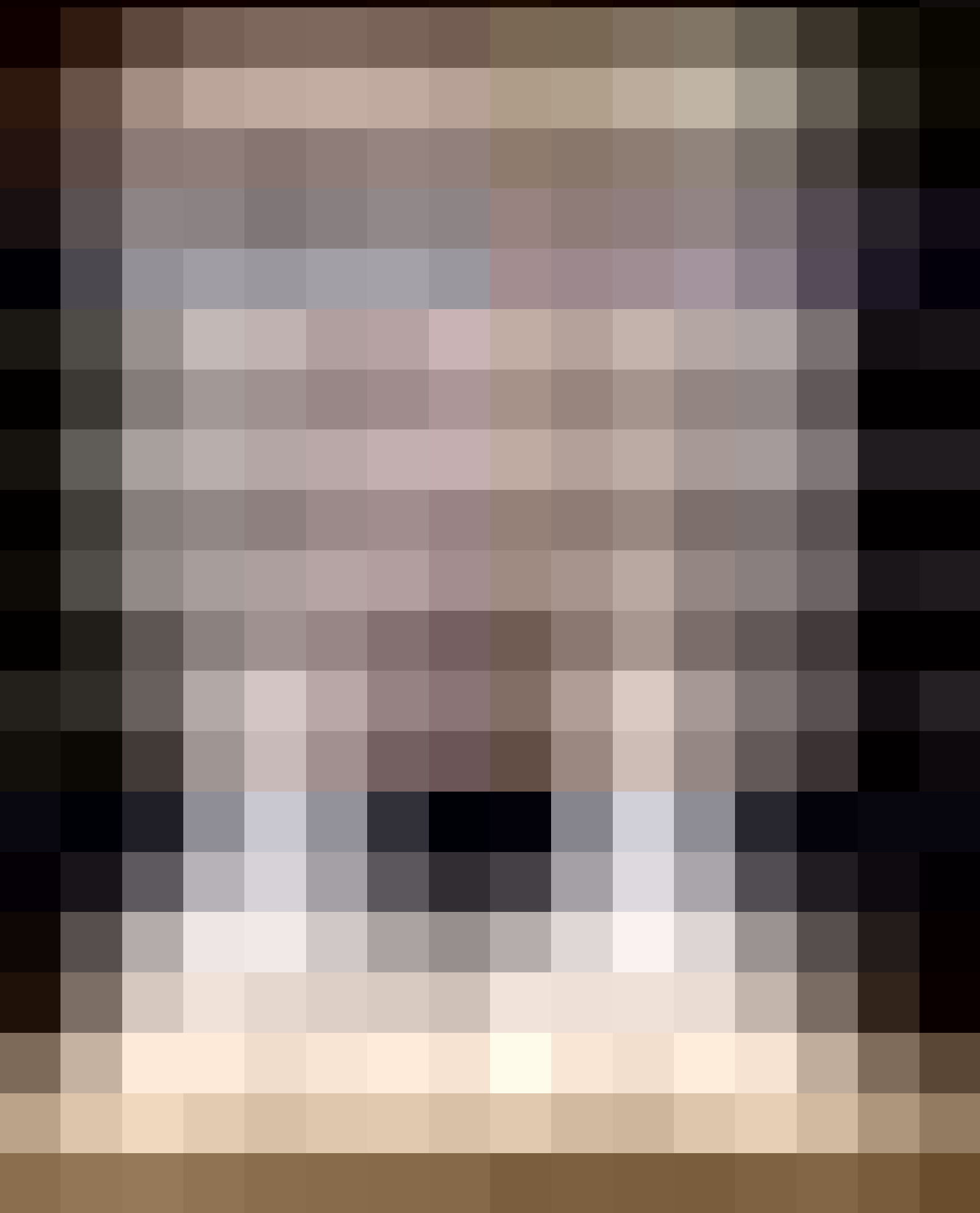
264. /vi, planche 173.



259

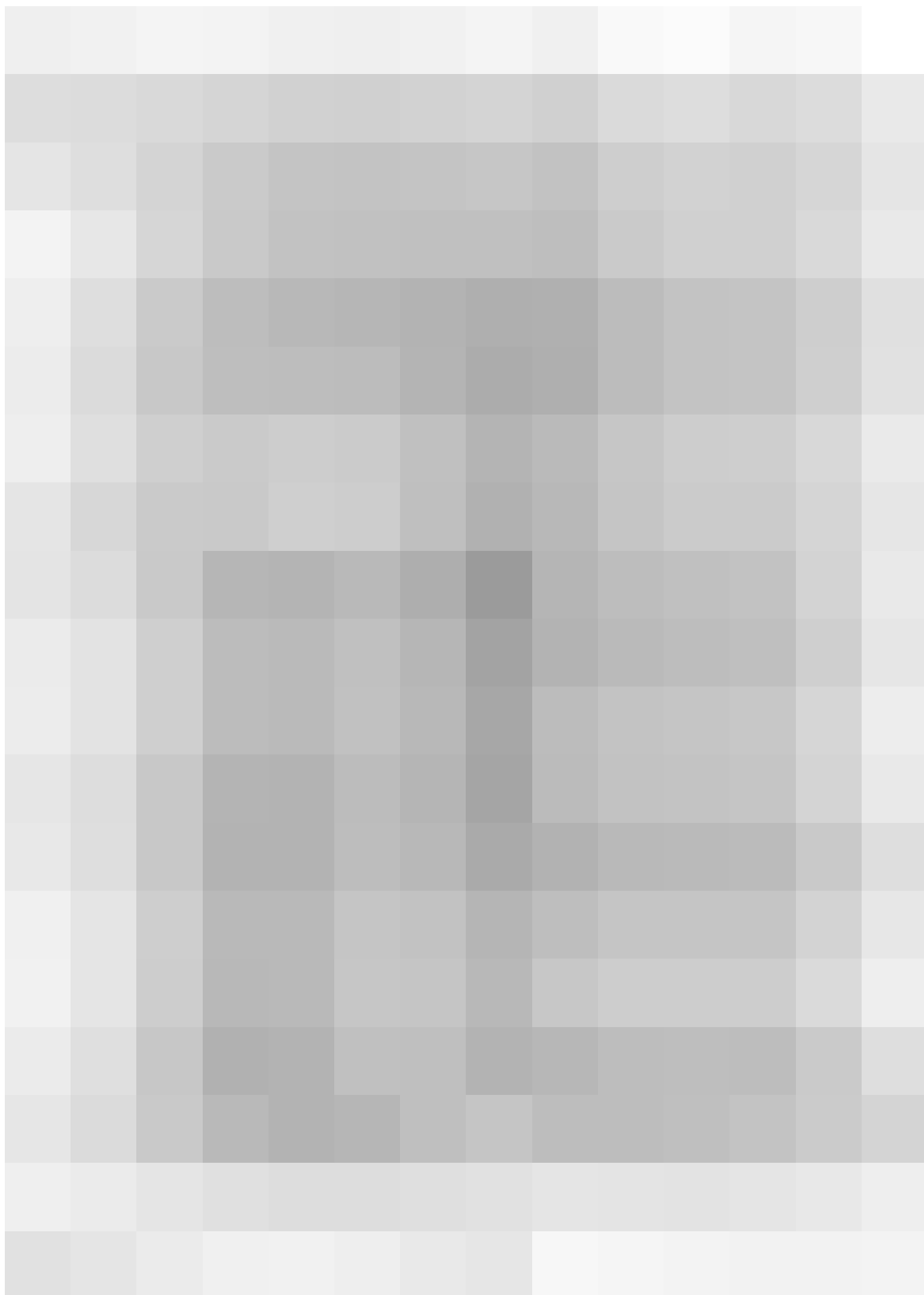


260







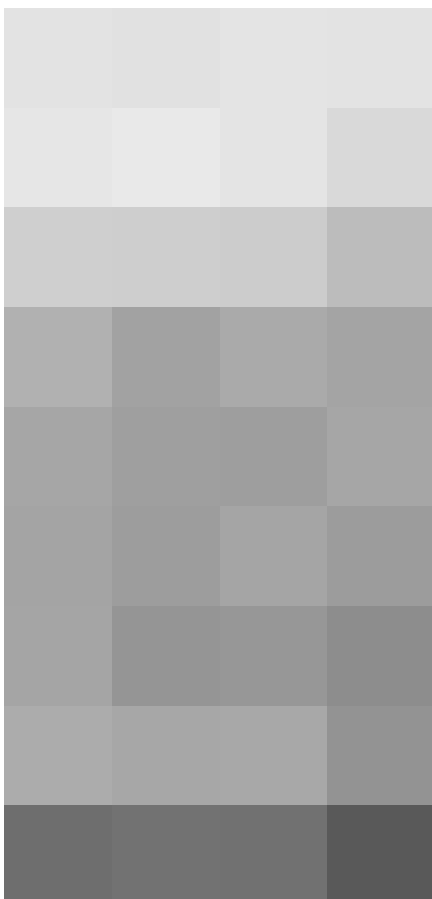


La scuola di Chicago e la vicenda costruttiva americana. Dal Balloon Frame al Curtain Wall
 Mentre in Europa imperversava l'ondata impetuosa della rivoluzione delle macchine e del rinnovamento architettonico, in America del Nord, invece, una situazione inversa decretò il successo del sistema prefabbricato a telaio ligneo *Balloon Frame*, la *struttura a pallone* senza né invenzione né inventore, ma fatta risalire alla primitiva colonizzazione della prateria (fig.265). Nonostante la favoleggiante origine del sistema, Solon Robinson dichiara di averla impiegata nel 1835, mentre a George Washington Snow (1787-1874) viene fatta risalire generalmente la paternità ufficiale, legato ad una delle più importanti tappe della tecnica moderna. La *Balloon Frame* è un sistema costruttivo prefabbricato in legno che consente di realizzare molto rapidamente costruzioni economiche e leggere, tali per cui si diffusero molto rapidamente in tutto il territorio degli Stati Uniti. È costituita da una struttura a telaio in legno realizzata dall'accostamento a passo costante

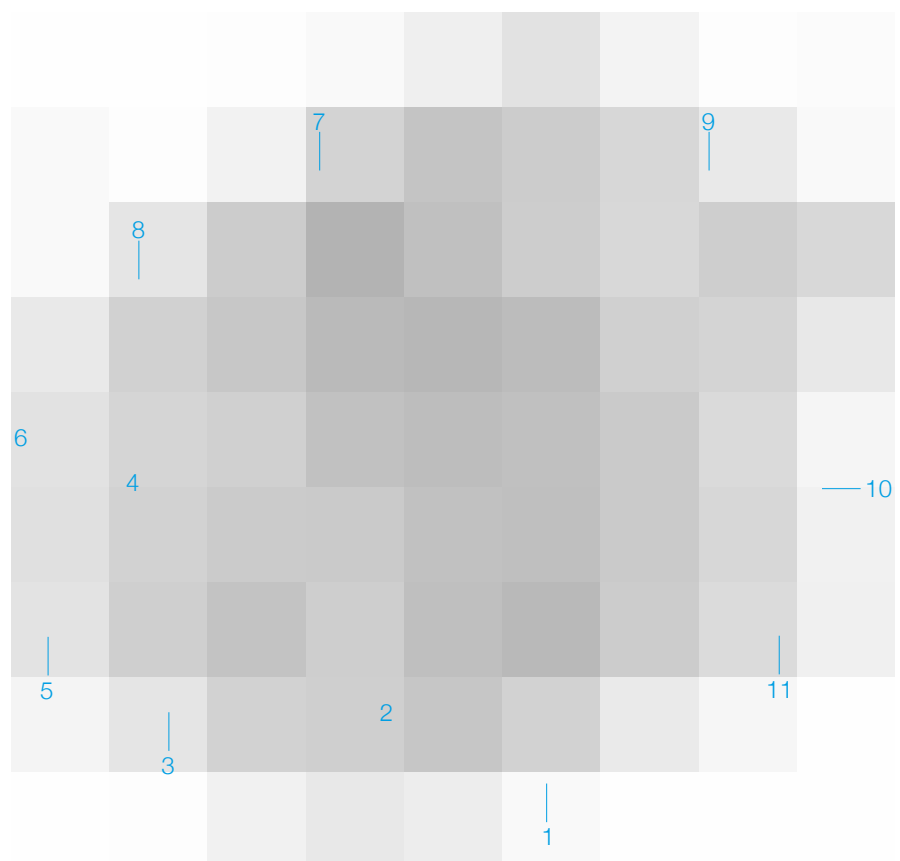
di montanti, correnti, aste, architravi e tavolato standardizzati in forma ridotta e favorendo il trasporto e la posa in opera in cantiere. La struttura prefabbricata lignea poggia solitamente su una fondazione in pali di legno, in muratura o in calcestruzzo armato, mentre l'alzato (solitamente di massimo due livelli) è opportunamente controventato con elementi in legno diagonali solidarizzati meccanicamente ai montanti verticali. Il rivestimento strutturale è generalmente realizzato in tavole di legno, chiodate orizzontalmente o diagonalmente secondo una disposizione a scandole e protette dall'azione degli agenti atmosferici con asfalto o cartone catramato. Le coperture piane seguono la stessa logica costruttiva dei solai lignei, mentre per la variante costruttiva a falde inclinate sono impiegati speciali travetti disposti secondo le linee di compluvio e displuvio, la cui struttura generata è protetta con strati impermeabili all'acqua e con il manto di copertura in scandole di asfalto, di legno e in cemento amianto a partire dagli inizi del Novecento (fig.266).

265. Abitazione realizzata con il sistema costruttivo *Balloon Frame* (struttura a pallone), © William Henry Jackson; The National Anthropological Archives, Smithsonian Institution.

266. Schema isometrico di una abitazione realizzata con il sistema costruttivo *Balloon Frame* (struttura a pallone); Legenda: 1 fondazione su pali in legno (o in muratura o in calcestruzzo armato); 2 pavimento in legno poggiato su traverse e travi in legno; 3 correnti orizzontali; 4 architravi lignei per aperture (porte e finestre); 5 struttura d'angolo tralicciata; 6 montante ligneo verticale; 7 struttura di copertura in travi lignee; 8 tavolato ligneo; 9 strato impermeabile e manto di copertura; 10 rivestimento in scandole lignee, in asfalto o in cemento amianto; 11 strato di protezione dagli agenti atmosferici in asfalto, cartone catramato.



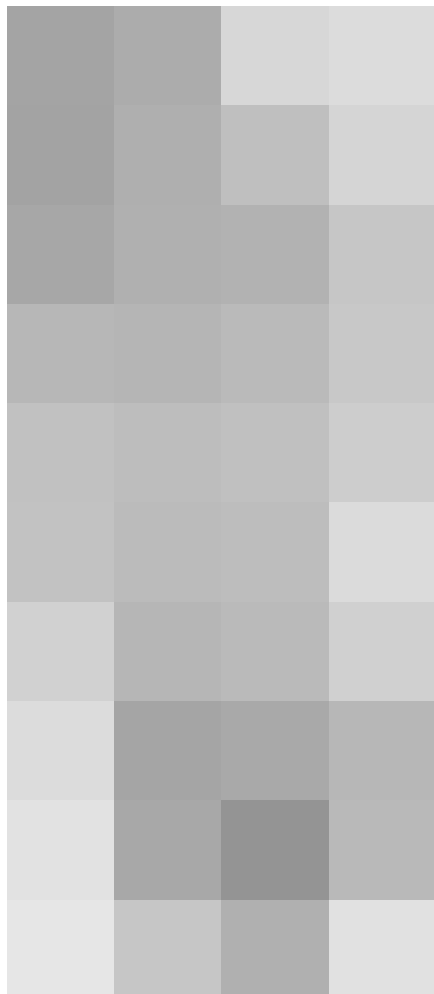
265



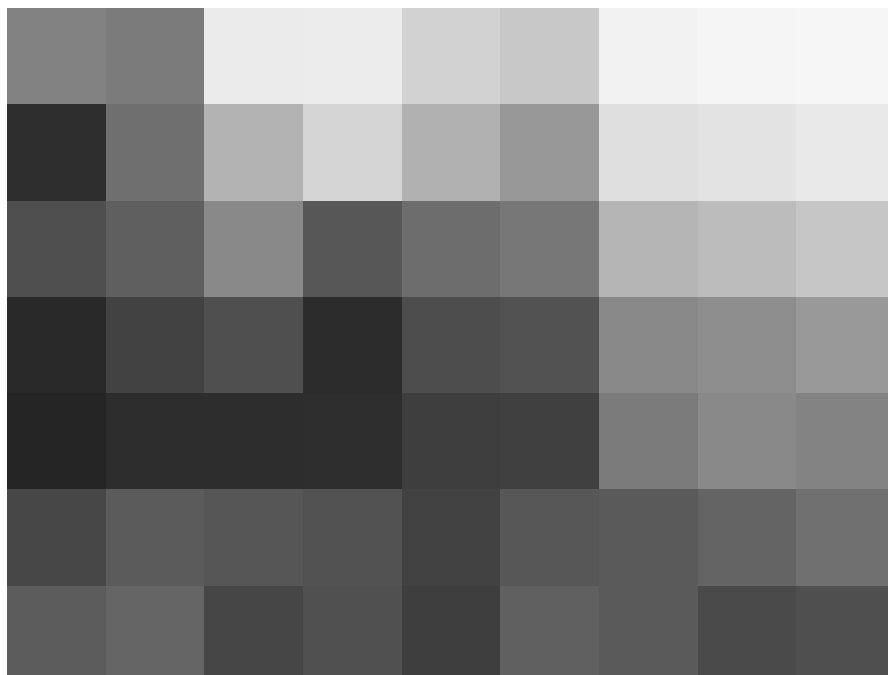
266

267. L'urbanistica della città di New York nel 1807.

268. Costruzione del grattacielo di Lower Manhattan, New York, 1920, © National Geographic.



267



268

Con la vittoria della Guerra di Secessione Americana (1861-1865) da parte degli Stati del Nord guidati da Abraham Lincoln e promotori della nascente industrializzazione ai danni della Confederazione sudista - conservatori, invece, della tradizione rurale (soprattutto quella del cotone) relegata al fenomeno della schiavitù - gli Stati Uniti possono finalmente avviare il processo di industrializzazione del paese che comportò una forte crescita demografica e l'urbanizzazione delle grandi città. Il tessuto della città americana ebbe origine da uno sviluppo elementare, guardato con indignazione dall'antica cultura della città degli urbanisti europei: dapprima la suddivisione geometrica del territorio in un reticolo rigorosamente elementare secondo due coordinate a 90 gradi (le *avenues* e le *streets*), dopo le successive addizioni di numerosi lotti quadrati, favorendo la linearità, l'economicità e la semplicità costruttiva dell'edilizia (fig.267). Esigenze funzionali e commerciali spinsero l'America verso una progressiva apertura delle facciate urbane. La costruzione di grandiosi edifici multipiano, soprattutto quelli delle tipologie commerciali e funzionali, fu resa possibile dall'adozione dei sistemi meccanici di sollevamento: l'ascensore di sicurezza a vapore viene installato per prima

volta nel 1857 da Elisha Graves Otis (Halifax, 1811 – Yonkers, 1861) a New York; nel 1870 William Delevan Baldwin (1856-1930) installa il primo ascensore idraulico, mentre nel 1887 il sistema viene elettrificato per la prima volta per opera di Ernst Werner von Siemens (Lenthe, 1816 – Berlino, 1892). In seguito a due devastanti incendi urbani (1871 e 1874), a Chicago seguì una prodigiosa ricostruzione accompagnato da un eccezionale sviluppo economico. Nacquero, infatti, le prime strutture portanti in acciaio nelle tipologie multipiano che consentì il processo di separazione dell'involucro, costituito da ampie superfici trasparenti e metalliche (fig.268). Gli edifici pluri-livello, primordio tipologico del più evoluto grattacielo, nascono già completi di tutte le attrezzature funzionali la cui progettazione ed installazione è parte essenziale dell'edificio, rappresentando il primo esempio di progettazione integrata risultato della produzione serializzata dei materiali da costruzione e la standardizzazione dei componenti edilizi. Secondo tale impostazione, il processo costruttivo si sposta così dal cantiere alla fabbrica ed il cantiere diviene il luogo dell'assemblaggio dei diversi componenti, mentre il lavoro manuale è in parte sostituito dai processi meccanici¹⁸⁴. Il grattacielo, nella sua forma più evoluta, è la l'espressione più evoluta di questo processo, basato sulla ripetizione del prodotto e la organizzazione del lavoro. In tal senso Chicago è nella vita, nella tecnica e nell'urbanistica, il primo scenario urbano di città moderna.

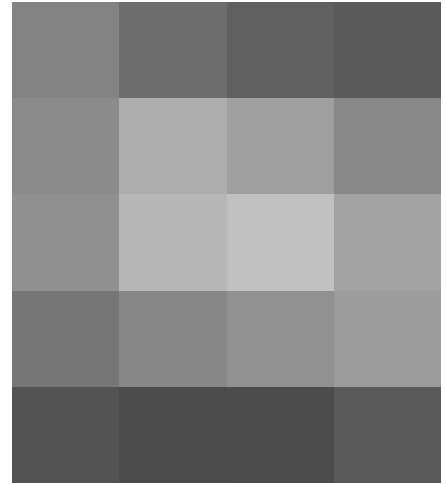
Gli scenari catastrofici dei numerosi incendi sfociati nelle città americane nel corso di tutto l'800 è confluito non solo nella progettazione dei nuovi edifici multipiano. Anche il patrimonio edilizio esistente - quello realizzato con sistemi tradizionali a telaio ligneo - è oggetto di numerose sperimentazioni atte a rendere ignifuga la struttura, mediante l'accostamento delle prime *cast iron façades*, ovvero facciate realizzate in pannelli prefabbricati in ghisa.

Per esempio, nel 1854, il padre della struttura a telaio James Bogardus (Catskill, 1800 – New York, 1874), insieme all'architetto John B. Corlies furono tra i primi sperimentatori della struttura portante a scheletro metallico realizzando la celebre sede della casa editrice Harper & Brothers di New York. Bogardus aveva brevettato il suo metodo rivoluzionario per la costruzione in ghisa nel 1850, e sebbene gli edifici Harper sono stati demoliti nel 1925, la struttura rimane un'icona dell'ingegno in architettura e ingegneria. Furono gli edifici "completamente a prova di fuoco" di Bogardus che l'autore Jacob Abbott scelse di evidenziare nel popolare libro del 1855 *The Harper Establishment*; o, come sono fatti i libri di storia, un resoconto della costruzione della nuova

sede, delle sue innovazioni strutturali e meccaniche e dei macchinari all'avanguardia situati al suo interno. Il complesso sarebbe stato uno spettacolo impressionante per i passanti, un manifesto dell'innovativa produzione industriale dell'azienda in un momento in cui il pubblico stava iniziando a mostrare un interesse più che passeggero per le fiorenti innovazioni industriali e tecnologiche. L'edificio principale, adiacente all'allora Franklin Square, aveva una facciata completamente in ferro e si sviluppava su sette livelli con spazi per artisti e scrittori, piani dedicati all'immagazzinamento e alla spedizione delle pubblicazioni e piani dedicati al processo di stampa e della forza lavoro della fabbrica, il tutto sostenuto dalle nuove travi ad arco di Bogardus (figg.269-270).

269. Sezione del Cliff Street Building (Harper & Brothers Building), in Jacob Abbott, *The Harper Establishment*, Harper & Brothers, New York, 1855, pag.42.

270. Travi in ghisa ad arco, ideate da James Bogardus per il Cliff Street Building.



270



269

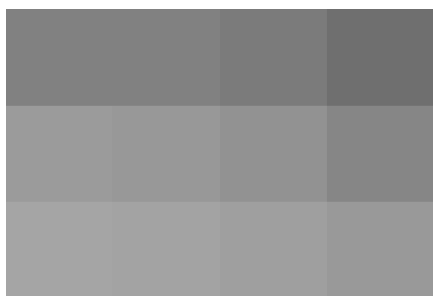
271. Dettaglio della facciata dell'Edgar Laing Stores al Washington & Murray Streets di New York, progettato nel 1849 sempre da James Bogardus.

272. Spaccato assonometrico del sistema involucro della facciata dell'Edgar Laing Stores in componenti prefabbricati in ghisa sagomata: una colonna a sezione cava con lati flangiati, un profilo a "c" di protezione delle travi lignee, un pannello a pennacchio ed una cornice composta da un coronamento imbullonato ad un fregio, © Historic American Buildings Survey.

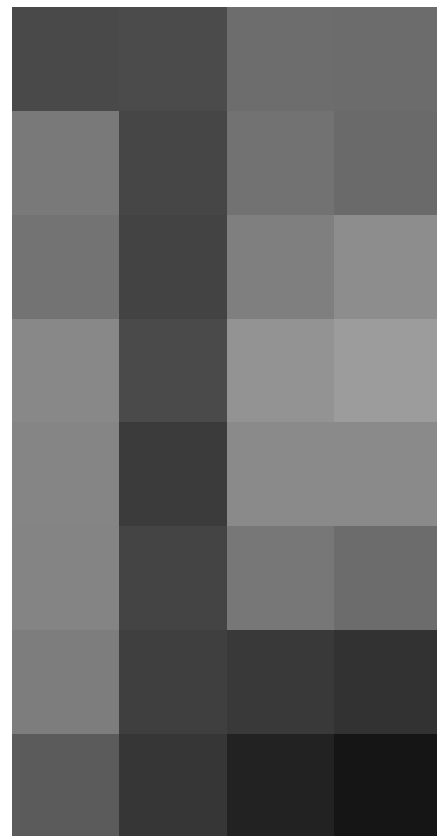
273. Dettaglio della colonna e del pannello a pennacchio in ghisa sagomata, © Historic American Buildings Survey.

In seguito vennero realizzate molte altre facciate rivestite completamente in ghisa e ferro, conservando però un linguaggio riferito ai modelli in pietra, mediante l'impiego di colonne, trabeazioni e sofisticate decorazioni.

Un esempio è l'Edgar Laing Stores al Washington & Murray Streets di New York, progettato nel 1849 sempre da James Bogardus e demolito nel 1971, in cui è stato possibile analizzare ogni particolarità costruttiva adottata da Bogardus (fig.271). La struttura tradizionale a telaio misto costituito da un sistema di travi e colonne in legno e pareti divisorie in laterizio era chiusa all'interno di un innovativo involucro in componenti prefabbricati di ghisa sagomata: una colonna a sezione cava con lati flangiati, un profilo a "c" di protezione delle travi lignee, un pannello a pennacchio ed una cornice composta da un coronamento imbullonato ad un fregio¹⁸⁵ (figg.272-273).



271

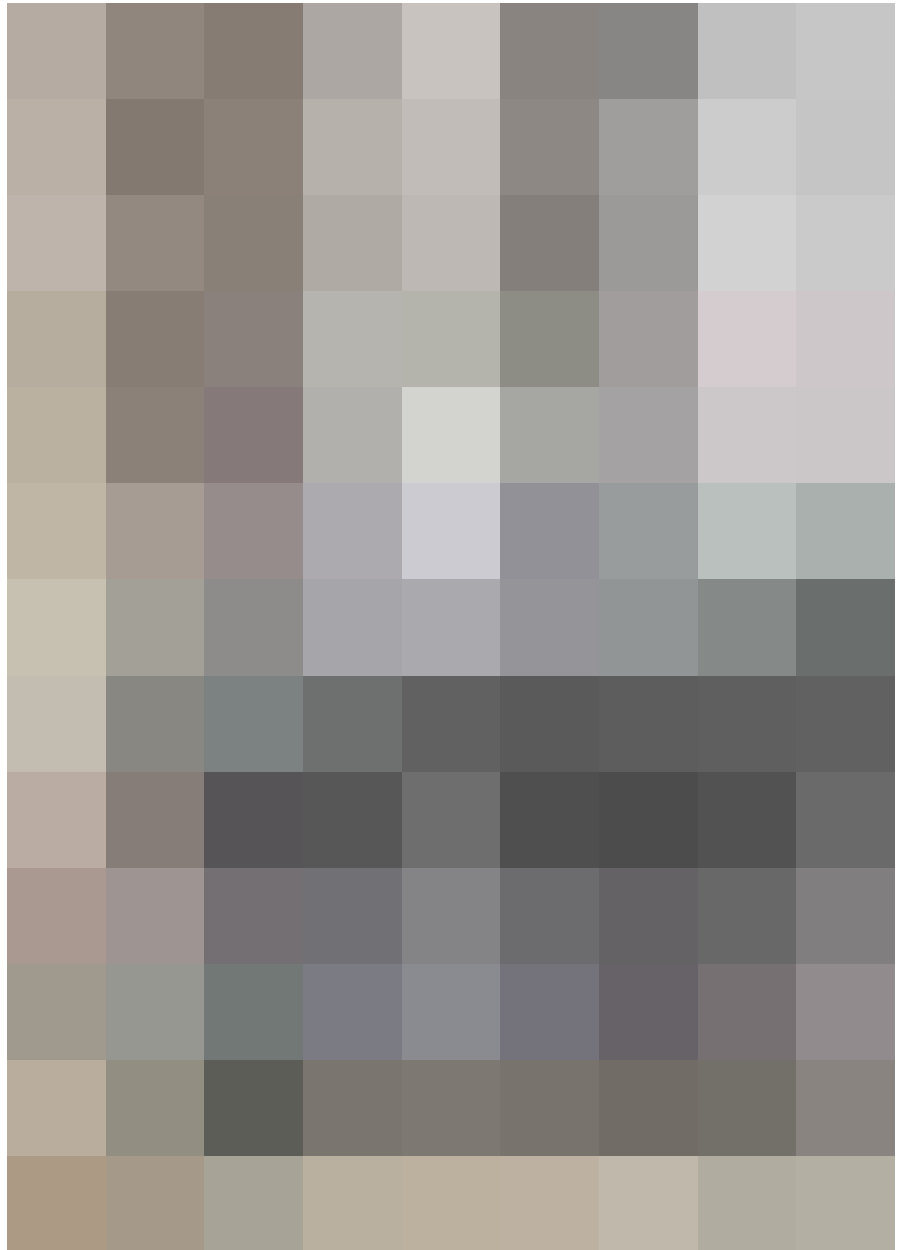


273



272

Nelle conferenze confluite nel tomo *Entretiens sur l'architecture*, il primo teorico francese dell'architettura moderna Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc (Parigi, 1814 – Losanna, 1879) osserva che “un architetto capace potrebbe non illogicamente concepire l'idea di erigere un vasto edificio con una struttura tutta in ferro [...] proteggendola con un involucro di pietra»¹⁸⁶ (fig.274). Il teorizzatore, approfondendo gli stilemi dell'architettura gotica, attualizza il concetto della struttura metallica interamente rivestita con uno spesso rivestimento litico, resistente al fuoco e ideale per la nuova architettura moderna. La sua teoria architettonica si basa in gran parte sulla ricerca delle forme ideali per materiali specifici e sull'utilizzo di queste forme per creare edifici. I suoi scritti sono incentrati sull'idea che i materiali dovrebbero essere usati “onestamente”. Credeva che l'aspetto esteriore di un edificio dovesse riflettere la costruzione razionale dell'edificio. In diversi progetti non realizzati per nuovi edifici, Viollet-le-Duc applica le lezioni che aveva tratto dall'architettura gotica sia ai suoi sistemi strutturali razionali, sia ai moderni materiali da costruzione come la ghisa. Per trarre ispirazione, ha anche esaminato le strutture organiche, come foglie e scheletri di animali influenzando la prima fase embrionale di architettura organica ed il successivo movimento dell'Art Nouveau.



274

É da questi presupposti che subito dopo l'incendio di Chicago del 1871 vengono realizzati i primi edifici multipiano a struttura metallica ma con un rivestimento litico tipico degli stilemi delle scuole di architettura europea. É in questo momento, infatti, che si sviluppa la Scuola di Chicago (1880-1893) che vede all'opera i migliori architetti, ingegneri e costruttori influenzati dall'evolversi delle avanguardie architettoniche europee e traslitterate nella propria patria. Tra questi sono da annoverare William Le Baron Jenney (1832-1907), Henry Hobson Richardson (1838-1886), Dankmar Adler (1844-1900), Daniel Burnham (1846-1912), John Wellborn Root

(1850-1891), Martin Roche (1853-1927), William Holabird (1854-1923), Louis Sullivan (1856-1924), Frank Lloyd Wright (1867-1959).

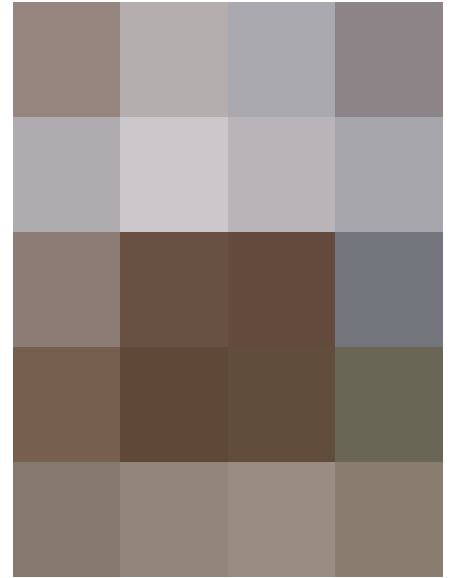
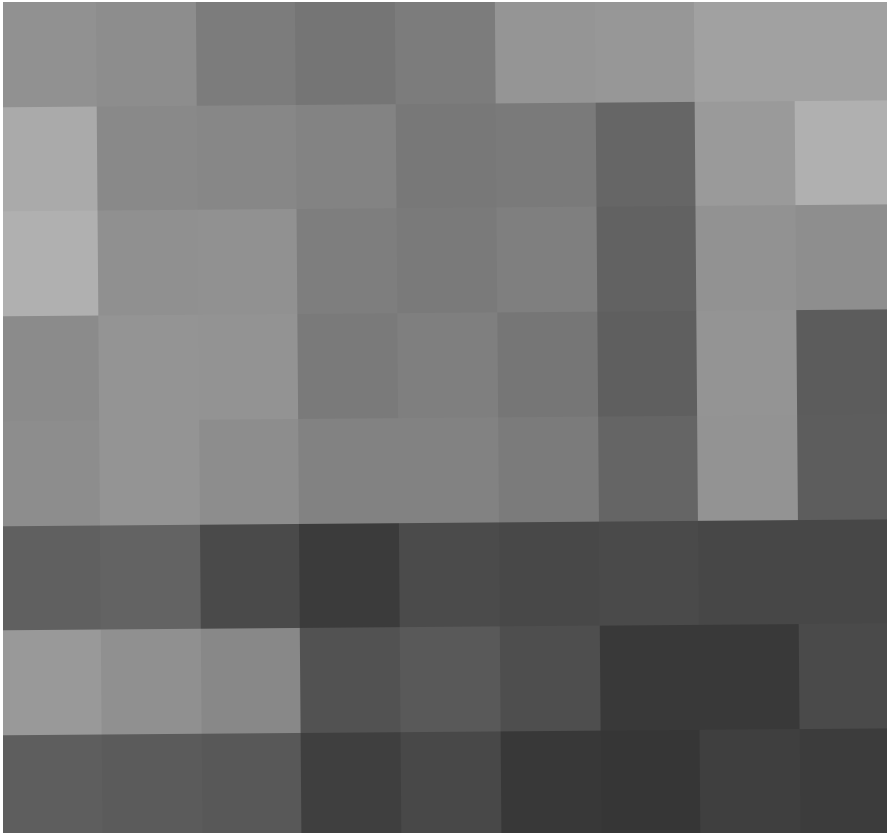
Lo stile della Scuola è già definito nel First Leiter Building a Chicago (fig.275), progettato nel 1879 da William Le Baron Jenney, un edificio di sette piani realizzato con una struttura a maglia regolare in colonne rettangolari cave di ghisa cui si innestano le travi in acciaio a doppia “T” che oltre al peso proprio portano il peso del solaio in ferro e mattoni di laterizio forato. Le colonne in ghisa si sviluppano per tutta l'altezza di ciascun impalcato e sono solidarizzate tra loro mediante

274. Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc, progetto di una casa con struttura in ferro ed involucro in terracotta smaltata, 1871, © Musée d'Orsay, Parigi.

275. Nella pagina successiva: First Leiter Building, progettato nel 1879 da William Le Baron Jenney, © Historic American Buildings Survey Cervin Robinson, 1963.

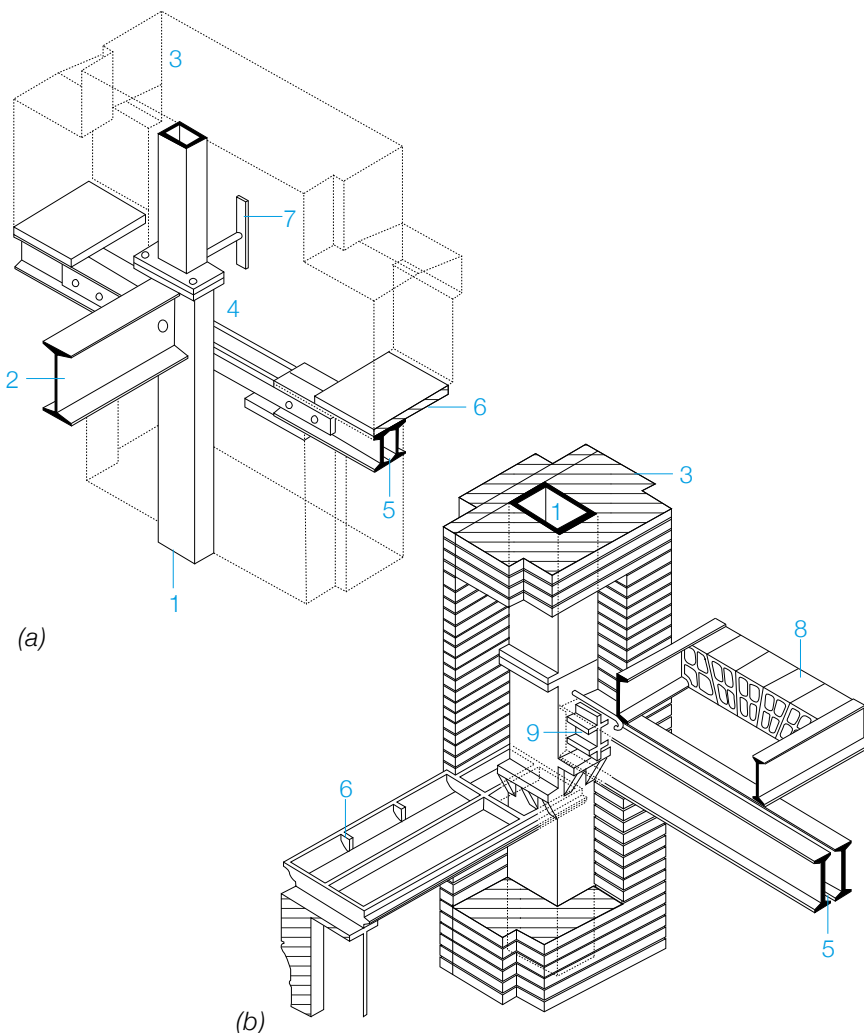
276. Nella pagina successiva: dettaglio dell'involucro del First Leiter Building (a) e del Home Insurance Building (b). Legenda: 1 colonna cava in ghisa; 2 trave; 3 rivestimento murario; 4 piatto metallico; 5 travi binate in acciaio; 6 architrave in lastra di ghisa; 7 ancoraggio a paletto; 8 solaio ferro e volterrane, 9 connettore.

277. Nella pagina successiva: Home Insurance Building, il primo grattacielo della storia progettato nel 1885 da William Le Baron Jenney.



277

un piatto metallico da cui si diparte un sistema di ancoraggio "a paletto" con lo scopo di ammorsare il rivestimento murario non portante in mattoni di laterizio, che si sviluppa linearmente lungo tutto il perimetro dell'edificio. Per ogni campata della struttura, il rivestimento presenta la classica *finestra tripartita* di Chicago con battenti scorrevoli in altezza. Ciascuna delle finestre tripartite - con uno sviluppo esteso per tutta la maglia strutturale - presenta un'architrave realizzata con una lastra di ghisa poggiata su travi binate in ferro a doppia "T" poggiati su un dormiente (anch'esso metallico) con lo scopo di distribuire uniformemente i carichi sul rivestimento murario, che assolve alle sole funzioni di elemento portato (fig.276).



275

276

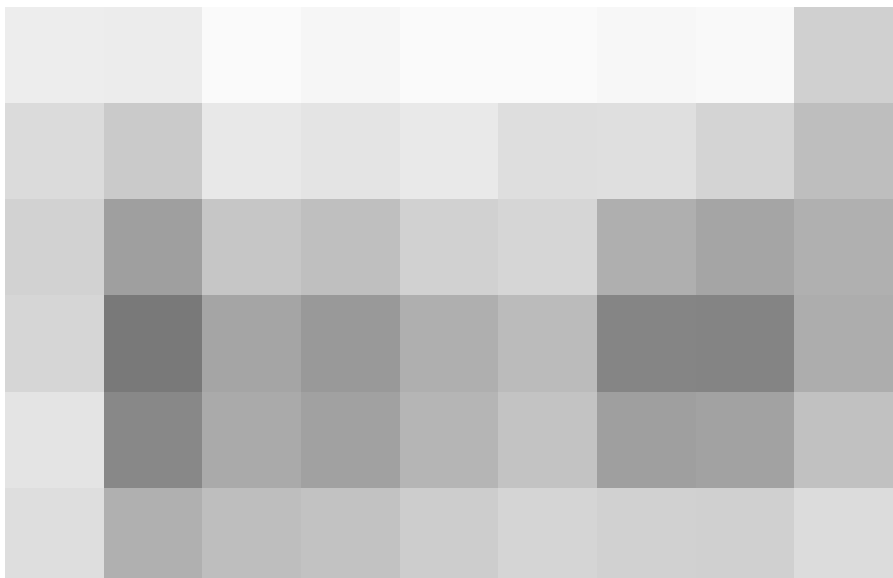
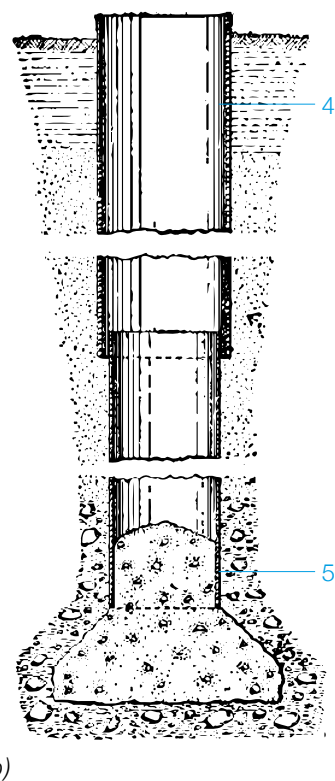
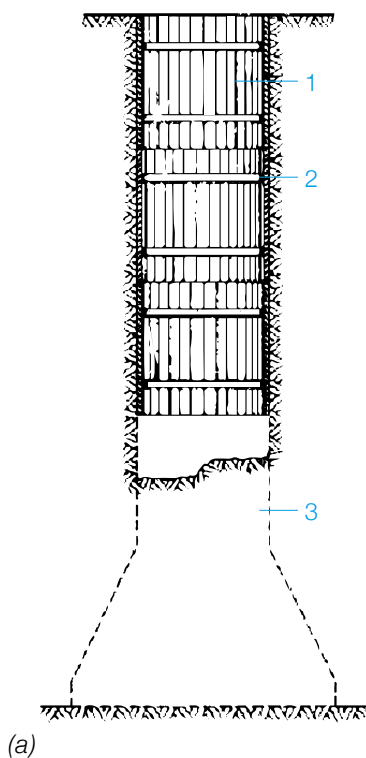
L'evoluzione del primo sistema tecnologico adottato da Le Baron Jenney, lo ritroviamo nella sua opere più celebre, l'Home Insurance Building (1885) definito per i suoi 12 piani, il primo grattacielo della storia. La struttura di quest'opera è costituita da colonne rettangolari cave in ghisa e ordine di travi binate in ferro a doppia "T". I solai sono realizzati con putrelle in ferro e volterrane di laterizio forato disposte secondo il principio statico della piattabanda. Data la fragilità della ghisa in caso di incendio, le colonne sono inglobate all'interno di pilastri realizzati con mattoni di laterizio che contribuiscono staticamente alla struttura (figg.276-277).

Alla radice di questo processo sta certamente la nascita del fatto nuovo costituito dalla enucleazione chiara ed inequivocabile di una delle funzioni più nuove e caratteristiche della nostra città moderna: della definizione cioè del tema "edificio commerciale" o "palazzo per uffici". Scrive appunto Sigfried Giedion (Praga, 14 aprile 1888 – Zurigo, 10 aprile 1968) che l'edificio commerciale è il punto di partenza della Scuola di Chicago, connessa proprio con la creazione del moderno palazzo per uffici e del Loop, il centro direzionale, fuoco degli scambi economici tra il West e il Middle West. Accanto a questi edifici di pari mole, e quindi di estetica e tecnica corrispondente, apparvero presto nuovi edifici: immensi alberghi, edifici compositi ad usi misti, teatri, etc. e contemporaneamente, fu affrontato con grande attenzione anche il problema della moderna casa ad appartamenti adatta per l'epoca industriale.

Lo sviluppo in altezza degli *skyscrapers* americani, ovvero gli edifici multipiano sia commerciali che residenziali fu reso possibile attraverso un rinnovamento di tutto l'organismo tecnologico-costruttivo, non solo nello scheletro metallico, nel rivestimento portato in laterizio, nella finestra tripartita o nel sistema ascensore, ma soprattutto in fondazione con l'adozione delle *Chicago Caisson*, un sistema rinveniente dalle fondazioni pneumatiche per la costruzione dei ponti, sviluppate da William Sooy Smith (1830-1916) a seguito di un contenzioso con i proprietari del Palazzo Herald che con una ingiunzione impedivano l'infissione dei pali per la costruzione del palazzo della Borsa. Il nuovo sistema si pone come tipologia alternativa ai pali lignei battuti, le cui vibrazioni dovute all'infissione si riverberavano sulle strutture metalliche degli edifici circostanti, danneggiando irreparabilmente le connessioni. In modo particolare si trattava di scavi a pozzo circolari le cui pareti di scavo venivano rinforzate con aste in legno adiacenti il perimetro tenute assieme con un anello in ferro, che formava il cosiddetto "cassone".

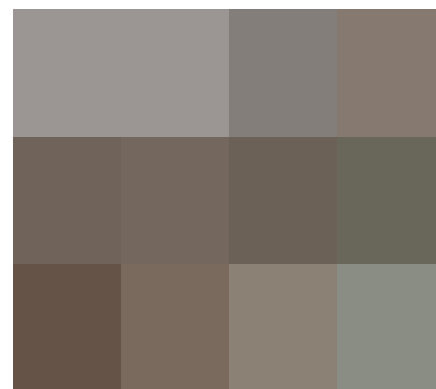
Nel 1899 Charles Gow migliorò il sistema di Smith progettando il *Caisson Gow*, un cassone metallico di forma circolare e con assemblaggio telescopico per recuperarlo dopo le fasi di scavo e realizzazione del piede di fondazione in muratura o in conglomerato cementizio (fig.278). Una ulteriore tipologia è il cassone a tenuta stagna riempito con conglomerato cementizio, utilizzato in presenza di falde freatiche che provocavano l'imbibizione dei suoli argillosi di Chicago, compromettendo il piede di fondazione metallico¹⁸⁷ (fig.279).

278. Dettagli del sistema di fondazione Chicago Caisson (a) e del Caisson Gow (b); Legenda: 1 *tavolato ligneo*; 2 *anello metallico*; 3 *scavo del piede di fondazione*; 4 *cassone metallico circolare telescopico*; 5 *riempimento del piede di fondazione con conglomerato cementizio non armato*.
279. Dettaglio del sistema di fondazione con cassoni a tenuta stagna, 1898.
280. Nella pagina seguente: tre principali tipologie di rinforzo (incrociato, a ginocchio, a portale) delle strutture metalliche dall'azione del vento, in Plant J.C., *Cyclopedia of Architecture, Carpentry and Building*, American Technical Society, 1907.

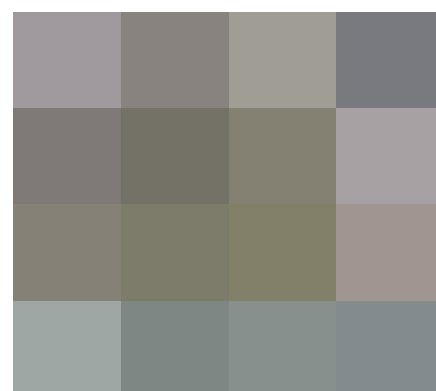




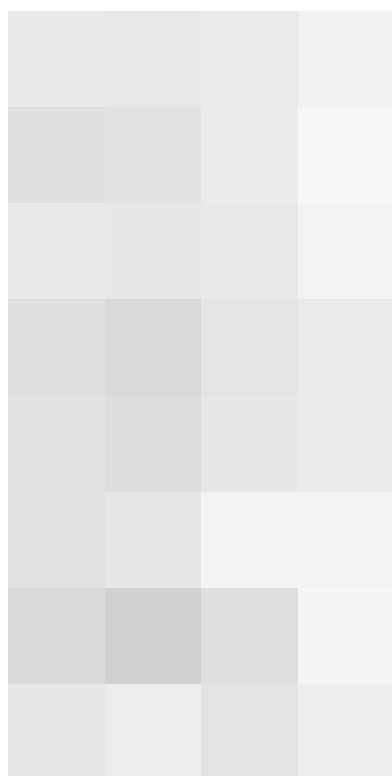
281



282



283



280

I sofismi costruttivi e funzionali relativi le nuove facciate riguardarono gli studi sul comportamento di questi altissimi edifici in relazione al vento ed alla luce. Nella *Windy City (Città del Vento)* di Chicago, così definita per il vento che spira perennemente e che grava maggiormente sulle grandiose facciate multipiano, una protezione di rinforzo dal vento doveva essere introdotta attraverso il calcolo per il dimensionamento della struttura metallica, ma anche attraverso l'inserimento di piastre angolari in corrispondenza dei nodi colonna-trave (fig.280). Anche il fattore luce divenne un aspetto non trascurabile in cui vennero indagati per la prima volta i fenomeni ottici di riflessione, rifrazione, interferenza e diffrazione, secondo gli studi dell'ingegnere Augustin-Jean Fresnel (Broglie, 1788 – Ville-d'Avray, 1827).

Sarà a partire da questi precetti che sempre il padre del grattacielo, William Le Baron Jenney, progetterà nel 1888 il Manhattan Building a Chicago, un edificio sperimentale in cui per la prima volta alla facciata in laterizio e granito fuoriesce plasticamente, per ciascuna campata, una fila di *bow-windows*, realizzati co-

struttivamente con l'inedita tecnica del *cantilever*, ovvero travi strutturali a sbalzo fissate alla struttura solo ad una estremità (figg.281-283). Sempre a proposito dello stesso edificio, Giedion scrive che «*le finestre sporgenti, di molte forme diverse, sono destinate a captare tutta la luce disponibile in questa strada stretta. Esse si appiattiscono completamente nei piani superiori aperti alla luce*»¹⁸⁸. Sul medesimo argomento funzionale legato all'aspetto illuminotecnico è il progetto del Marquette Building degli architetti Holabird&Roche, realizzato sempre a Chicago nel 1894. La richiesta dei proprietari è che nessuno spazio interno, anche minimo, restasse privo di illuminazione, così gli architetti oltre a rendere la facciata il più possibile trasparente, optarono per un impianto distributivo a "C" (aumentando il numero di facciate esposte) e con un patio interno comunicante a tutta altezza con i vari livelli¹⁸⁹.

Il processo di smaterializzazione delle pareti viene portato avanti con la seconda generazione di architetti della scuola di Chicago, sia per quanto riguarda l'omoge-

281. Facciata del Manhattan Building, progettato nel 1888 da William Le Baron Jenney a Chicago.

282. Dettaglio dei bow-windows del Manhattan Building, realizzati costruttivamente con l'inedita tecnica del cantilever, © Wikiarchitettura.

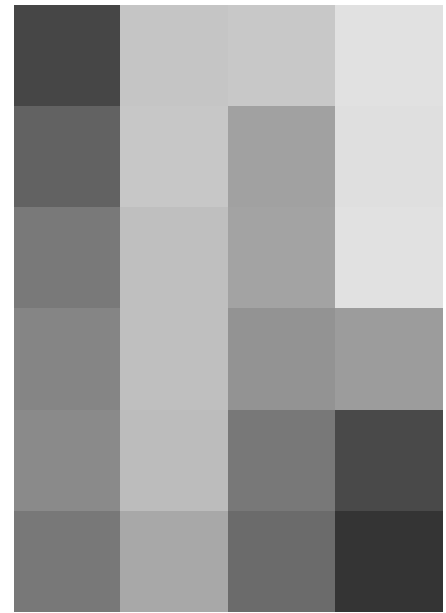
283. *Ibidem*.

neità cromatica dei materiali, sia attraverso il costante processo di riduzione degli spessori degli elementi del rivestimento o con la loro sostituzione con i nuovi materiali. Tra le figure preminenti, Daniel Burnham (1846-1912), John Wellborn Root (1850-1891), William Holabird (1854-1923), Martin Roche (1853-1927), e Louis Sullivan (1856-1924) furono i promotori e utilizzatori della nuova tecnica del telaio in acciaio (che aveva soppiantato definitivamente quello in ghisa). Quando l'intelaiatura in acciaio divenne di uso comune, il rivestimento murario della facciata non portante (ma che contribuiva alla stabilità della struttura) raggiunse il suo limite pratico. Numerosi sono gli esempi di edifici multipiano a Chicago che recepiscono il nuovo sistema: il Monadnock Block (Burnham & Root, 1891) che vede d'altronde il primo impiego in architettura dell'alluminio leggero per la costruzione delle scale (figg.284-285); il Rand McNally Building (Burnham & Root, 1889), il primo edificio multipiano con la struttura completamente in acciaio (fig.286); il Masonic Temple (Burnham & Root, 1891), maestoso edificio con struttura in acciaio rivestita in granito e terracotta e con il sistema di ascensori più evoluto sino a quel momento (fig.287); il Gage Group Building (Holabird & Roche, 1898) (fig.288), con la facciata organica progettata da Louis Sullivan e finemente decorata con i distintivi motivi floreali in terracotta, già visti nel Wainwright Building (St. Louis, 1891) e nel Guaranty Building (Buffalo, 1894) (fig.289).

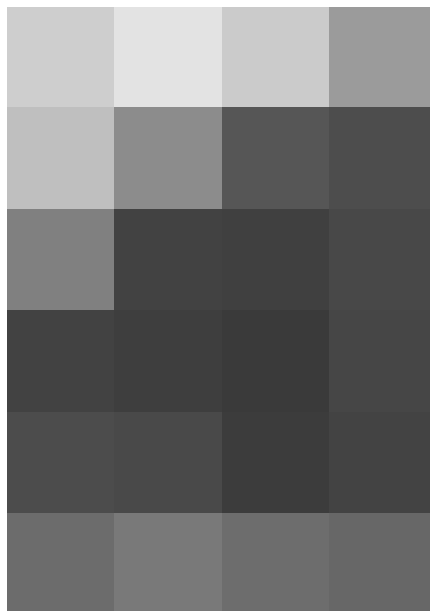
Gli archetipi della Scuola di Chicago per innovazioni strutturali e per lo sviluppo della facciate continue sono, però, il Reliance Building (fig.290) ed il Fisher Building, entrambi progettati nel 1894 da Daniel Burnham (1846-1912) e John Wellborn Root (1850-1891). Dal punto di vista strutturale i due 'grattacieli' presentano una innovativa struttura realizzata con la prima sintesi costruttiva in acciaio rivettato, connessioni a momento rigido e dalle *Gray Columns*, inventate e brevettate dall'ingegnere J.H. Gray costituite da una



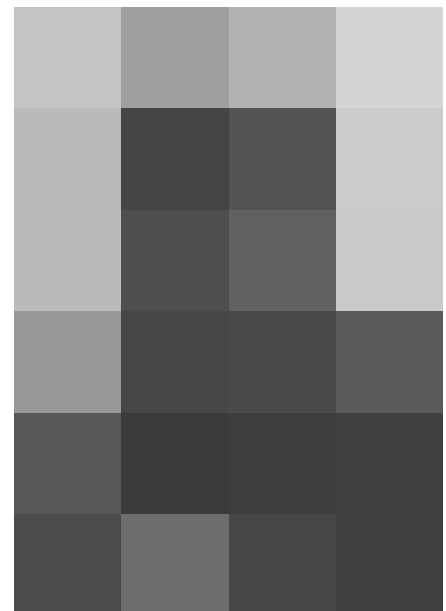
284



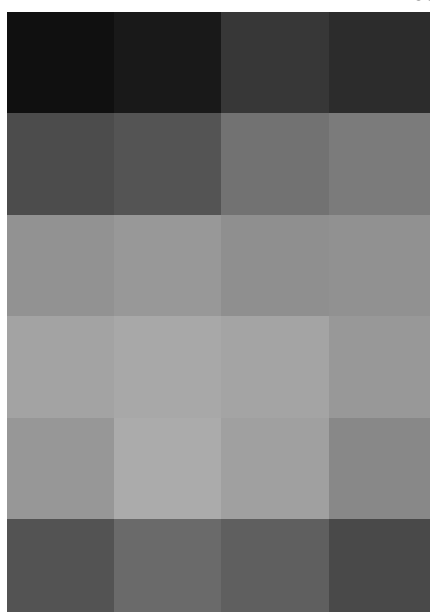
285



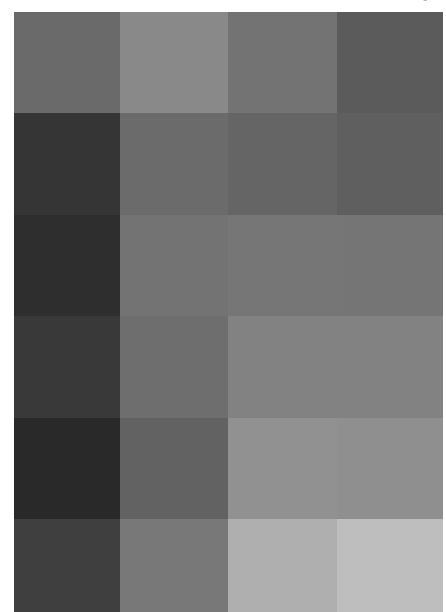
286



287



288



289

284. Nella pagina precedente: scale con struttura in alluminio del Monadnock Block (Burnham & Root, 1891), © Historic American Buildings Survey.

285. Nella pagina precedente: Monadnock Block (Burnham & Root, 1891), © Taylor, J.W., Photograph Collection, 1880-1910.

286. Nella pagina precedente: Rand McNally Building (Burnham & Root, 1889), © Hedrich Blessing Collection/Chicago History Museum, 1947.

287. Nella pagina precedente: Masonic Temple (Burnham & Root, 1891), © United States Library of Congress's Prints and Photographs division, 1900.

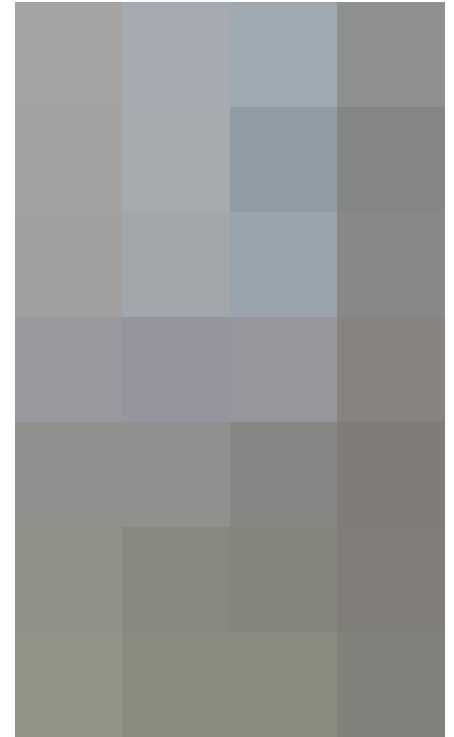
288. Nella pagina precedente: Gage Group Building (Holabird & Roche, 1898).

289. Nella pagina precedente: Guaranty Building (Louis Sullivan, Buffalo, 1894), © Jack E. Boucher, 1865.

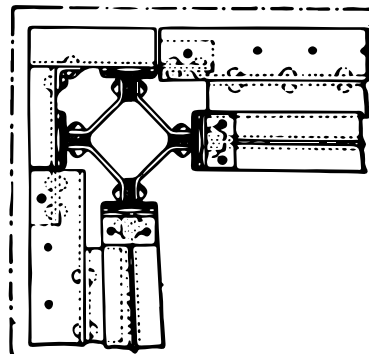
290. Reliance Building e dettaglio della facciata progettato nel 1894 da Daniel Burnham e John Wellborn Root.

291. Gray Columns, inventato dall'ingegnere J. H. Gray.

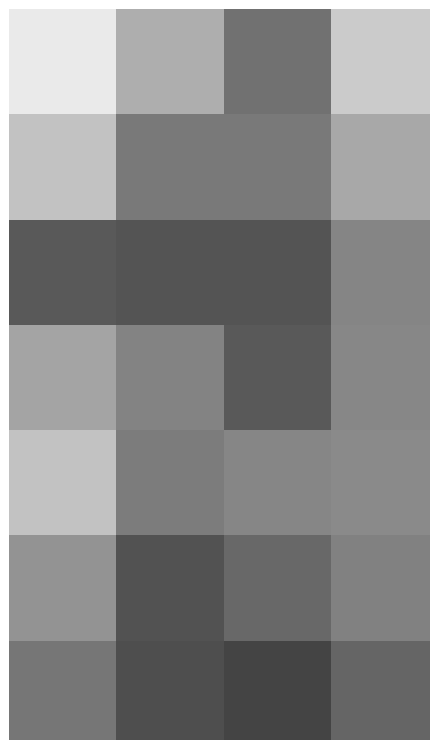
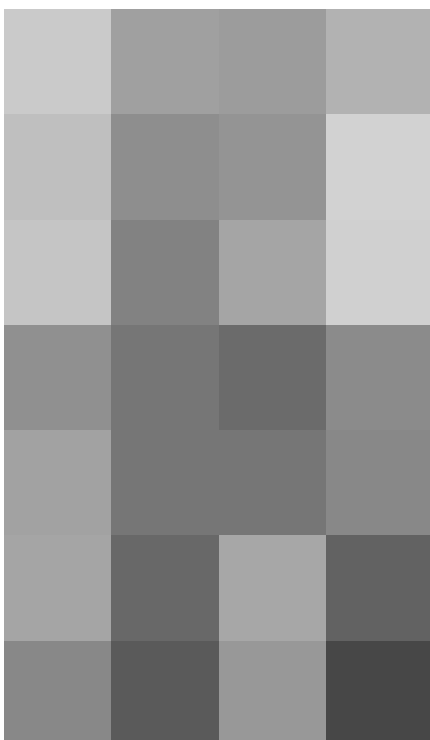
292. Dettaglio della struttura in acciaio e del cornicione di rivestimento in terracotta del Reliance Building rimosso durante il restauro del 1940, in Kelley S. J., *Office Buildings of the Chicago School: the restoration of the Reliance Building*, pagg.63-68.



290



291



292

sezione cruciforme cava che migliorano il comportamento assiale alle azioni generate dal vento (fig.291). La facciata continua in terracotta vetrificata bianca, grigia, rossa e marrone del Reliance Building è una chiara espressione estetica della struttura celata e primo esempio di rivestimento luminoso ed autopulente, preambolo del Movimento Moderno e riferimento per il progetto del Glass SkyScraper (1921) di Mies van der Rohe. Una caratteristica unica del rivestimento esterno dell'edificio è l'utilizzo di un sistema di montanti e binari in ghisa che si estendevano da un piano all'altro e che formavano una griglia regolare su cui erano allocate anche le finestre prive di telaio, altra caratteristica adottata negli stili del Movimento Moderno (fig.292).

La Scuola di Chicago finisce col finire del secolo, in cui i superstiti tra gli architetti della Scuola si divisero secondo due alternative culturali: il ritorno al conformismo degli stili storici e della maniera "románico-feudale" (come fece Burnham), e l'esperienza individuale, polemica e anticonformista adatto per il Nuovo Mondo (come fece in parte Sullivan e più tardi, in maniera compiuta, il suo allievo Frank Lloyd Wright).

Le conquiste della Scuola di Chicago aprirono la strada a tutta la ricerca della costruzione verticale, ma quando Ludwig Mies van der Rohe (Aquisgrana, 1886 – Chicago, 1969) arrivò in America, il concetto di struttura e di facciata presero una direzione diversa: «*l'intenzione di Mies era quella di interpretare il vetro come una complessa superficie riflettente, costantemente soggetta a trasformarsi sotto l'impatto della luce*»¹⁹⁰. È con la produzione di Mies il momento esatto della nascita del *Curtain Wall*, inteso nel suo significato preciso di «*parete di tamponamento formata da elementi tutti uguali appesi alla struttura*»¹⁹¹. Parlando di chiusura dell'organismo edilizio di strutture in acciaio, invece, «*si intende ovviamente far riferimento alle facciate leggere, o "curtain walls" (dette anche in francese "murs rideaux", o in italiano "muri a cortina")*»¹⁹².

Storicamente con il termine curtain wall «*si è sempre fatto riferimento alle murature perimetrali leggere e non portanti, indipendenti dalla struttura del telaio dell'edificio*»¹⁹³. Circa 50 anni più tardi dalla fine della Scuola di Chicago, nel 1951, con la diffusione dello *stick system* (montanti e traversi in alluminio e pannelli di vetro) avvenuta sull'onda del successo architettonico dei Lake Shore Drive Apartments di Mies van der Rohe, tendenze stilistiche e innovazioni tecnologiche di materiali e sistemi hanno ampliato notevolmente le possibilità espressive del curtain wall. Un nuovo involucro in grado di esprimere maggiori possibilità tecnologiche e formali disponibili al progettista per la definizione di uno spazio architettonico svincolato da precedenti rigidità e stereotipi.

Nel progetto dei Lake Shore Drive Apartments costruiti tra il 1948 e il 1951, Mies è particolarmente vincolato alle norme restrittive imposte per gli edifici antincendio. La struttura a scheletro con pilastri in acciaio è, quindi, rigorosamente inglobata all'interno di un pilastro in calcestruzzo (fig.293). Mies, però, non teme di inserire in facciata profili costruttivi senza funzione strutturale per

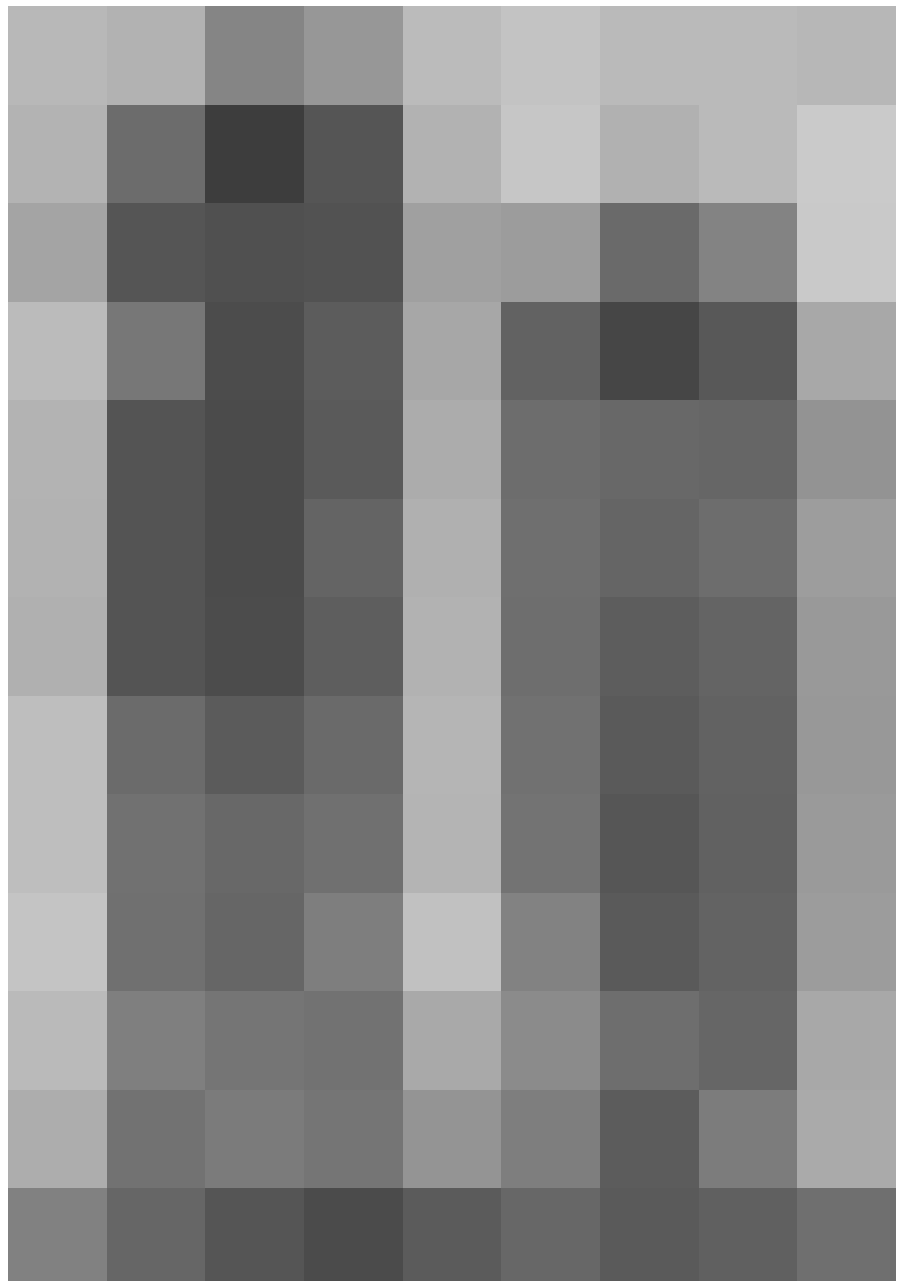
sottolineare sia la verticalità che una cadenza visiva di espansione e contrazione degli intervalli tra il pilastro, la finestra stretta adiacente ad esso e le grandi finestre delle due campate centrali (fig.294). Nell'intercapedine tra sostegni e facciata vengono condotte le tubazioni dell'impianto di riscaldamento e di climatizzazione, completando così il principio della facciata continua e del curtain wall, seguendo l'insegnamento di Semper, ovvero di «*un tessuto lavorato a telaio, una geniale integrazione della struttura con la finestratura, che manifesta la stessa capacità di una muratura portante di limitare lo spazio in ogni sua estensione*»¹⁹⁴.

293. Costruzione dei Lake Shore Drive Apartments, progettati da Mies van der Rohe nel 1948.

294. Nella pagina successiva: posa in opera dei moduli con i profili in acciaio privi di funzione strutturale per sottolineare sia la verticalità che una cadenza visiva degli intervalli tra pilastri e finestre.

295. Nella pagina successiva: dettaglio della facciata del Seagram Building di New York, progettato nel 1958 da Mies van der Rohe, © Inaki Bergera.

296. Nelle pagine seguenti: Lake Shore Drive Apartments, © Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc.





Un altro aspetto legato al curtain wall è nel paradigma postfordista, che comprende tematiche quali la snellezza, la decentralizzazione, il *teamwork* e la flessibilità. La fabbrica postfordista non è più caratterizzata dalla rigida catena di montaggio, ma è pensata come una organizzazione più flessibile; all'edilizia si forniscono non più componenti prodotti in serie, ma prodotti industriali, ovvero di pezzi unici creati *ad hoc* per una particolare architettura.

Sempre Mies, infatti, nel progetto del 1958 per la costruzione del Seagram Building a New York, non impiegò nessun componente di serie, bensì onerosi pezzi speciali di bronzo. Egli, inoltre, rinforzò le flange delle travi a vista, per accentuare otticamente l'importanza della struttura. Lasciò che le vetrate senza partizione trasversale corressero ininterrotte dal pavimento fino al solaio del piano uffici, creando la compiuta verticalità della facciata vetrata oro-bronzea (fig.295).

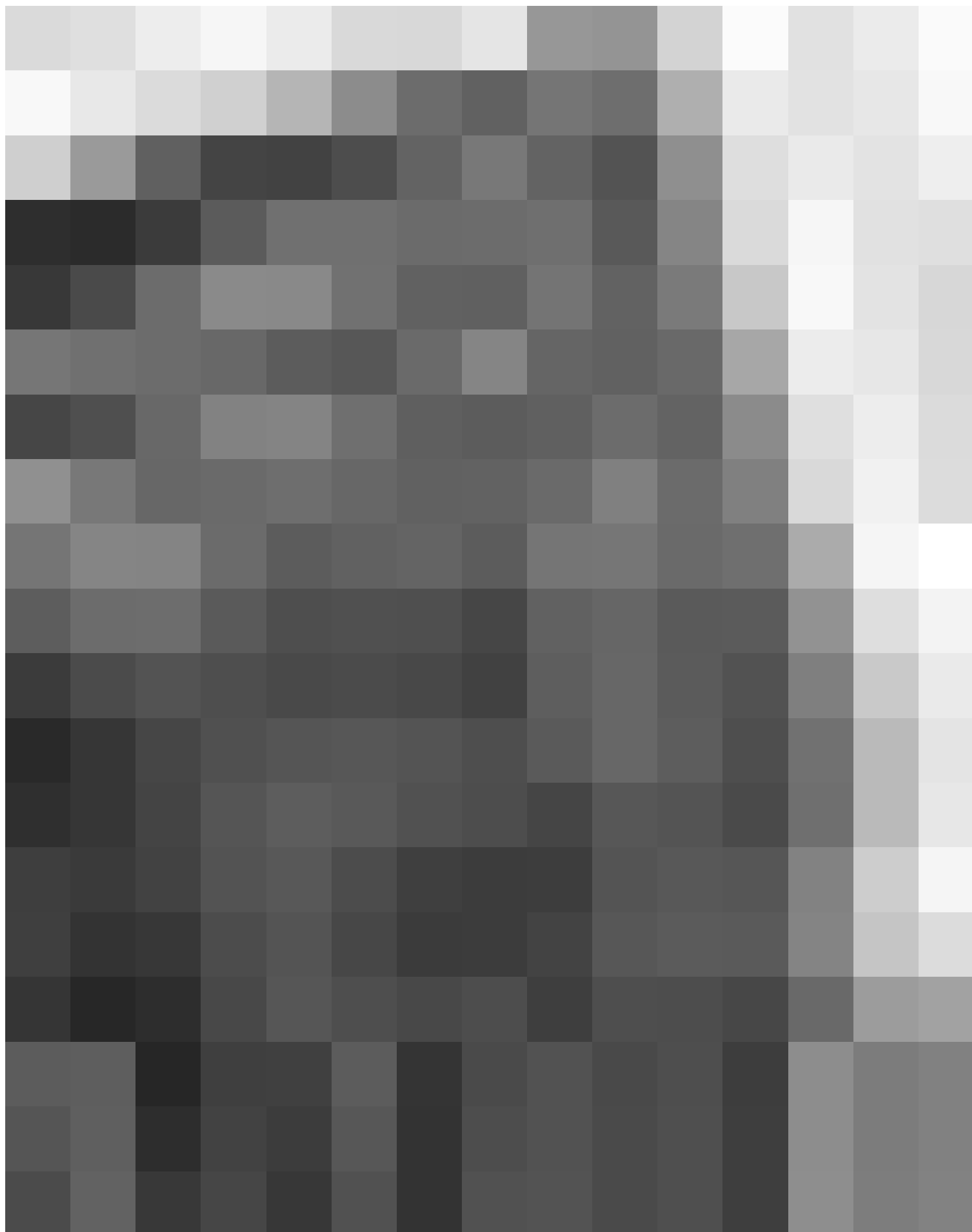
294



Sin dall'inizio degli anni '70, sotto l'influsso della Stile Internazionale si diffuse a livello mondiale, ad un'incredibile velocità, l'edificio con curtain wall vetrato. L'edificio per uffici diventò un esercizio costruttivo significativo nella progettazione architettonica e la facciata di vetro con orditura di montanti e traversi diventava un simbolo. La realizzazione di facciate appese a cortina si diffuse a tal punto da diventare l'elemento favorito di una certa architettura anonima, degenerata in facciate monotone.

Negli anni '60, la tecnologia di moda negli USA di apporre vetrate esterne mediante punti di silicone strutturale (*structural glazing*) fecero il resto. In un periodo di grande critica ne derivò una libertà formale che accondiscendeva al desiderio da parte di molti finanziatori di edifici di forte impatto, con grandi vetrate e ambienti sempre climatizzati, ma che ben presto furono sottoposti a grandi critiche inasprite dalla nascente crisi energetica. Il curtain wall, nella sua concezione originaria, giunse ad un punto di non ritorno¹⁹⁵.

295



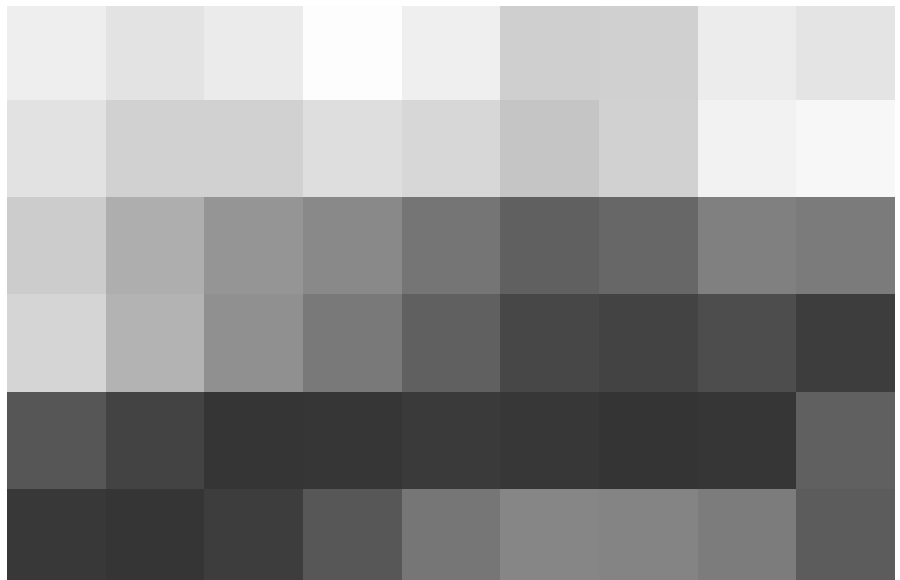


L'involucro neutro e lo sviluppo dell'architettura in acciaio

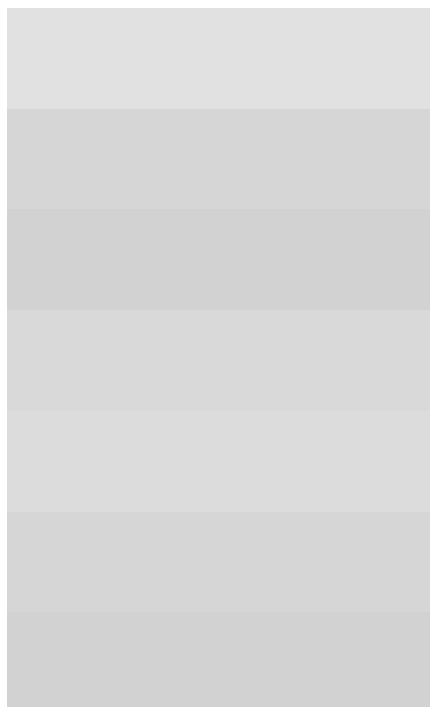
Il successo dello sviluppo della facciata continua o curtain wall è stato reso possibile grazie all'intuizione di Richard Steiff (1877-1939), che nella sua carriera di designer ha il merito di aver raggiunto diversi traguardi tecnologici - come l'aquilone *Roloplan*, in grado di scattare fotografie aeree - ed in modo particolare nell'aver progettato la prima facciata continua a doppia pelle. L'invenzione della facciata continua è riferita alla costruzione nel 1903 della fabbrica di giocattoli di Margarete Steiff (1849-1909) a Giengen (Germania), costruita nel 1903 per far fronte alla crescente domanda di giocattoli in feltro (fig.297). Così, Richard Steiff per aumentare la produttività nell'assemblaggio dei giocattoli progetta un nuovo edificio in ferro e vetro, lungo 30m, largo 12m e alto tre livelli, i cui impalcati sono sostenuti da sei file di colonne a traliccio in ghisa e da quattro pilastri a forma di "L" rivettati su più piastre angolari in acciaio posti ai quattro vertici. La base, inoltre, è rinforzata da una trave tralicciata (fig.298). L'involucro esterno è costituito da una parete continua in vetrocamera (spessore 25cm) che sviluppa sull'intera superficie senza discontinuità, in grado di isolare termicamente ed illuminare completamente l'ambiente interno. Il ricambio d'aria è possibile aprendo delle finestre scatolate ed isolate dall'intercapedine evitando, quindi, eventuali fenomeni di condensa. La facciata progettata insieme alla ditta appaltatrice tedesca Eisenwer Munchen A.G. presenta una struttura ignifuga costituita da un telaio in acciaio rivettato e controventato per rispondere alle azioni del vento, mentre la copertura a falda unica è in lamiera di ferro zincato (fig.299). Per evitare il fenomeno di irraggiamento solare degli ambienti interni, oltre a delle tende schermanti, le facciate trasparenti (di 3mm di spessore) sono realizzate con un vetro opaco (fig.300). L'edificio è inoltre dotato di una caldaia a vapore a bassa pressione - nuova per l'epoca - che manteneva stabile la temperatura interna durante l'inverno.



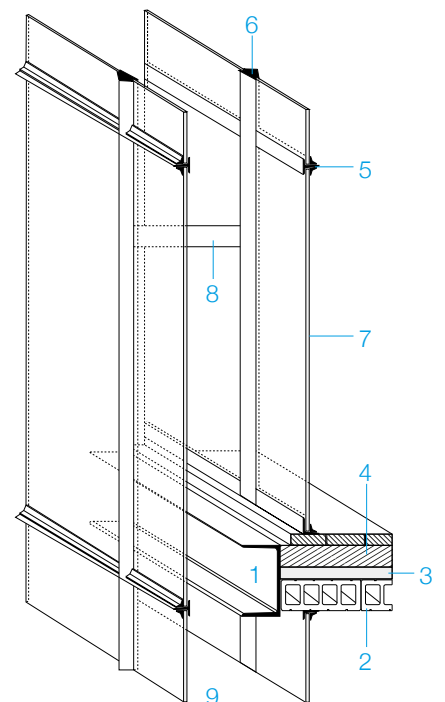
297



298



299



300

297. Nella pagina precedente: fabbrica di giocattoli Margarete Steiff, progettata nel 1903 da Richard Steiff a Giengen (Germania) e realizzata dalla ditta Eisenwer Munchen A.G., in www.facadesconfidential.it.

298. Nella pagina precedente: struttura della fabbrica di giocattoli Margarete Steiff realizzata in elementi strutturali misti in acciaio e ghisa, in www.facadesconfidential.it.

299. Nella pagina precedente: disegno progettuale elaborato dalla ditta Eisenwer Munchen A.G. in www.facadesconfidential.it.

300. Nella pagina precedente: dettaglio dell'involucro della fabbrica di giocattoli Margarete Steiff. Legenda: 1 traverse in acciaio (70x140mm); 2 solaio con tavelloni di laterizio forato della tipologia Hourdis; 3 strato di livellamento in conglomerato cementizio; 4 pavimento in listelli di pino posati su controlistelli inferiori 5 profilo in ferro laminato (30x20 e 35x25mm); 6 montante verticale in acciaio; 7 vetro opaco (3mm); 8 collegamento metallico della facciata continua; 9 intercapedine.

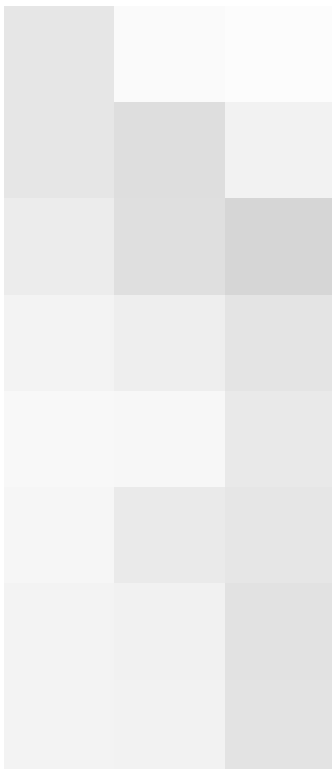
301. Vista esterna della fabbrica AEG Turbine, Berlino, 1908.

302. Vista interna della fabbrica AEG Turbine e della struttura in acciaio tralicciata dei pilastri e della copertura a timpano, 1908.

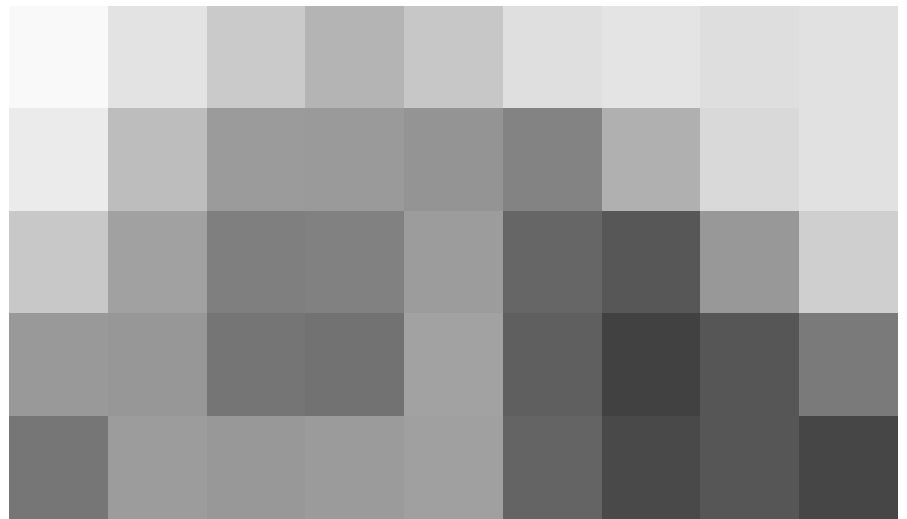
303. Peter Behrens, Sezione della fabbrica AEG Turbine, 1908.

L'intuizione di Steiff rimase in quegli anni una testimonianza di progresso sconosciuta, troppo in anticipo con i tempi: il teorico Sigfried Giedion era troppo giovane per apprezzarne l'evoluzione teorica del sistema involucro; Hermann Muthesius (1861-1927) o Heinrich Tessenow (1876-1950) erano troppo interessati al lavoro artigianale per notare l'acciaio, il vetro o le fabbriche moderne, mentre il maestro ispiratore dell'architettura in vetro Paul Scheerbart, non aveva ancora pubblicato la sua *Glasarchitektur* (1914). La fabbrica Steiff, inoltre, venne messa in ombra prima dalla Esposizione del 1914 del *Deutscher Werkbund* a Colonia, poi dalla costruzione di altri edifici industriali tedeschi di architetti preminenti e secondo nuove logiche costruttive nell'impiego dell'acciaio, tra cui la famosa AEG Turbine progettata da Peter Behrens nel 1908

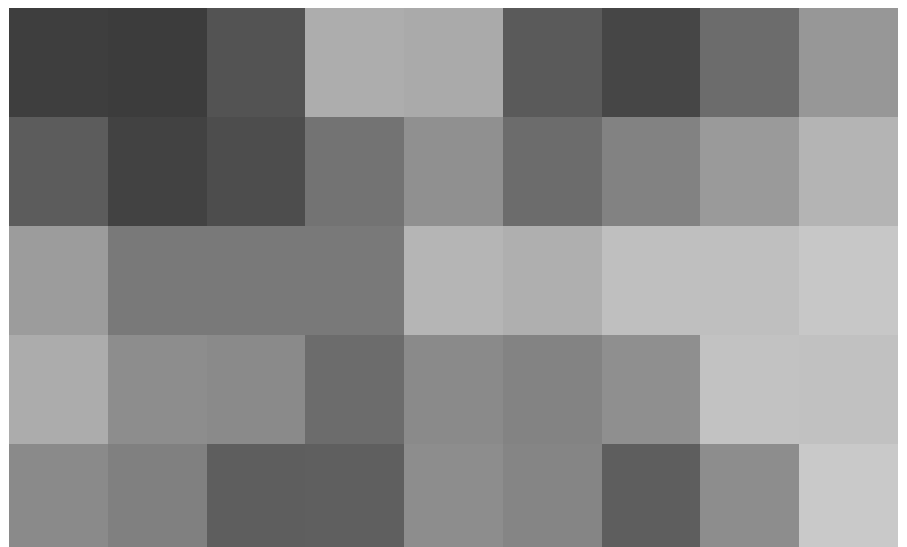
e le Officine Fagus progettate nel 1911 da Walter Gropius (Berlino, 1883 – Boston, 1969) e Adolf Meyer (Mechernich, 1881 – Baltrum, 1929). Nell'AEG Turbine, Peter Behrens dovette scontrarsi con la realtà industriale delle fabbriche e unendo la concezione dello *Seitgeist* e del *Volkgeist* realizzò una intenzionale reificazione dell'industria, progettando la fabbrica come un vero tempio al potere industriale, dotandolo di timpano e risolvendo la soluzione d'angolo, le cui superfici martellate negano qualsiasi funzione portante della copertura e della facciata continua in acciaio e vetro (fig.301). Questa formula atettonica dell'edificio è affidata alla struttura intelaiata a traliccio a tre cerniere e alle imponenti travi in acciaio (per la prima volta saldate) poggiate su pilastri rastremati secondo un imponente schema trilitico (figg.302-303).



302



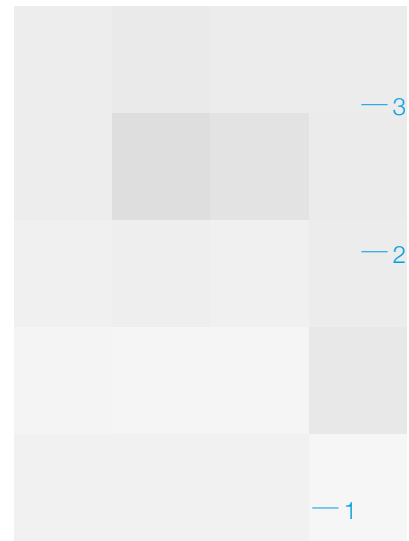
301



303



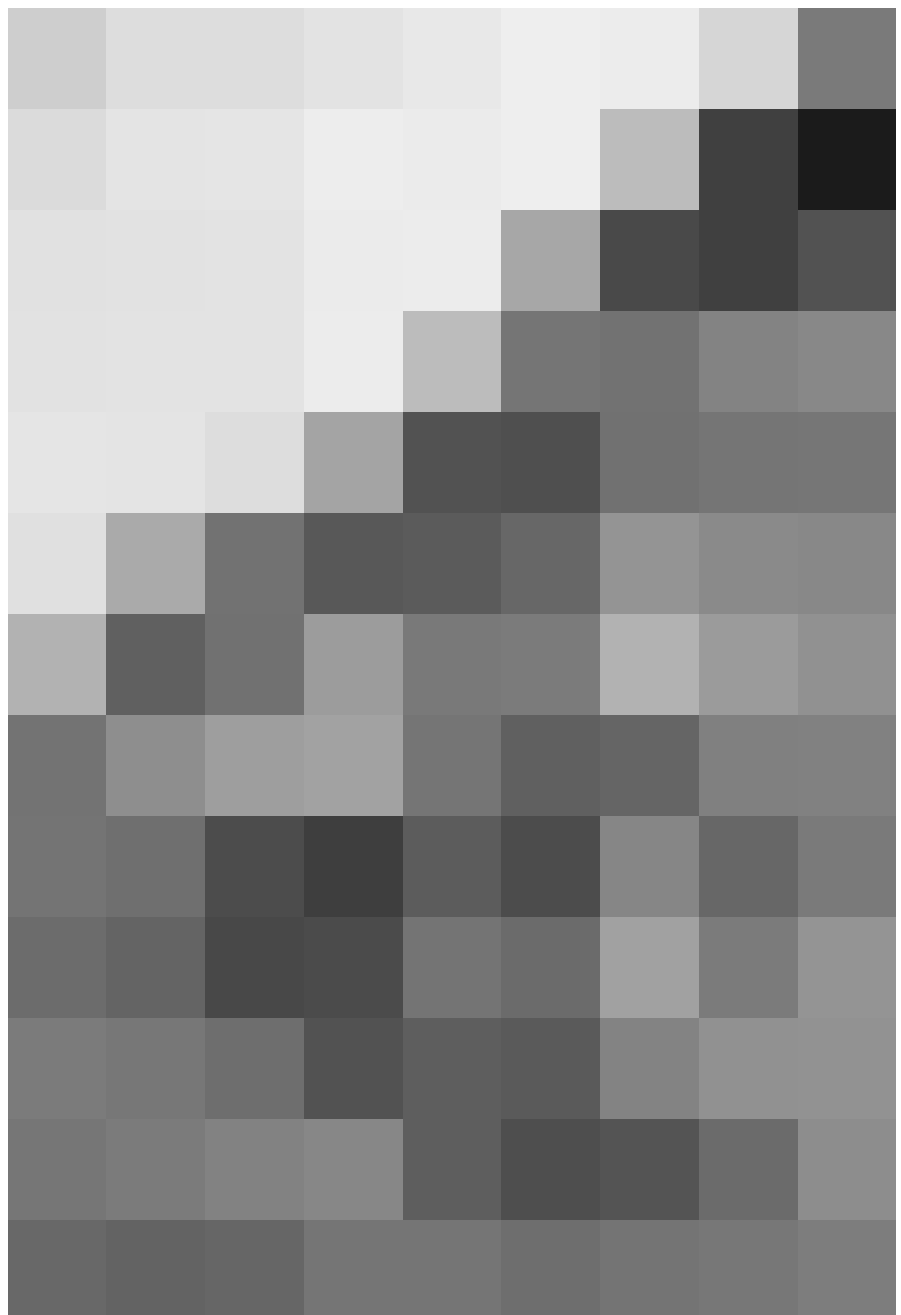
304



305

Nelle Officine Fagus ad Alfred-ander-Leine, invece, Gropius e Meyer abbandonano ogni solennità classica del tempio behresiano, adottando una soluzione più aperta, tradotta nella inedita soluzione d'angolo realizzata con un rivestimento atettonico in vetro e affidando alla copertura l'impressione di essere sospesa (figg.304-305). «Questo effetto di “sospensione”, unito all'angolo trasparente, inverte la composizione della Fabbrica di turbine, dato che la pura bidimensionalità della facciata verticale in vetro è accentuata dall'entasi classica della struttura rivestita in mattoni»¹⁹⁵.

Il distacco dell'involucro esterno dalle funzioni strutturali conduce alla scissione tra sistemi portanti e sistemi facciata: l'indipendenza dell'involucro dalle intelaiature strutturali si determina secondo le necessità funzionali di illuminazione per gli edifici industriali. Nella fabbrica-modello progettata per l'Esposizione del Werkbund del 1914, la facciata assume un valore materico in cui per la prima volta le pareti in vetro si curvano avvolgendosi alle scale elicoidali disposte alle estremità dell'edificio e la sintassi figurativa viene esplicitata dalla composizione modulare, dall'unificazione chiaroscurale che delinea le connessioni, espresse o celate, tra le superfici esterne (fig.306). Si legge sul Giedion a proposito di questo edificio: «le pareti di vetro e ferro si saldano nitidamente agli an-



306

304. Nella pagina precedente: Officine Fagus, progettate da Walter Gropius e Adolf Meyer nel 1911, © Zittlau, 2017.

305. Nella pagina precedente: dettaglio dell'involucro curvo delle scale elicoidali presenti alle estremità della fabbrica-modello progettato da Walter Gropius e Adolf Meyer per l'Esposizione del Werkbund del 1914.

306. Nella pagina precedente: dettaglio dell'involucro delle Officine Fagus. Legenda: 1 basamento in mattoni di laterizio, 2 struttura in montanti e traversi di acciaio, 3 vetro trasparente.

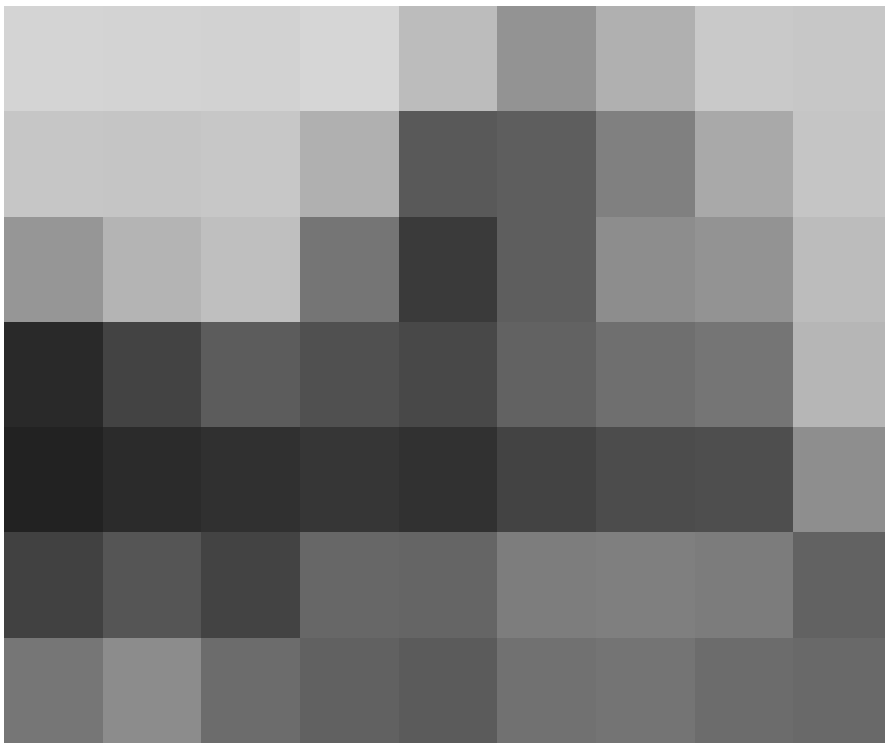
307. Bruno Taut, Glass Pavilion, 1914.

308. Scala a spirale del Glass Pavilion, 1914.

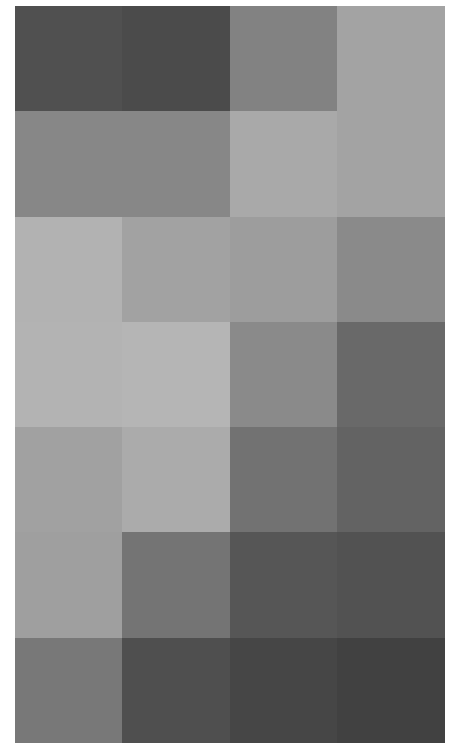
goli senza intromissione di pilastri e poi le scale sono a spirale, in un involucro di tutto vetro. Esse rassomigliano ad una molla imprigionata ed immobilizzata nello spazio»¹⁹⁶. L'espressione figurativa più completa in tal senso è rintracciabile nel Padiglione di Vetro di Bruno Taut (Königsberg, 1880 – Istanbul, 1938) sempre all'esposizione del Werkbund del 1914 a Colonia, una cupola sfaccettata a pareti in blocchi di vetro prismatico (richiamando i principi sostenuti da Paul Scheerbart) (figg.307-308) che costituisce il manifesto architettonico di un'epoca caratterizzata dalle elabora-

zioni di Erich Mendelsohn (Olsztyn, 1887 – San Francisco, 1953) nei progetti di edilizia commerciale¹⁹⁷.

L'involucro dei Grandi Magazzini Petersdorff a Wroclaw (Breslavia) progettati dal maestro tedesco nel 1927 rappresenta una visione espressiva del sistema facciata attraverso un gioco sapiente di luce ed ombra, di chiaro e scuro durante il giorno e la notte. Una interpretazione della poetica della luce, modellata con ampie vetrate curve che suggeriscono la visione della massa muraria durante il giorno ed il passaggio dell'energia luminosa durante la notte (fig.309).

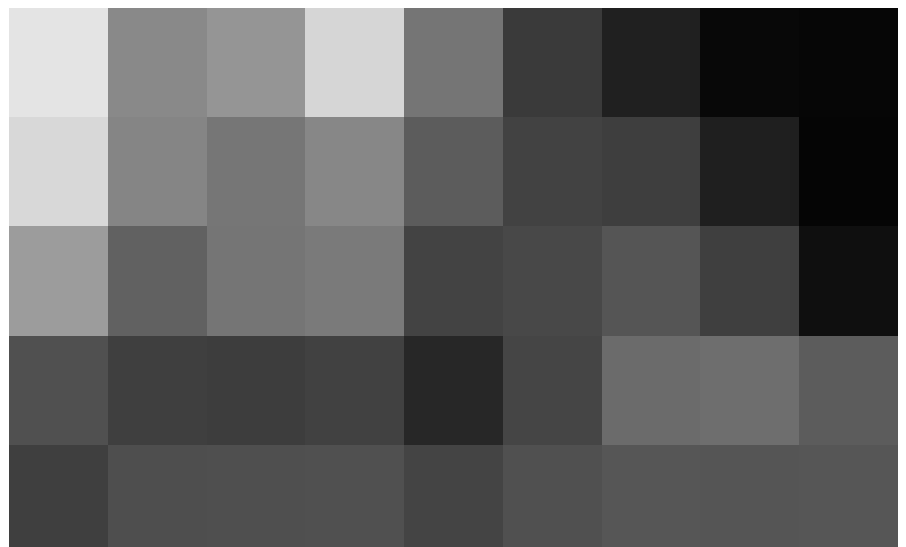


307



308

309. Erich Mendelsohn, Grandi magazzini Petersdorff a Wroclaw (Breslavia), 1927.

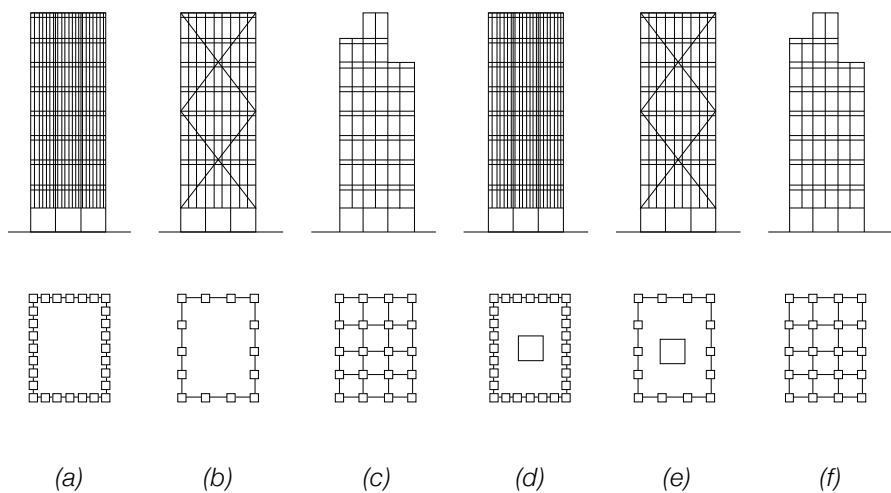


309

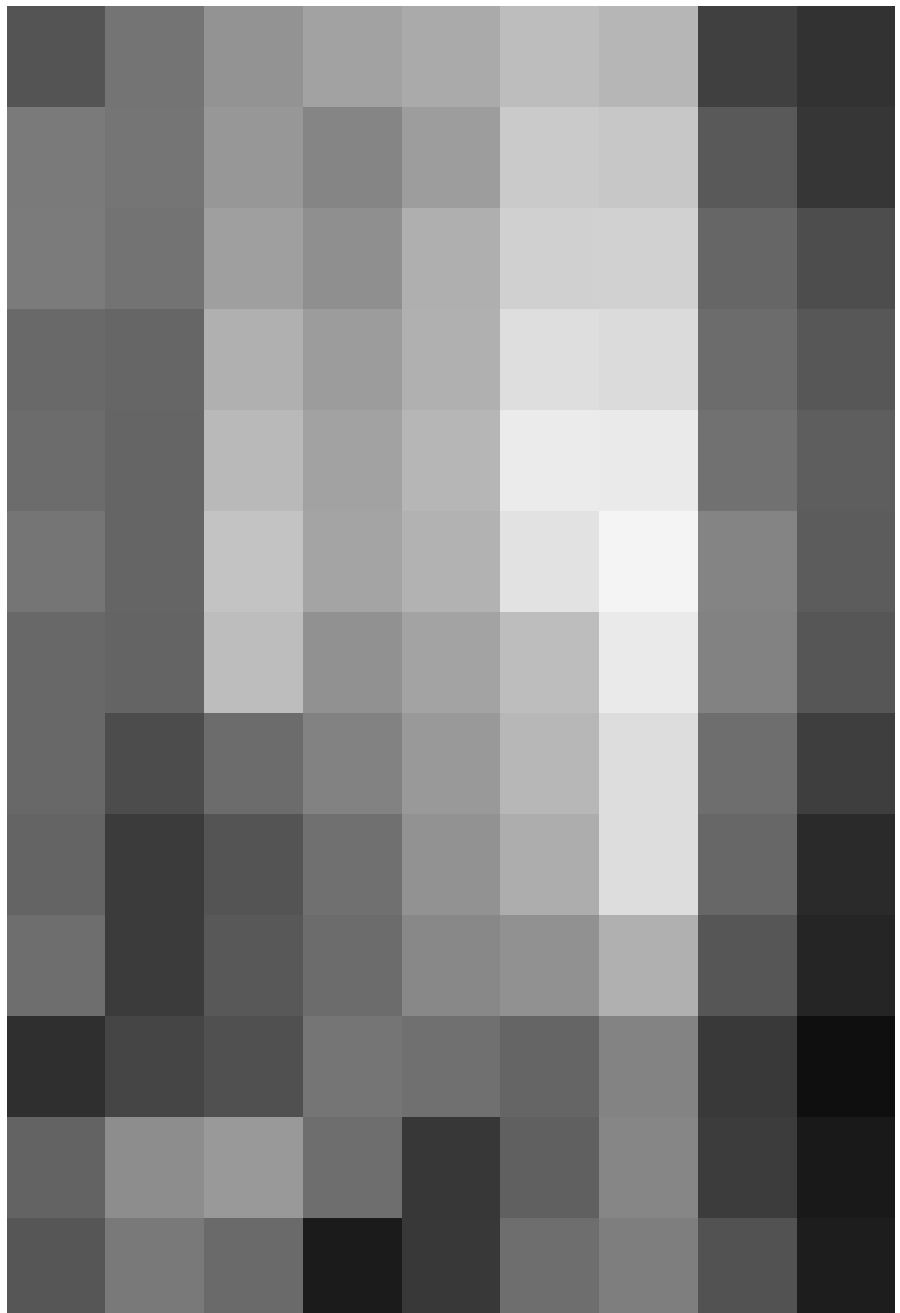
Nel periodo successivo, il progresso strutturale delle costruzioni in acciaio subisce un notevole incremento negli edifici industriali prima dell'introduzione del calcestruzzo armato. Se negli edifici industriali l'acciaio viene lasciato a vista, negli edifici residenziali viene sempre inglobato all'interno di rivestimenti in grado di assicurare un maggiore livello di resistenza al fuoco. Lo sviluppo tecnologico del grattacielo in acciaio si completa prevalentemente negli Stati Uniti dove il costante aumento delle altezze rende necessarie nuove soluzioni strutturali. Tra queste la più innovativa è la struttura portante a tubi di acciaio nelle sue varianti (*Framed Tube*, *Trussed Tube*, *Cellular-Tube-Frame* e del *Tube-in-Tube-system*), introdotta dall'ingegnere Fazlur Rhaman Khan (1929-1982) nel 1963, rivoluzionando il concetto di grattacielo (fig.310). I carichi laterali come le forze del vento, le forze sismiche, etc., iniziano a dominare il sistema strutturale e assumono un'importanza crescente nell'intero sistema edilizio all'aumentare dell'altezza dell'edificio. Le strutture dei tubi sono rigide e presentano vantaggi significativi rispetto ad altri sistemi di intelaiatura. Non solo rendono gli edifici strutturalmente più forti ed efficienti, ma riducono anche significativamente i requisiti di materiale strutturale. La riduzione dei materiali rende gli edifici economicamente più efficienti riducendo l'impatto ambientale.

Il *Framed Tube* (*tubo a cornice*) è una struttura tubolare incorniciata come una struttura spaziale tridimensionale composta da tre, quattro o più telai controventati con pareti resistenti agli sforzi di taglio e solidarizzati in corrispondenza delle intersezioni. Il primo edificio ad adottare questo sistema fu il Plaza on DeWitt progettato nel 1965 da Khan (fig.311).

Il *Trussed-tube* (*tubo a traliccio controventato*) è un sistema che presenta un numero minore di pilastri perimetrali rinforzati, però, con controventi diagonali e pareti in calcestruzzo armato. L'esempio più significativo è il John Hancock Center



310



311

310. Nella pagina precedente: tipologie di strutture a tubo di acciaio: a) Framed Tube, b) Trussed Tube, c) Bundled tube, d) Tube-in-Tube-system, e) Trussed tube-in-tube, f) framed tube and hat/belt trusses.

311. Fazlur Rhaman Khan, Plaza on DeWitt (1965), © Nickel Richard Archive, Chicago, 1963.

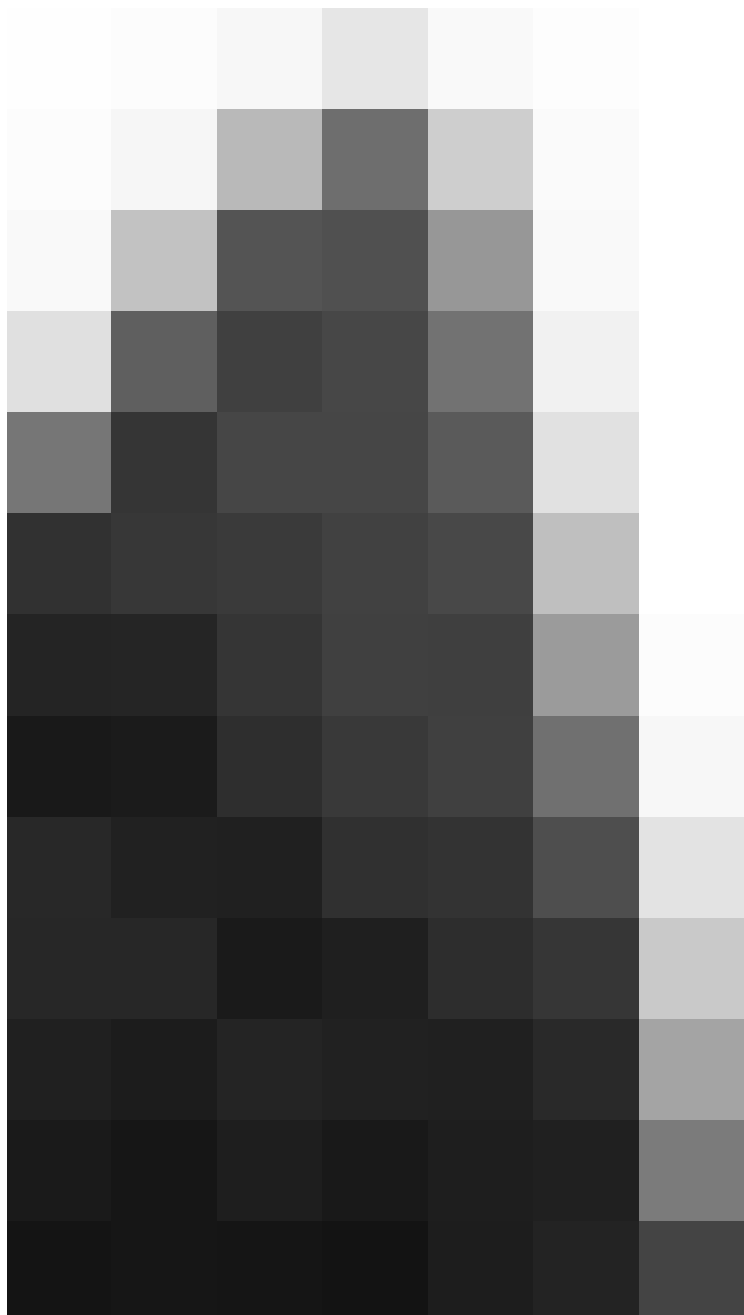
312. Fazlur Rhaman Khan, John Hancock Center (1965), © James K. Poole.

313. Fazlur Rhaman Khan, dettaglio della struttura del John Hancock Center.

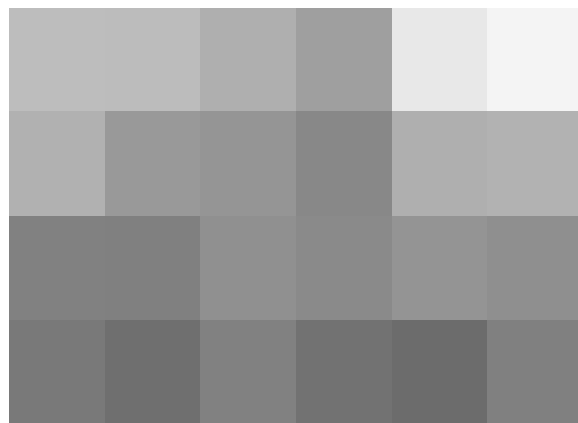
314. Bruce Graham e Fazlur Rhaman Khan, Sears Tower (1974), © Ezra Stoller.

di Chicago (1961) (figg.312-313). Con i suoi 442m di altezza, la Sears Tower di Chicago, costruita nel 1974, è stata per molto tempo l'edificio più alto e innovativo del mondo, progettato dal gruppo composto da Khan e Bruce Graham (fig.314). Costruita con il principio del fascio di tubi (*Cellular-Tube-Frame*), quest'ultimi vengono collegati orizzontalmente da reticoli spaziali in corrispondenza degli arretramenti dei blocchi di piano e ulteriormente stabilizzati con tubi diagonali (trussed tube). Le strutture Tube-in-Tube (tubo in tubo) presentano un nucleo centrale all'interno della struttura - con-

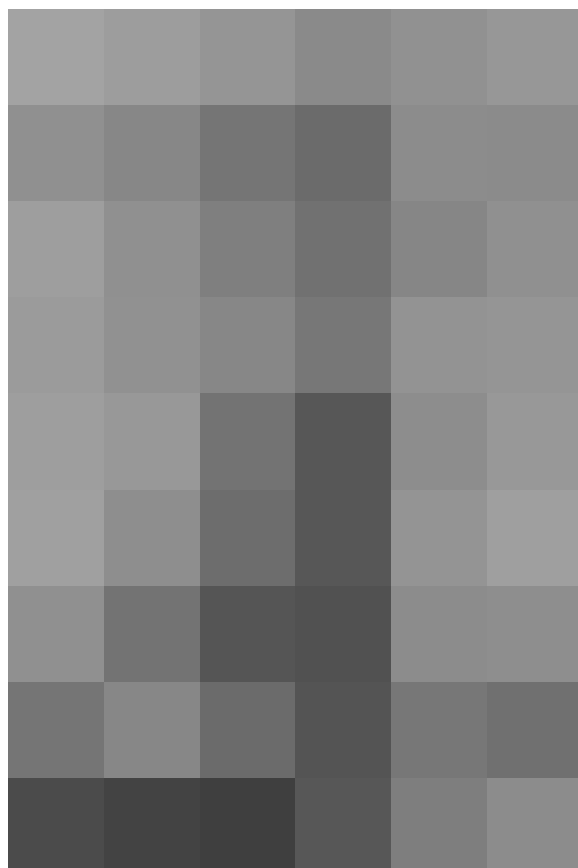
tenente l'ascensore e altri servizi, e una serie di tubi lungo il perimetro. La maggior parte dei carichi gravitazionali e laterali sono normalmente sostenuti dal tubo esterno a causa della sua maggiore resistenza. Il *Bundled tube* è un sistema modulare costituito da diversi tubi collegati tramite travi che permettono di discostarsi dal tipico aspetto scatolare dell'edificio, a favore di una forma architettonica più libera. Esistono anche strutture ibride, ottenute dall'unione di due o più sistemi (*Framed tube-intube*; *Trussed tube-in-tube*; *Framed tube and hat/belt trusses*).



312



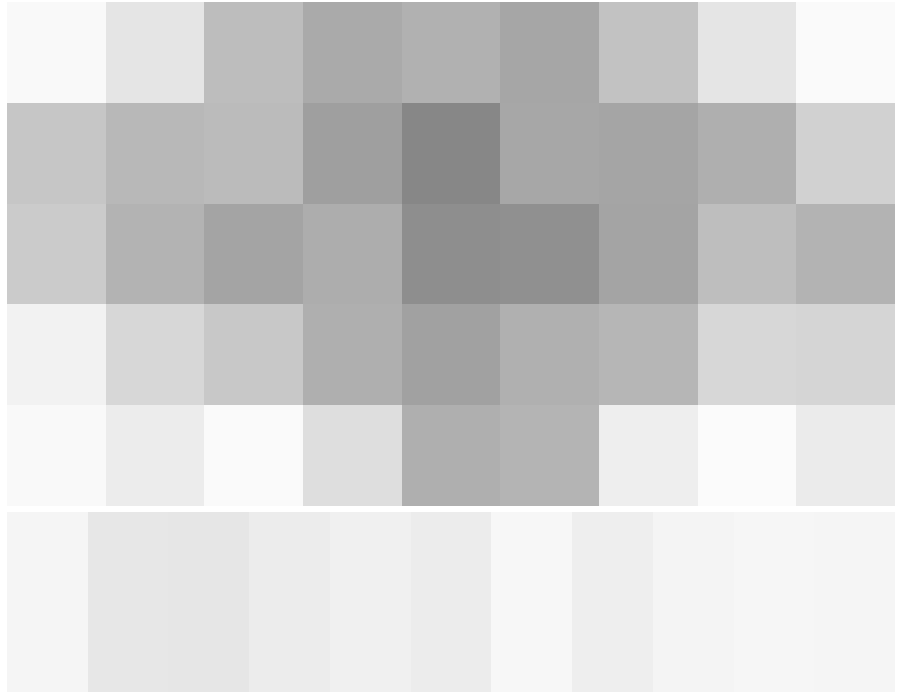
313



314

L'abitare contemporaneo, avanguardie costruttive, prefabbricazione e materiali per l'involucro edilizio 'a secco'

La struttura della tipologia *ridge and furrow*¹⁹⁸ della copertura del Palazzo di Cristallo ideata dallo specialista di serre Joseph Paxton dell'Esposizione Universale di Londra del 1851 ha rappresentato una notevole spinta all'innovazione dell'architettura di acciaio e vetro non solo nelle grandi opere, ma anche nell'architettura minore (fig.315). Il sistema della prefabbricazione promosso da Paxton consentì non solo la produzione di nuovi elementi (come le lastre di rivestimento in lamiera ondulata e zincata inventata intorno al 1840) (fig.316), ma lo sfruttamento dell'acciaio in modo razionale per la costruzione economica di nuovi spazi abitativi. Il linguaggio espressivo dell'architettura del Novecento vede l'affermazione in Europa e in particolar modo in Italia, di nuove sperimentazioni stilistiche, simbolo di una nuova architettura caratterizzata dall'utilizzo di innovativi materiali costruttivi e dalla codificazione di tecnologie costruttive più idonee alla nuova tendenza generale della “civiltà delle macchine”. La cultura costruttiva della stereotomia muraria venne gradualmente mitigata con l'avvento della struttura in acciaio e della tecnica del calcestruzzo armato configurando nuove costruzioni “miste” costituite da un sistema intelaiato in acciaio o calcestruzzo armato e muratura portante in elementi prefabbricati.



315



316

Il successivo sviluppo dell'industria edilizia e con la ‘rinnovata’ consapevolezza di una progettazione ottimizzata alla velocità e alla economicità del processo edilizio, si diffonde l'interesse della produzione di elementi prefabbricati industrialmente da poter assemblare direttamente in cantiere. La parola «razionalizzazione» deriva dal latino «ratio», «calcolo» oppure, in senso figurato «ragione». Essa significa perciò azione ragionata. I sistemi tecnologici razionalizzati hanno trovato diffusione dopo i conflitti mondiali, nelle economie nazionali e rappresentano oggi una forma destinata ad agi-

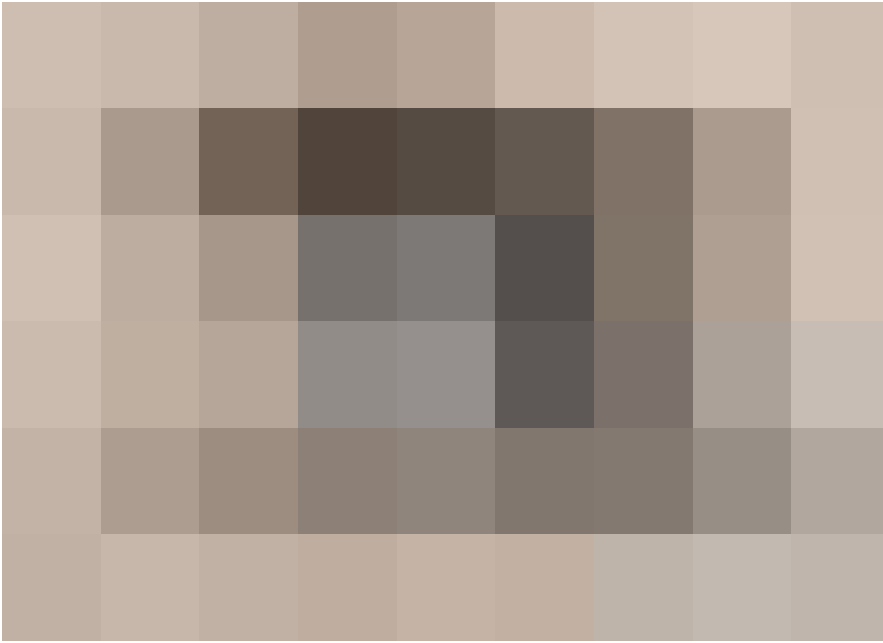
re sull'abitare contemporaneo¹⁹⁹. La razionalizzazione dei processi costruttivi e l'impiego dell'acciaio e del calcestruzzo armato si manifesta soprattutto nel sistema edilizio dell'involucro 'a secco'²⁰⁰ determinando scenari del tutto nuovi che hanno aperto la porta a soluzioni innovative di ogni genere. Tale sistema viene inizialmente sperimentato per la realizzazione di residenze modulari prefabbricate in serie come risposta alle problematiche sociali derivanti dalle condizioni di vita inaccettabili che si riscontravano nelle città dopo l'exploit della Rivoluzione Industriale ed il con-

315. Nella pagina precedente: sistema di copertura «*ridge and furrow*» ideata da Joseph Paxton per la realizzazione delle sue serre in ferro e vetro. Il sistema è costituito da un modulo di copertura a più falde poggiate su delle travi tralicciate poggiate sulle colonne in ghisa. Le colonne perimetrali sono cave e presentano un'anima in piombo per il convogliamento delle acque meteoriche raccolte lungo le grondaie posizionate all'intersezione di una falda e l'altra. Le grondaie che, nel caso del Crystal Palace sono ancora realizzate in legno, presentano sui cosciali laterali delle scanalature per evitare che il fenomeno di condensa sulle superfici trasparenti generasse percolazione lungo le intersezioni.
316. Nella pagina precedente: casa prefabbricata in lamiera ondulata da inviare nelle colonie d'oltremare e tipologie di lamiera ondulata, in Schultz H.C., Sobek W., Habermann K.J., *Atlante dell'Acciaio*, Utet, Torino, 1999, pag.66.
317. Alexander Klein, *Existenzminimum*: confronto tra un appartamento borghese del 1800 ed una abitazione progettata secondo i principi della razionalizzazione.

seguito sviluppo demografico. A partire dalla fine degli Anni '30 del Novecento in Europa e soprattutto in Germania ed in Italia si giunge alla concezione di una casa popolare 'totalitaria', sintesi di standardizzazione integrale, funzionalismo, igiene e benessere abitativo. Il concetto di standardizzazione presuppone i concetti di grande produzione, educazione, selezione e perfezione, simbolo dello sviluppo e del progresso di una civiltà. In architettura esiste uno standard relativo all'uomo come individuo fisico avente certe dimensioni ed uno standard relativo alle condizioni del clima e alle condizioni economiche dell'uomo stesso²⁰¹. La risposta al soddisfacimento dei bisogni dell'uomo è fornita dalla teoria dell'*existenzminimum*, formulata dai maestri del razionalismo con l'obiettivo di progettare l'abitazione minima nel rispetto dei bisogni fisici e psicologici dell'uomo. I principi su cui si basava il pro-

gramma del Bauhaus del 1919 in Germania e di Alexander Klein (Odess, 1879 – New York, 1961) in Russia, furono i segni di razionalizzazione di una nuova architettura attraverso la progettazione razionale dei vani, la modularità delle strutture e l'utilizzo di materiali economici. Tra i diversi studi metodologici di Klein è interessante il confronto tra un appartamento tradizionale di fine Ottocento e un alloggio di pari metratura proposto nel 1928 secondo i principi dell'*existenzminimum* (fig.317). Si nota per la prima volta una distribuzione modulata strutturalmente dei vani con dimensioni adeguate, l'analisi vettoriale dei percorsi (più brevi e rettilinei possibili), lo studio dello "spazio del libero movimento" in relazione all'arredamento, l'analisi delle frontiere quale ostacolo fisico-ottico dovuto alla presenza di elementi alti e ingombranti ed, infine, particolare attenzione all'aspetto di illuminazione e ventilazione degli spazi.





318

318. Maison Dom-Ino è un progetto elaborato dall'architetto Charles-Édouard Jeanneret-Gris detto Le Corbusier nel 1914 per favorire la ricostruzione edilizia al termine della prima guerra mondiale, con la filosofia di impiegare pochi mesi per rifondare le città distrutte ipotizzando una casa in cemento armato dove i solai erano lastre sospese sui pilastri.

Il concetto del soddisfacimento di tutte le necessità primarie legate all'abitazione ha sviluppato, quindi, una nuova tendenza corroborata dallo studio di nuove discipline quali l'ergonomia, il risparmio energetico, il reimpiego dei materiali da costruzione, la manutenibilità, la durabilità degli elementi e l'embrionale studio del sistema tecnologico dell'involucro edilizio. Esso, non più assimilabile come rivestimento della facciata di un edificio, si tramuta in un elemento autonomo e indipendente dalla struttura e recepisce tutti i requisiti prestazionali di isolamento termico e acustico, resistenza al fuoco, antieffrazione, etc.

I principi dell'*existenzminimum*, quindi, devono poter adeguare le forme abitative contemporanee ai bisogni mutevoli dell'uomo. In Europa e in Italia, infatti, con l'avvento dell'industrializzazione si hanno profondi mutamenti nella struttura sociale; diminuisce, infatti, il numero dei componenti di una famiglia (non più un nucleo produttivo autosufficiente come lo era nel contesto sociale contadino), e con l'emancipazione della donna, la famiglia perde anche il suo riferimento principale nel focolare domestico. La nuova idea di alloggio minimo, quindi, deve possedere particolari requisiti, ovvero offrire una abitabilità familiare, risultare igienico (quan-

tità sufficiente di spazio, aerazione, illuminazione e calore), essere economico e soprattutto costruito facilmente e rapidamente avvalendosi di tecniche costruttive provenienti dall'industrializzazione edilizia. Le ricerche sull'*existenzminimum* e sulla casa industrializzata, diventano i temi principali del dibattito architettonico propenso ad una pertinente tendenza innovativa dell'organizzazione dello spazio abitativo mediante il «*Plan libre*» (*pianta libera*)²⁰² (fig.318) e con l'influsso di innovazioni di carattere tecnico-costruttivo ottenute con l'impiego di nuovi materiali, esito di indagini e sperimentazioni, quali vetro, acciaio e calcestruzzo armato. A questa nuova tendenza si accostano nuove tecniche costruttive legate alla prefabbricazione edilizia; la casa è come afferma Le Corbusier, una “macchina da abitare” ossia un insieme di componenti, meccanismi e strumenti per abitare e realizzare spazi di qualità per le nuove esigenze di vita dell'uomo contemporaneo. Allo stesso tempo, proprio sotto la spinta tecnologica, la casa diventa sempre più macchina, dotata di innumerevoli impianti atti ad assicurare le funzioni essenziali dell'abitare.

L'architetto Hans Spiegel (1893-1987) nel suo libro *Der Stahlhausbau*²⁰³ (*Lo sfruttamento dell'acciaio*) analizza i metodi costruttivi tradizio-



dustrie manifatturiere per convincersi che già sono a nostra disposizione infinite varietà di parti componenti di edifici prodotte su scala industriale. Secondo un processo di evoluzione graduale, l'antico metodo di costruire a mano si è trasformato in quello di comporre pezzi già pronti, mandati al cantiere dalla fabbrica [...]. Ecco perché dobbiamo affrettarci a riguadagnare il terreno perduto educando la giovane generazione di architetti al duplice compito: entrare nell'industria edilizia e prendere parte attiva allo studio e alla determinazione di tutte le parti componenti di un edificio e imparare a comporre, con quei prodotti industriali, edifici belli»²⁰⁵.

319

319. Poster di presentazione dell'Esposizione della Weissenhofsiedlung del Deutsche Werkbund tenutosi nel 1927 a Stoccarda in relazione al contributo ideatore di Mies van der Rohe che assegnò diversi appezzamenti di terreno a numerosi progettisti appartenenti al Werkbund per l'ideazione di diverse case da esposizione. L'esposizione divenne la prima manifestazione a respiro internazionale di un nuovo modo di costruire che si basava sull'impiego di intonaci bianchi, di forme regolari e di tetti piani, identificato a partire dal 1932 con l'*International Style*.

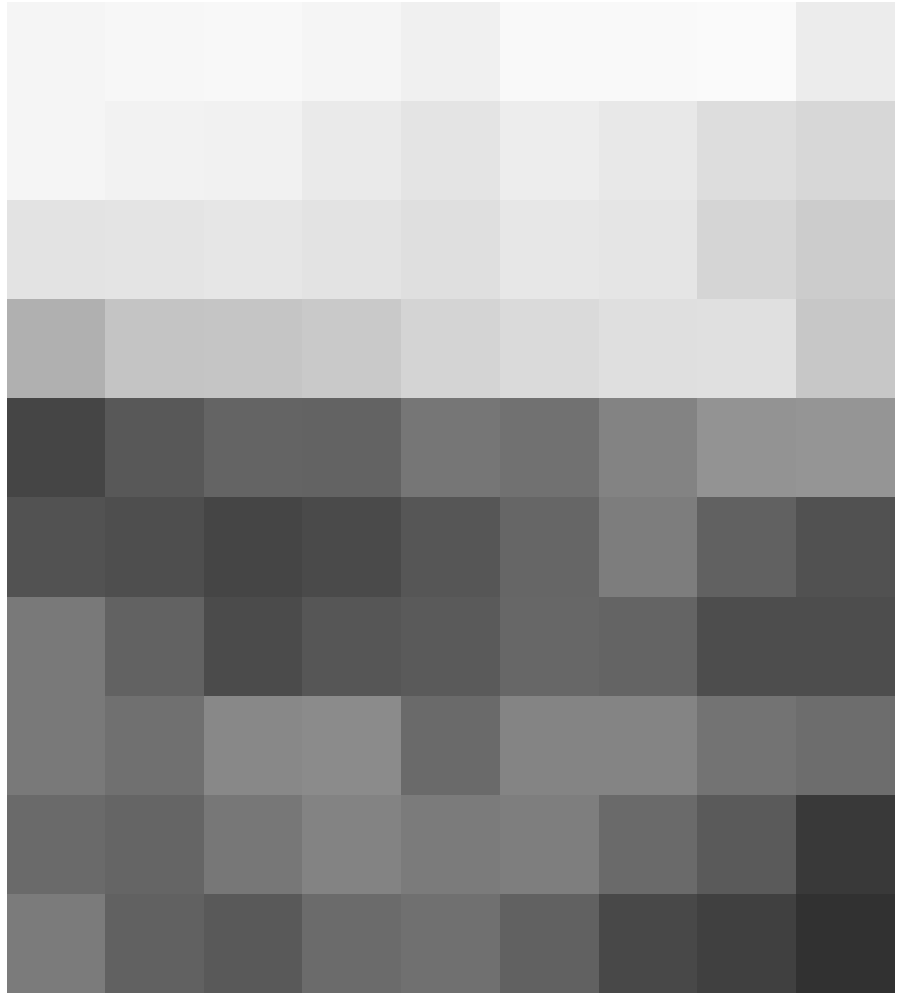
nali declinandoli attraverso l'integrazione di elementi in acciaio per la realizzazione di case razionali, soprattutto dopo la prima guerra mondiale. Non sorprende che il processo di prefabbricazione di case in acciaio verrà ripreso e diffuso contestualmente dai cosiddetti classici moderni come Jacobus Johannes Pieter Oud (1890-1963), Gerrit Rietveld (1888-1964), Adolf Peter Rading (1888-1957), Georg Muehe (1895-1987), Walter Gropius e da Mies van der Rohe con l'Esposizione del Werkbund a Stoccarda nel 1927 (fig.319), alla Fiera annuale "La città della tecnica" a Dresda nel 1928 e all'Esposizione "WUWA" degli spazi residenziali e lavorativi di Breslavia del 1929.

In tale contesto l'architetto Walter Gropius – definito il «teorico della prefabbricazione»²⁰⁴ fornisce un importante apporto alla prefabbricazione edilizia sostenendo la necessità di una architettura "sociale" vocata alla determinazione di un alto standard edilizio e indirizzando le ricerche alla individuazione di metodi per aggiornare l'architettura ai problemi e alle esigenze moderne. Gropius, infatti, aveva intuito che l'industrializzazione del processo edilizio non sarebbe avvenuto per modelli ma per componenti; come egli afferma «le parti componenti di un edificio, l'una dopo l'altra, vengono tolte di mano agli artigiani e affidate alla macchina. Basta guardare i cataloghi delle in-

Inoltre, egli affermerà come «la fabbricazione di queste abitazioni non può avvenire in cantiere, ma deve essere eseguita in officina. Impiegando materiali industriali più preziosi si devono ridurre peso e massa del volume edilizio, mentre si aumentano stabilità e isolamento, tanto che diventerà possibile trasportare su pochi camion dal luogo di produzione al cantiere una casa unifamiliare scomposta in singoli elementi da montare, ed erigerla nel più breve tempo possibile, indipendentemente dalla stagione e dalle condizioni climatiche»²⁰⁶. L'accademico tedesco predilige la produzione di componenti utilizzati

Secondo un processo di evoluzione graduale, l'antico metodo di costruire a mano si è trasformato in quello di comporre pezzi già pronti, mandati al cantiere dalla fabbrica.
- Walter Gropius

in modo flessibile attraverso operazioni di assemblaggio ‘a secco’, ottenendo tempi di realizzazione ridotti e indipendenza rispetto ai fattori stagionali e meteorologici. Secondo Gropius, infatti, «*questo metodo di montaggio “a secco”, non solo eliminerebbe l’increscioso distorcersi e piegarsi delle parti costruttive a causa dell’umidità, ma anche la perdita di tempo richiesta dall’essiccamento delle case costruite con i metodi tradizionali della muratura, calcina e intonaco. Ciò assicurerebbe alla costruzione la piena indipendenza rispetto ai fattori stagionali e meteorologici*»²⁰⁷. Egli definisce il sistema di assemblaggio ‘a secco’ un «*miracolo dato dall’esatto incastro delle varie parti componenti dell’edificio, fatte a macchina, a prezzo fisso e con un tempo di montaggio breve, accuratamente prevedibile e garantito*»²⁰⁸. L’introduzione del nuovo sistema di assemblaggio ‘a secco’ rappresenta un mutamento radicale rispetto alle costruzioni convenzionali, sia per quanto riguarda il sistema strutturale, sia quanto inerente i materiali edilizi. I materiali quali pietra, mattoni e legno sebbene conosciuti nella tradizione costruttiva quali materiali nobili, a partire dal periodo Moderno si tramutano in materie prime adoperate nei nuovi processi di produzione industriale (lavorati a macchina) «*si da ottenere un’uniformità di comportamento (statico e prestazionale), sulla quale si possa contare in modo assoluto (acciaio, cemento, legno sintetico)*»²⁰⁹. A tale scopo matura l’esigenza di produrre una serie di materiali e, quindi, sistemi costruttivi che siano frutto delle sperimentazioni delle nuove industrie moderne, tali da avere proprietà strutturali e isolanti pari (se non migliori) a quelle di una tradizionale muratura, ma con un volume e un peso notevolmente minore, agevolandone la velocità e facilità di montaggio. Pertanto, agli inizi del Novecento, nei paesi europei industrializzati si diffonde lo studio di case-pilota sperimentali, modelli costruiti in serie nei laboratori industriali con il compito principale di



320

eliminare l’enorme spreco di materiali, di tempo e di mano d’opera. La preponderante richiesta di nuove unità abitative alla rinnovata classe operaia, denuncia l’inadeguatezza di ampi quartieri «*ancora costruiti “a mano”, seguendo infiniti progetti individuali, non coordinati, anziché essere prodotti in serie secondo una pianificazione standardizzata*»²¹⁰.

La razionalizzazione edilizia, mediante case-pilota, implica la raccolta e la unificazione delle varie attività edilizie al fine di ottenere un piano generale che investa tutto il settore delle costruzioni, una ricerca sapiente e creativa di progresso in grado di assicurare una casa adeguata al soddisfacimento di esigenze materiali e psicologiche della vita ‘moderna’. Sorgono, quindi, questioni di rilievo riguardo la diffusione del processo di prefabbricazione edile, che è regolata da una serie di fattori quali: una mirata pianificazione territoriale, da un mercato di investimento

320. Modello sperimentale “Casa 17” progettata nel 1927 da Walter Gropius in occasione dell’Esposizione della Weissenhofsiedlung del Deutsche Werkbund tenutosi nel 1927 a Stoccarda.



321

321. Modello sperimentale "Casa 17" progettata nel 1927 da Walter Gropius in occasione dell'Esposizione della Weissenhofsiedlung del Deutsche Werkbund tenutosi nel 1927 a Stoccarda.

per la prefabbricazione, dalla adozione di regolamenti edilizi adattati alle nuove tecniche costruttive, alla individuazione di tipologie di alloggi più convenienti economicamente e socialmente ed, infine, la determinazione di dimensioni abitative 'tipo' e le relative componenti che possano determinare una semplificazione dell'organizzazione del cantiere. Numerosi sono stati i tentativi di ideazione e produzione di case-pilota agli inizi del Novecento nel panorama europeo, ma essi sono stati piuttosto isolati l'uno dall'altro anziché costituire le parti di un organismo universalmente adattabile ai diversi contesti. Fra alcuni casi più emblematici, particolarmente interessante

è quello proposto da Walter Gropius che nel 1927 sperimentò diverse tipologie di abitazione. La "Casa 17" rappresenta il primo prototipo europeo di sistema costruttivo 'a secco', in cui l'unico elemento realizzato in cantiere è la fondazione costituita da una lastra in calcestruzzo armato, mentre gli altri componenti sono prefabbricati industrialmente e assemblati *in situ*. La struttura era realizzata con profili in alluminio con sezione a "z" e tamponamenti realizzati con pannelli di agglomerato in sughero (Celotex) solidarizzati tra loro con catrame e rifiniti con lastre di eternit (figg.320-321). Altre sperimentazioni di case-pilota sono: "la Casa che cresce", casa



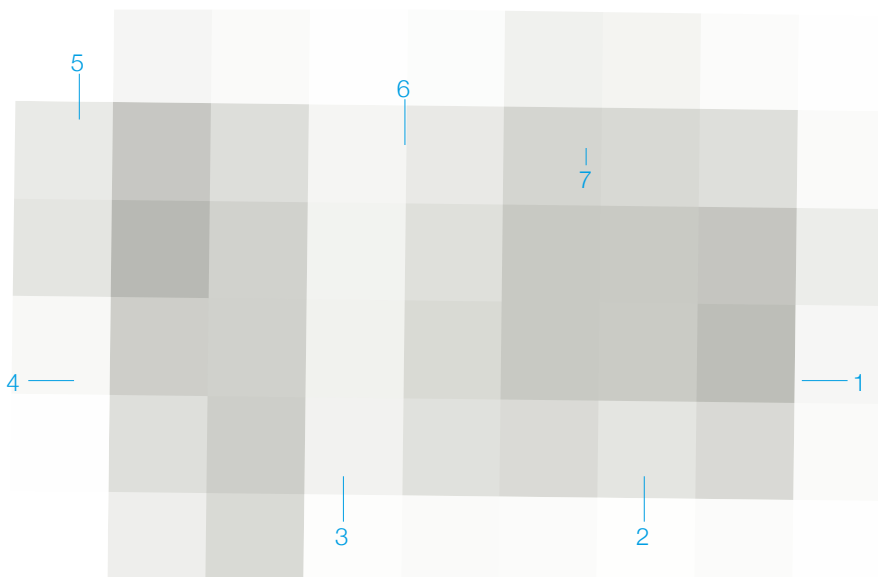
322

unifamiliare a struttura leggera in acciaio e chiusure verticali esterne realizzate in pannelli in fibra di legno e eternit in grado di ampliare la volumetria della casa al variare delle esigenze e del nucleo familiare; le "Case di rame" ("Hirsch-kupfer"), prefabbricate in grandi pannelli autoportanti rivestiti in fogli rame applicati su una struttura lignea intelaiata e isolati termicamente con pannelli isolanti in fogli di alluminio e agglomerato in fibre di amianto e bitume (fig.322).

I pannelli costituiti da fibre legnose e eternit (cemento-amianto) impiegati da Gropius nella casa-pilota "la casa che cresce", si affermarono quale sperimentazione di una nuova combinazione di materiali che prese il nome di "Cel-bes", prodotto italiano dell'omonima ditta milanese e commercializzato dalla "Società Anonima l'Infrangibile" (fig.323). Esso rappresenta uno dei principali pannelli isolanti utilizzati successivamente nella politica coloniale del

322. Modello sperimentale Hirsch-kupfer "Casa di rame". Legenda: 1 fondazione in calcestruzzo armato, 2 telaio ligneo della tipologia Balloon frame, 3 rivestimento in fogli di rame, 4 pannello isolante in fogli di alluminio e agglomerato in fibre di amianto e bitume.

323. Sistema prefabbricato di unità abitativa realizzata con pannelli isolanti Cel-bes prodotti dalla Società Anonima l'Infrangibile, su struttura intelaiata della tipologia Balloon Frame. Legenda: 1 telaio ligneo, 2 pannelli del tipo Cel-bes fissato meccanicamente con chiodi zincati, 3 rivestimento interno in linoleum bianco, 4 rivestimento esterno in intonaco civile, 5 pannelli multistrato in Cel-bes rivestito con lastre di eternit, 6 cartone catramato, 7 coprigiunto in strisce di garza e colla.



323

Regime del Ventennio per la costruzione di nuovi alloggi ed edifici civili favorendo il trasferimento di numerosi coloni in Cirenaica e in Somalia.

La necessità di nuovi alloggi e la fondazione di nuove città portò alla definizione di uno 'stile coloniale' caratterizzato dalla necessità di ridurre i tempi per la loro costruzione: si diffonde, quindi, l'utilizzo di strutture metalliche con tamponamenti leggeri e a ridotto spessore, sostituendo materiali tradizionalmente utilizzati per i tamponamenti (pietra e mattone), con lastre standardizzate di Eraclit, Celotex, Solomite, Tekton e Cel-bes, prodotti desunti dalla avanzata sperimentazione italiana che permette una costruzione 'a secco' più rapida (in termini di trasporto e posa in opera), leggera, economica e coibentata, assicurando il soddisfacimento dei requisiti di benessere abitativo. L'utilizzo di materiali prodotti in pannelli creava, quindi, le basi del successo di numerosi brevetti nazionali (italiani) riguardanti case prefabbricate adattate per le esigenze coloniali, la crescente richiesta di edifici temporanei a supporto dello sforzo bellico e per la rapida costruzione di nuove unità abitative.

La "Mostra Internazionale della produzione in serie" alla VII Triennale di Milano del 1940 organizzata dall'architetto Giuseppe Pagano, è la prima esposizione teorico-disciplinare volta a tracciare nel panorama italiano quanto progettato e prodotto 'in serie' alla fine degli Anni '30, attraverso una selezione mirata di architetture, arredi, oggetti tecnologici e utensili domestici. A Pagano si deve il contributo fondamentale al concetto di "standard" che permea profondamente nella sua riflessione critica. Nel 1933, sulla rivista Casabella, l'architetto specifica il *fundamentum* di tale concetto: «*alla base di tutto sta una nuova onestà, una nuova sincerità che si trasforma in orgoglio del nostro tempo, un profondo volitivo testardo sentimento di semplicità e di chiarezza. Diremo, anzi, una 'retorica della semplicità'*»²¹¹, che privilegia un nuovo approccio sulle nuove

componenti, la tecnica, la ragione, la funzionalità, lo scopo e l'obiettività che conducono alla «*rivalutazione di alcune leggi estetiche di grande importanza. Prima fra tutte, quella della "ripetizione". L'effetto monumentale del ritmo e dell'elemento ripetuto è legge antichissima [...] la chiamano legge dello "standard", talvolta per avvilirla come un semplice accidente economico o pratico, ma i grandi artisti del nostro tempo hanno avuto il coraggio di esaltarla non solo come una conseguenza dell'economia sociale, della industrializzazione e del lavoro in serie, ma anche come capitale modo di esprimere un solenne omaggio alla bellezza [...]. Un'altra legge generale di estetica, affogata nel delirio delle presunte originalità personali e nella avvilita meccanica dello stilismo accademico, è stata rimessa in onore dalle strutture in ferro in modo particolare: "il coraggio della uniformità"*»²¹².

La riflessione teorica di Pagano sulla produzione in serie definisce come la moderna organizzazione industriale perfeziona il concetto della serialità cercando di raggiungere nella riduzione del costo, nella razionalità della struttura, nella organicità funzionale dell'abitazione, non solo un ideale pratico ma una superiore idea di ordine, di estetica, di salute fisica e morale. Per questo affianco della standardizzazione dei mezzi di costruzione, viene sommariamente illustrata la proposta di una attuale e possibile standardizzazione dell'abitazione²¹³. Il valore del progetto di standardizzazione raggiunge, pertanto, picchi elevatissimi in Italia durante gli Anni '30. La politica del Regime ebbe in effetti un duplice atteggiamento nei confronti della "rivoluzione" razionalista²¹⁴.

Mentre inizialmente le nuove correnti artistiche dei futuristi e delle visioni moderniste degli architetti razionalisti fu di assoluto entusiasmo e condivisione, dalla metà degli Anni '30 con l'acuirsi delle vicende belliche, il Regime fascista riverbera la propria identità in un cupo e retorico immaginario monumentale ispirato alle grandi architetture del passato,



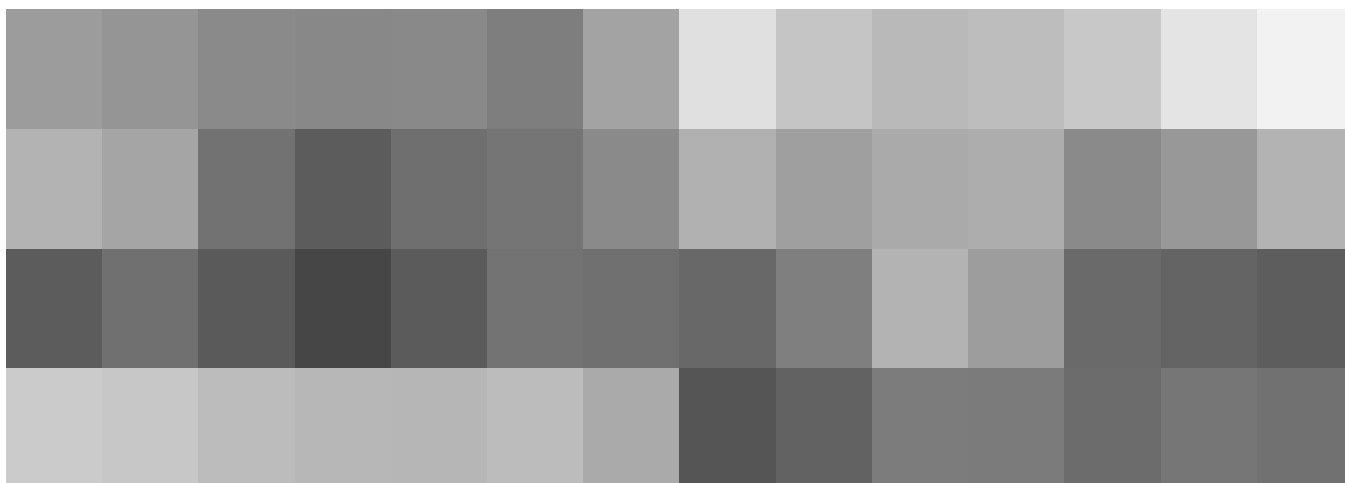
324

in particolar modo dell'Impero Romano, simbolo di potenza e invincibilità come il Palazzo della Civiltà Italiana di Ernesto Lapadula a Roma (1939) o la stazione centrale di Milano di Ulisse Stacchini (1931)²¹⁵.

La standardizzazione del prodotto industriale è stata la prima condizione della civiltà moderna italiana; «ai romantici nostalgici, che si scandalizzano nel vedere una sedia di metallo solo perché non c'è più sopra nessun intaglio, si deve dire che per un popolo di 44 milioni di abitanti che hanno tutti bisogno di case non c'è tempo da perdere. [...] La standardizzazione dell'industria edilizia, senza rimpianti né riserve, è la prima condizione di un'architettura moderna italiana»²¹⁶. Con questa denuncia, l'ingegnere Gaetano Ciocca dimostra come la prefabbricazione è l'unica strada per soddisfare l'esigenza abitativa di una Italia che nel 1936 aveva realizzato solamente 285.000 nuove unità abitative (di cui il 66,3% in comuni oltre 100.000 abitanti penalizzando notevolmente le aree rurali e poco urbanizzate nel quale viveva oltre il 48,1% della popolazione nazionale), una media annua appena utile a soddisfare l'incremento demografico²¹⁷.

I primi segni di un interesse specifico per la prefabbricazione edilizia in Italia sorgono in occasione del disastroso terremoto di Messina del 1908 in cui la ricerca tecnica, economica e sociale svolta nel 1910 da Marco Aurelio Boldi sul tema delle case popolari si rivela la più efficace per la realizzazione di case provvisorie (definite case 'mobili' e case 'smontabili'), di facile e immediata realizzazione in casi di emergenza. Durante il Ventennio si sviluppano le industrie del settore della lavorazione dei metalli, chiamate a sviluppare strutture residenziali temporanee facendo ricorso ad elementi strutturali metallici o lignei e tamponature prefabbricate, secondo una logica stringente ma progettualmente stimolante dell'autarchia. Ne è un esempio la “casa di vacanza mobile e smontabile” progettata dagli architetti Ernesto A. Griffini e Eugenio Faludi, caratterizzata da una struttura portante in legno e rivestimenti in Celotex, costituiti da pannelli in fibra di canna da zucchero pressati e trattati chimicamente, con ottime proprietà coibenti termiche e acustiche (fig.324). Altri pregevoli esempi di prefabbricazione e prototipazione edilizia italiana è la “Casa coloniale in nervacciao”

324. Modello sperimentale di “Casa vacanze” progettato da Ernesto A. Griffini e Eugenio Faludi.



325



326

325. Brevetto "l'Invulnerabile" della ditta F.E.R.V.E.T. di Bergamo.

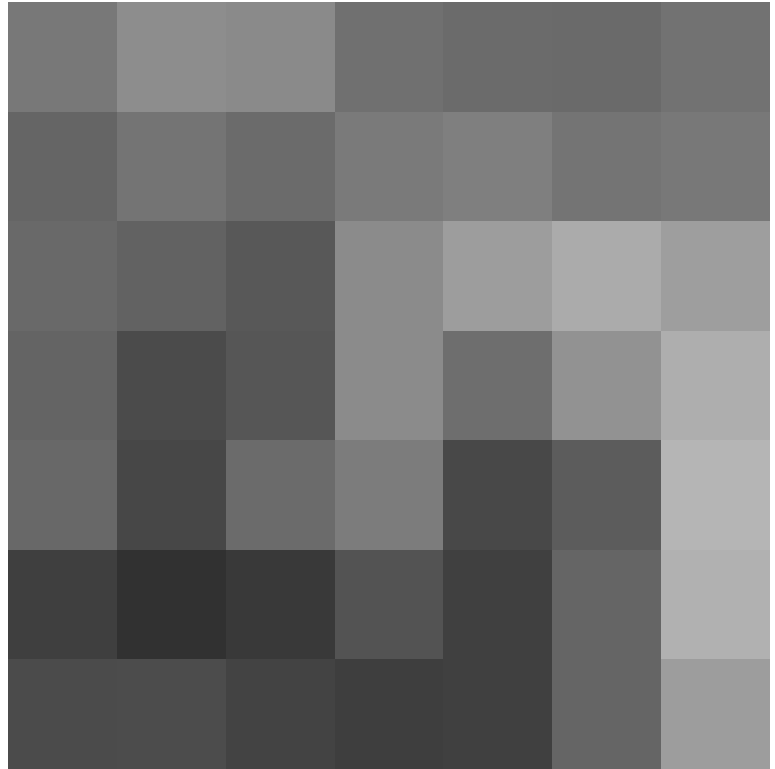
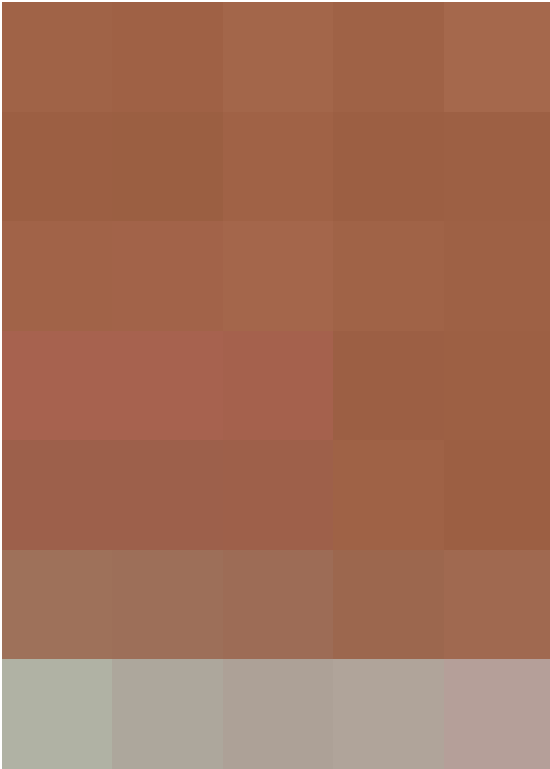
326. Case coloniali in nervacciaio progettate nel 1933 dall'architetto Luigi Piccinato.

(cavi di acciaio) progettata dall'architetto Luigi Piccinato (Legnago, 1899 – Roma, 1983) nel 1933 per far fronte al problema della residenza come nodo centrale dell'architettura coloniale (fig.325), e il brevetto "l'Invulnerabile" commercializzato dalla ditta F.E.R.V.E.T. di Bergamo che prevede la struttura portante formata da profilati speciali di acciaio laminati e trafilati a freddo di sezione tale da permettere il fissaggio delle doppie pareti composte da pannelli in agglomerato speciale ad alta coibenza termica e acustica (fig.326).

Nell'architettura coloniale viene evidenziata l'importanza di conferire alle case coloniali un carattere di solidità, indispensabile per favorire un legame duraturo con i coloni e la terra d'espansione. Nel 1937, però, Giuseppe Pagano e Giorgio Rigotti evidenziano le carenze dal punto di vista qualitativo, energetico e di benessere indoor di tali architetture, aprendo la strada

verso nuove problematiche di aspetto tecnico, funzionale ed energetico. In tale contesto si inserisce la "casa isotermitica", tra i primi esempi di sperimentazione tipicamente italiana composta architettonicamente da cellule elementari e che recepisce le avanguardie costruttive e i 'nuovi' materiali per il sistema tecnologico dell'involucro. Il progetto della casa isotermitica diventa così un campo di incontro interdisciplinare e di ibridazione dei linguaggi, un vademecum storico del "patrimonio avito" sulla capacità di gestire nuove espressioni architettoniche e nuove tecnologie.

La casa isotermitica è una sperimentazione italiana di tipizzazione e prefabbricazione attraverso lo studio di cellule standardizzate, «che può conservare nel suo interno, una temperatura continua, costante, alta in inverno, bassa in estate; che può proteggere i suoi abitanti dai rumori di fuori e da quelli creati negli altri appartamenti; è, ancora la casa



327

ideale, impenetrabile all'umidità. La sua specialissima struttura, poi, la preserva dalle vibrazioni dovute ad un eventuale forte traffico esterno. La casa isoterma è economica, molto di più degli altri tipi di costruzione»²¹⁸. Presentata nel 1934, rappresenta nel panorama italiano ed europeo una novità assoluta del sistema di prefabbricazione e apre la strada verso un nuovo modo di concepire la progettazione architettonica, più attenta non solo agli aspetti strutturali e di isolamento, ma anche agli aspetti inerenti l'energetica degli edifici, l'impiantistica e del comfort abitativo. La struttura portante è interamente realizzata con elementi metallici prefabbricati e montanti in cantiere a piè d'opera con l'utilizzo di macchine da sollevamento. Le chiusure verticali isoterme sono composte da due pareti sottili con intercapedine interna; il paramento esterno è in calcestruzzo fortemente compresso (*gunite*) armato con toncini di ferro orizzontali di otto millimetri di diametro e con barre metalliche orizzontali di cinque millimetri di diametro a formare un reticolato a grandi maglie di 20 cm di lato. Alla intersezione, le barre metalliche sono legate con filo di ferro. La maglia viene ulteriormente irrigidita ogni

metro da profilati angolari fissati alle 'cinture' dei solai. Applicata all'armatura metallica, nella parte interna, è il Graticcio Stauss, un particolare materiale composito prodotto in stuoie flessibili dalla "Società Anonima Graticcio Italiano Stauss" costituito da una maglia ortogonale di 20 mm di lato realizzata con filo di ferro (diametro 1 mm) che all'intersezione presenta delle crocette d'argilla di forma poliedrica, cotta ad alta temperatura con speciale procedimento. La flessibilità della rete ceramica Stauss è in seguito solidarizzata sulla faccia esterna con uno strato di malta cementizia e con uno strato di gunite sulla faccia interna, applicata ad alta pressione per mezzo di uno speciale compressore (fig.327). Si viene a costituire, quindi, una lastra armata monolitica di circa 5 cm di spessore, con superfici variabili a seconda delle esigenze progettuali. Per grandi superfici, invece, le pareti monolitiche sono convenientemente interrotte da giunti di dilatazione. La partizione, benché il suo spessore non superi i 5 cm, è particolarmente resistente alle azioni meccaniche, fisiche e chimiche. Il paramento interno distante 14 cm della parete esterna è realizzato con pannelli isolanti prefabbricati fissati

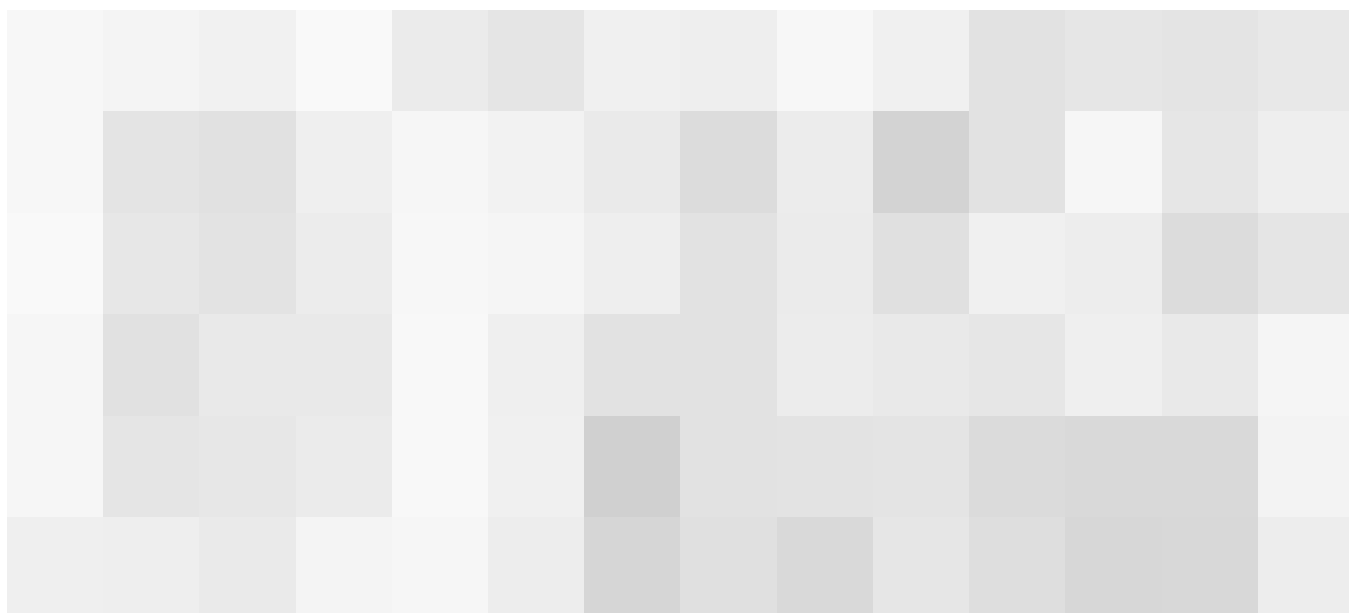
327. Realizzazione di una parete monolitica con il sistema del Graticcio Stauss, solidarizzata con malta cementizia e calcestruzzo fortemente compresso (*gunite*).

a dei profili metallici. L'intercapedine d'aria interposta tra i due paramenti, contribuisce, inoltre, all'isolamento termico; l'aria contenuta all'interno «è mantenuta immobile in inverno, ma in estate, essendo la gunita esterna buona conduttrice del calore, l'aria verrebbe a riscaldarsi. Per ovviare a tale inconveniente con un semplicissimo congegno si provoca un richiamo d'aria fresca dal sottoterraneo e la circolazione è mantenuta dalla diversa densità dell'aria»²¹⁹. I solai sono costituiti da profilati a doppio T sul quale viene appoggiata la rete ceramica in Graticcio Stauss con il compito di contenere la soletta di calcestruzzo armato di 5 cm di spessore evitando, quindi l'utilizzo in opera di casseri e centinature. Alla flangia inferiore delle putrelle sono fissati con 'cinture' di ferro, dei listelli di abete che sostengono la plafonatura (fig.328).

La casa isoterma è tra le prime sperimentazioni italiane nel campo dell'isolamento acustico, infatti, presenta il requisito di essere completamente esente da vibrazioni. Tale proprietà è ottenuta con due accorgimenti: «*le murature del sottoterraneo non sono portanti ma utilizzate esclusivamente per contenere le spinte del terreno, [...] e dalla presenza di giunti antivibranti opportunamente disposti a sezionare i piedritti ad ogni piano, che assicurano una soluzione alla*

continuità strutturale. Ogni giunto d'unione è realizzato con degli angolari e bulloni serranti tra il coprigiunto ed il montante stesso costituito da un sottile foglio d'amianto, mentre un breve distacco di due o tre millimetri è mantenuto tra l'estremità del piedritto inferiore e l'estremità bassa di quello superiore»²²⁰. In merito alla impiantistica, l'intercapedine interposta tra la doppia parete, «*consente di occultare il passaggio delle canne dell'acqua, dei pluviali, dei termosifoni, degli scarichi, etc.*»²²¹. La protezione dai fenomeni di corrosione e ossidazione della struttura in ferro è assicurata dallo strato di gunita che per la sua compattezza e resistenza fornisce anche una elevata resistenza al fuoco e alla effrazione. La ricerca della 'casa isoterma' rappresenta uno dei primi esempi di progetto architettonico sperimentale che cerca di risolvere tecnicamente ogni aspetto relativo all'abitare, inteso nell'accezione più ampia del termine. Si tratta di un progetto innovativo, fondato sull'utilizzo di componenti standardizzate e materiali moderni, ma rimane tuttavia relegato alla solidità della tradizione costruttiva piuttosto che alla logica della smontabilità, della mobilità e della trasportabilità, della versatilità, temi che irromperanno a seguito degli eventi bellici sulle successive problematiche abitative connesse alla ricostruzione.

328. Sistemi tecnologici della casa isoterma (chiusura verticale con ventilazione controllata meccanicamente; solaio in ferro e calcestruzzo con l'interposizione del Graticcio Stauss.



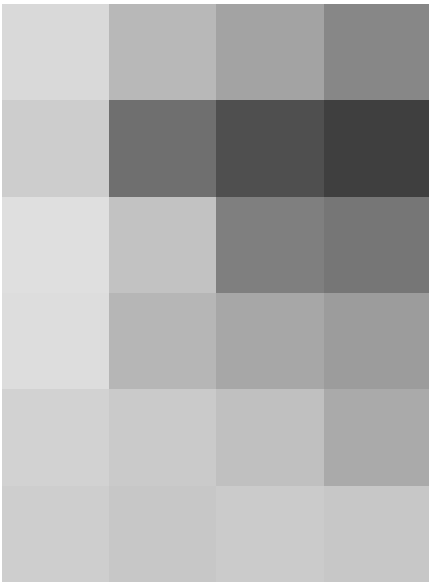
La sperimentazione della ‘casa isoterma’ si pone come riflesso e conoscenza della nostra contemporaneità avvezza alla progettazione di manufatti abitativi temporanei, del “do it yourself”, declinato in Italia nella pratica dell’autocostruzione, ovvero la capacità di partecipare in forma attiva alla realizzazione dell’insediamento temporaneo. La ‘casa isoterma’, inoltre, anticipa la crescente attenzione che si diffonde verso pratiche edilizie costruttive caratterizzate dalla sostenibilità e della modularità, che si esplicano con l’impiego di materiali facilmente reperibili, riciclati e riciclabili, tecnologie semplici ed efficaci e una impiantistica inglobata nel sistema, ma di facile accesso agli interventi di ispezione e manutenzione. Infine, la ‘casa isoterma’ è tra i primi esempi di applicazione di involucro edilizio ‘a secco’ adattivo e dinamico, perché in grado di modificare le sue prestazioni fisico-tecniche nel tempo, in relazione alle circostanze climatiche e alle esigenze dell’utenza, minimizzando le dispersioni termiche nel periodo invernale e limitando l’innalzamento della temperatura in quello estivo, con il conseguente miglioramento del comfort abitativo e della qualità ambientale, ottenuti senza l’utilizzo di fonti energetiche non rinnovabili.

Sarà solo con Jean Prouvé (Parigi, 1901 – Nancy, 1984) che le costruzioni leggere metalliche avranno un primo maestro e pioniere, una figura unica al pari dei già citati Paxton, Bogardus, Eiffel. Fabbro di formazione e specializzato nella lavorazione artistica del ferro battuto, non ha mai studiato architettura, ma grazie al suo spirito pionieristico e innovatore, venne proiettato al centro del dibattito tra gli architetti più importanti e famosi del tempo come Le Corbusier, Charlotte Perriand, Oscar Niemeyer e Frank Lloyd Wright con cui condivideva una grande fiducia nel progresso e nelle conquiste scientifiche e industriali del suo tempo: «*Che splendore i missili, l’aeroplano, l’automobile, la nostra bicicletta, la nostra motocicletta, i treni, le macchine, le dighe, i ponti, i nostri pic-*

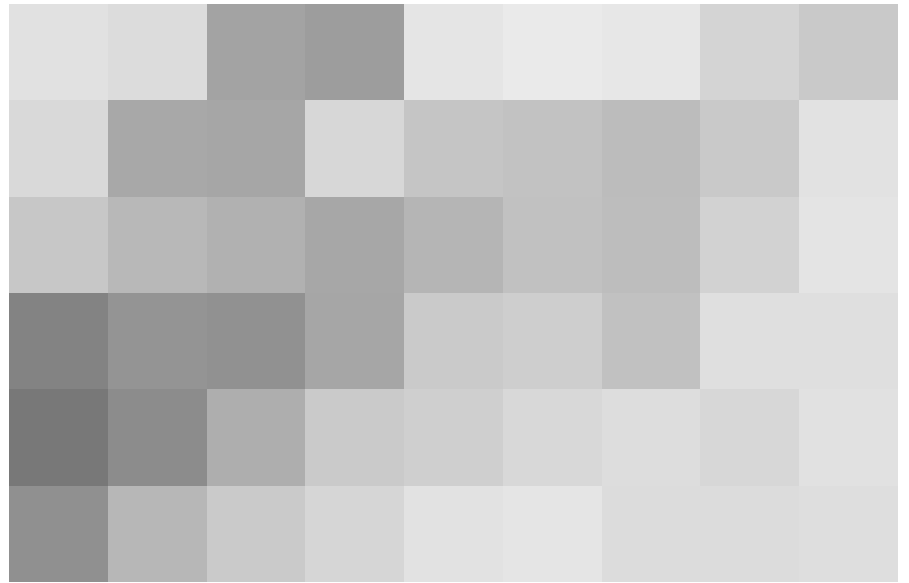
*coli battelli a vela e tutto il resto. Non devo aggiungere altro. I prodotti della scienza e dell’industria sono a dir poco entusiasmanti. Non c’è bisogno di parlarne. Parlano da soli»*²²². I principi costruttivi equiparati ai mezzi di trasporto contraddistinguono il lavoro di Prouvé che durante tutta la sua vita ha elaborato numerosi sistemi costruttivi replicabili come processi aperti ed in costante modificazione: «*gli oggetti altamente industrializzati, sia che viaggino, volino o stiano fermi, sono in uno stato di perpetuo sviluppo che ne migliora costantemente la qualità e persino i loro prezzi risultano sempre più bassi»*²²³. Nel 1931 ottenne il brevetto per un sistema di pareti di separazione a elementi di lamiera di acciaio che gli permise di elaborare un vero e proprio abaco delle strutture, costantemente aggiornato e perfezionato, che comprendeva:

- «*portique*», struttura a portico;
- «*noyau central*», nucleo portante;
- «*coque*», struttura a guscio;
- «*béquille*», struttura a stampella;
- «*voûte*», struttura a volta;
- strutture reticolari²²⁴.

Tali sistemi gli permisero di progettare il suo primo edificio con struttura leggera in acciaio, in collaborazione con gli architetti Eugène Beaudouin e Marcel Lods: il circolo di volo Roland Garros presso l’aeroporto di Buc (1935) (figg.329-330). In questa opera la struttura portante è interamente in lamiera piegata e gli elementi sono collegati attraverso bulloni. La struttura prefabbricata è rivestita in vetro o in pannelli con interposto lo strato isolante (fig.331). Prefabbricati sono anche i blocchi sanitari con un procedimento simile a quello adottato negli ambienti aeronavali e nel progetto della *Dymaxion House* di Richard Buckminster Fuller (Milton, 1895 – Los Angeles, 1983), in cui è possibile tracciare diverse similitudini (fig.332). La facciata metallica del primo progetto, però, presentava problemi di dilatazione termica che vennero risolti tra il 1935 ed il 1939 nel progetto della *Maison du Peuple* a Cli-



329



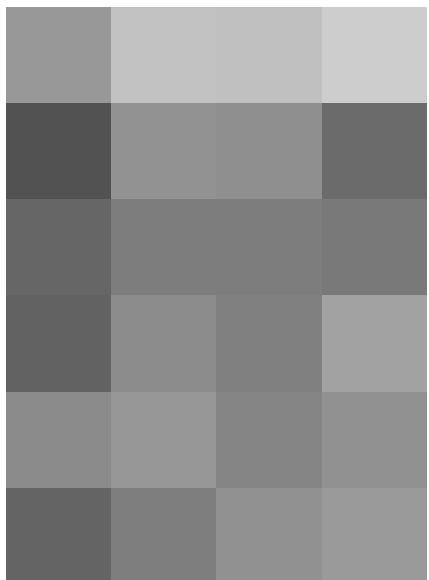
330

329. Vista esterna del circolo di volo Roland Garros presso l'aeroporto di Buc, progettato nel 1935 da Jean Prouvé, © Jean Prouvé, VEGAB, Barcelona, 2021.

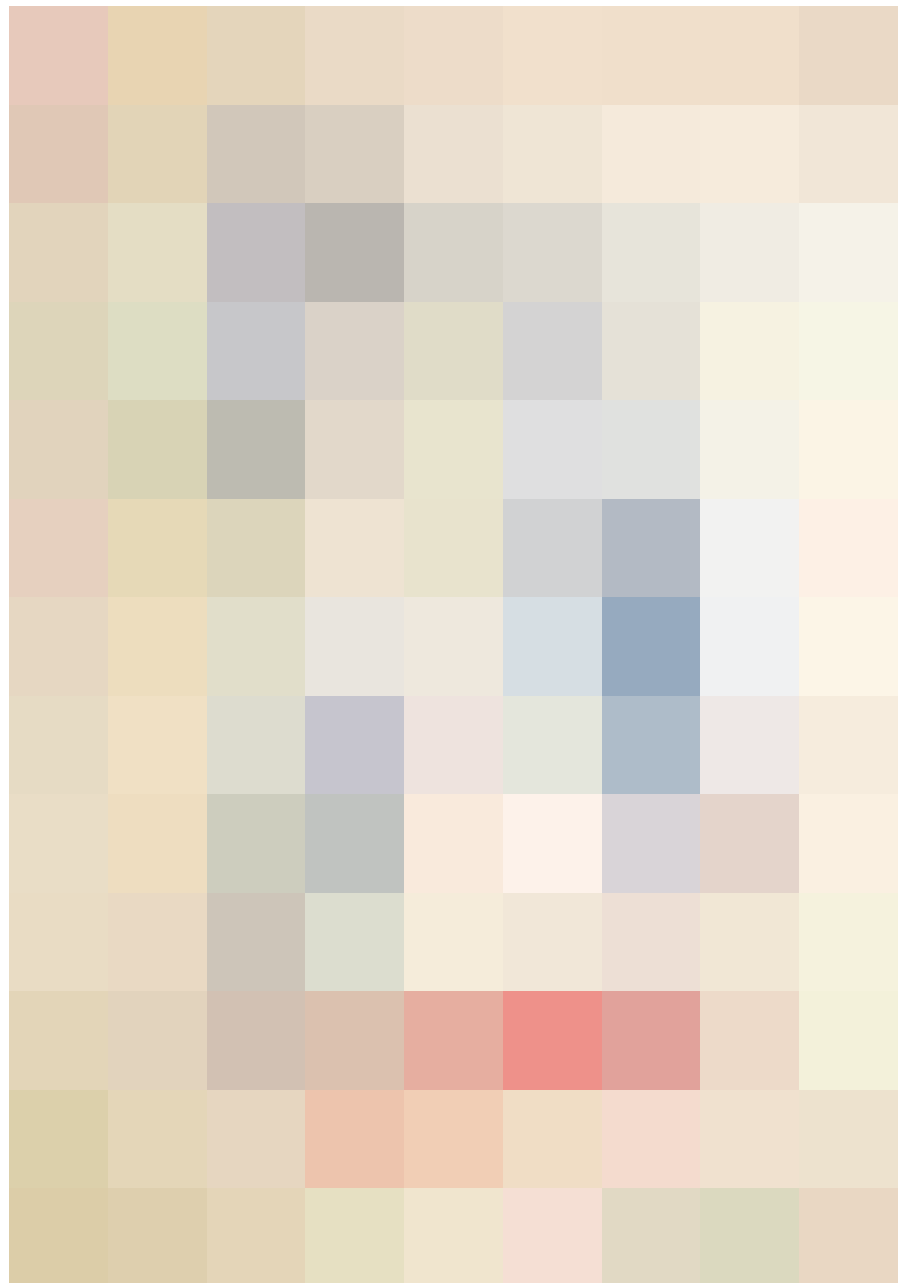
330. *Ibidem*.

331. Dettaglio della facciata metallica isolata, © Fonds des ateliers SCE Jean Prouvé, 1952.

332. Buckminster Fuller, The Dymaxion House, © The Estate of Richard Buckminster Fuller, 1927.



332

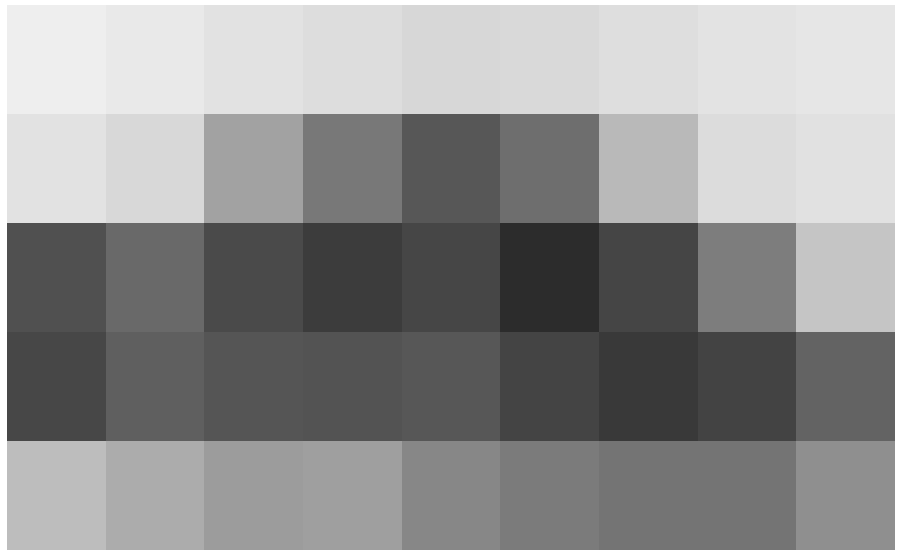


331

chy (fig.333). L'innovazione del suo sistema costruttivo, con telaio in acciaio e facciata continua in pannelli prefabbricati in lamiera, si unisce alla versatilità di un edificio polifunzionale (mercato, teatro, eventi) in cui copertura, pareti e solai sono pensati come componenti mobili in grado di adattarsi ad ogni situazione, grazie ad un sofisticato sistema di martinetti, carrucole e carroponti mobili²²⁵. Il montaggio e l'assemblaggio degli elementi metallici, completamente realizzati in fabbrica, viene effettuato mediante saldatura elettrica per assemblaggi non amovibili (come per il telaio e per i solai fissi) e mediante fissaggio o aggancio per elementi amovibili o mobili (come per gli elementi di facciata o delle partizioni interne) (figg.334-336).

I processi tecnici di prefabbricazione attuati all'interno della Maison du Peuple diventano elementi che definiscono il valore estetico dell'insieme. L'utilizzo di nuove tecniche permette di dedicare una particolare attenzione alla luce e conferisce all'intera costruzione una certa leggerezza. Il principio di efficienza della costruzione che Jean Prouvé ha voluto attuare nel corso della sua carriera ha generato un'estetica della costruzione che gli è propria, riducendo alla sua stessa essenza il percorso tra l'obiettivo iniziale e la forma costruita. La leggerezza resa possibile da questa economia di materia si accoppia, per certi elementi, a un effetto di movimento, di scorrimento, che può arrivare fino alla scomparsa in un vero edificio che è diventato una macchina. Questo effetto di leggerezza si accompagna all'onnipresenza della luce che inonda l'edificio, secondo l'intenzione iniziale dei progettisti: «in qualsiasi stagione si possa ottenere illuminazione e ventilazione. In estate avremo un mercato ben ventilato e limpido come l'attuale mercato all'aperto. In inverno avremo un mercato limpido e perfettamente riparato»²²⁶.

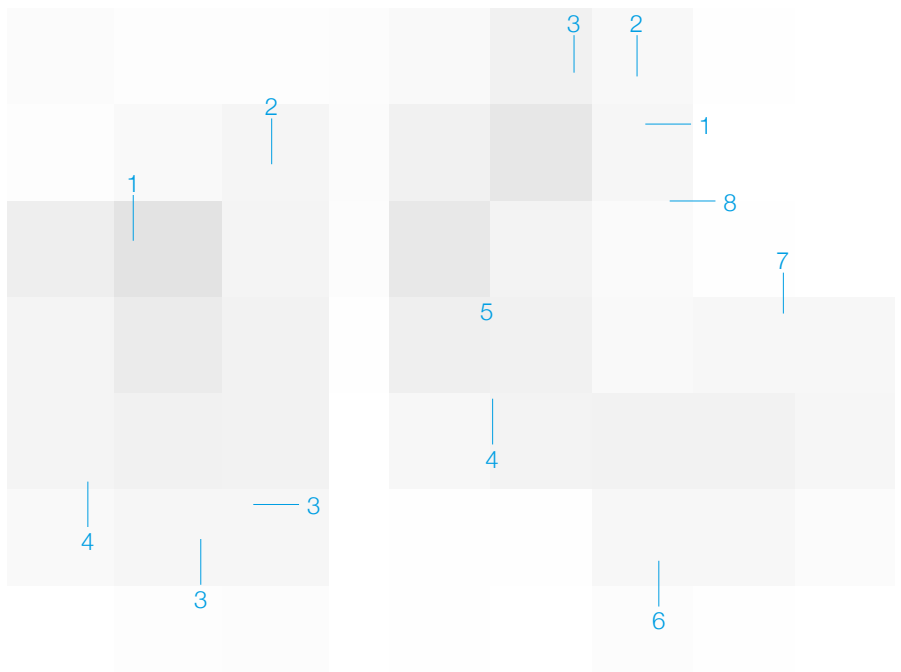
La luce naturale penetra così in maniera diffusa durante tutta la giornata. L'illuminazione costante è resa possibile grazie alle ampie finestra-



333

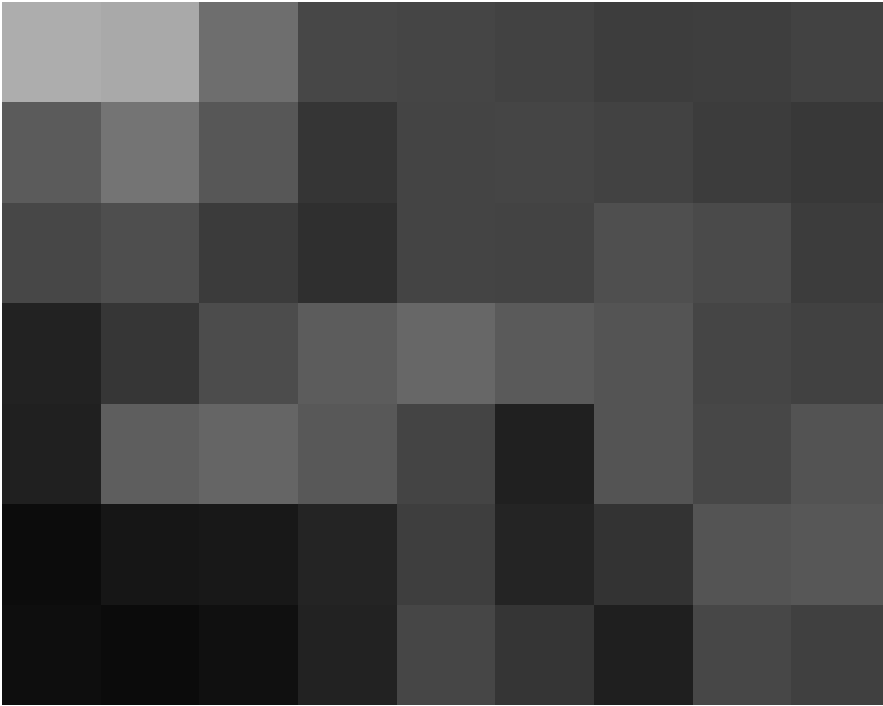


334



335

336



ture sulle quattro facciate e dalla copertura vetrata (fig.337). Il tetto è, infatti considerato una componente a sé stante, un elemento mobile inseparabile dal sistema complessivo della Maison du Peuple. Il sottotetto è composto da due elementi bifacciali completamente vetrati che trasla orizzontalmente su rotaie il cui movimento è assicurato da un sistema di motori elettrici. Il controsoffitto della copertura mobile è traslucido, grazie all'utilizzo di lamiera ondulate della tipologia Rhodoïd, una plastica trasparente e non combustibile di acetato di cellulosa, creato da Rhône-Poulenc intorno al 1917²²⁷ (fig.338).

337

333. Nella pagina precedente: Eugène Beaudouin, Marcel Lods, Vladimir Bodiansky e Jean Prouvé, Maison du peuple, Clichy-la-Garenne, 1935-1940, in Encyclopédie de l'architecture: Constructions modernes, 1939.

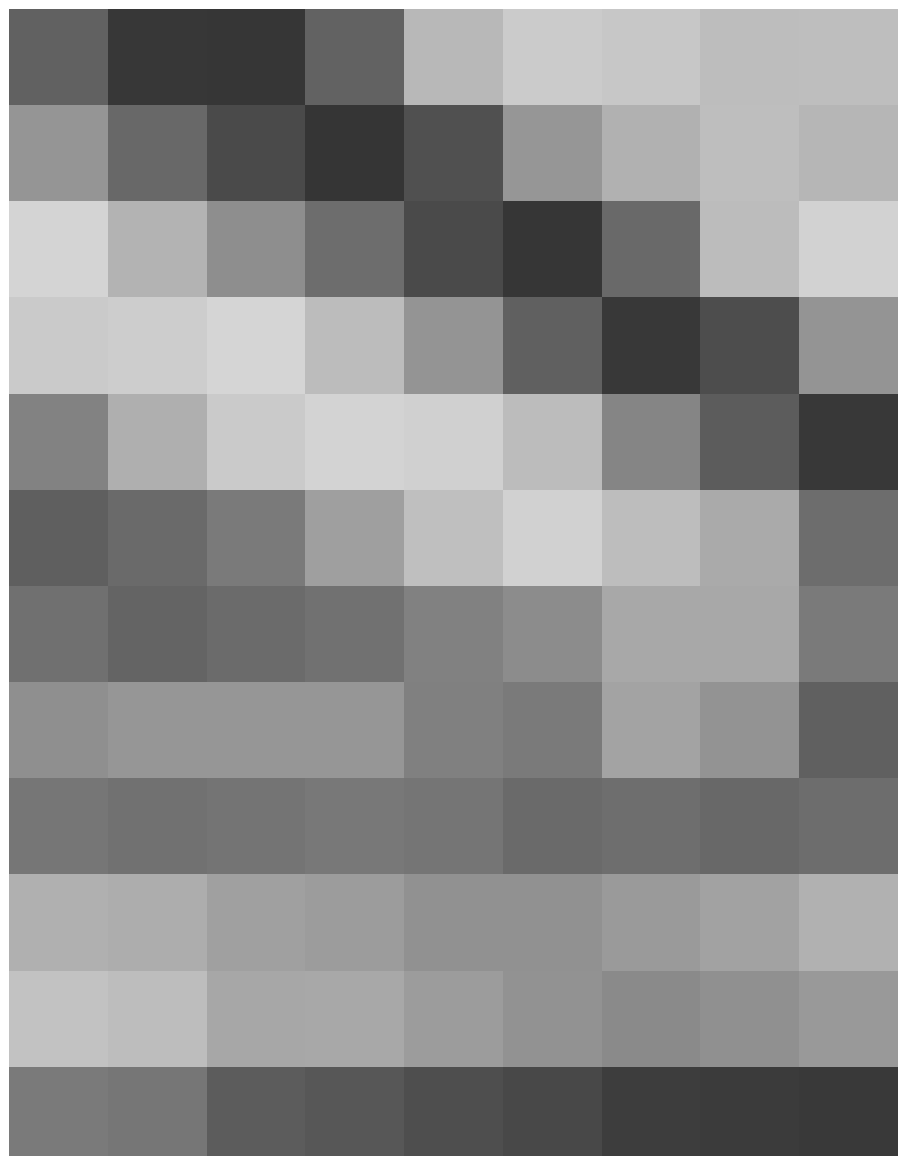
334. Nella pagina precedente: vista assonometrica della struttura metallica della Maison du peuple, Antonio Corte Real e Brito Correia, Alan Pütz, Erich Schäli, ETH Zürich.

335. Nella pagina precedente: dettaglio del sistema facciata in lamiera di acciaio e vetro. Legenda: 1 telaio in angolari di acciaio, 2 foglio di lamiera piegata, 3 vetro esterno, 4 lamiera ondulate in plastica di acetato di cellulosa della tipologia Rhodoïd, 5 staffa in lamiera sigillata.

336. Nella pagina precedente: dettaglio della facciata continua. Legenda: 1 pannello di facciata in lamiera piegata e irrigidita da interspazi verticali per l'integrazione dei montanti autoportanti e per favorire le dilatazioni termiche, 2 pannello termoacustico (5mm), 3 sigillatura con nastro di plastica, 4 profilo ad "L" in acciaio, 5 ancoraggio a "U" rovesciata, 6 trave principale a doppia "T", 7 pavimento in linoleum, 8 coprigiunto.

337. Facciata della Maison du peuple.

338. Vista della copertura della sala spettacoli realizzata in acciaio, vetro e lamiera ondulate in plastica di acetato di cellulosa della tipologia Rhodoïd, © Atlas of places.



338

La serie di Maisons à portiques che consta di numerose varianti in relazione alle dimensioni (démontable 6x6, démontable 8x8 (fig.339), démontable 8x12, etc.) e al sistema strutturale "a portico", quali la Maisons à portiques axiaux (1939) e la Maisons à portiques esquisse (1951), sono frutto dell'ampia ricerca di Prouvé sulla prefabbricazione e industrializzazione di alloggi individuali per le persone più svantaggiate tanto che dopo la Seconda Guerra Mondiale, il *Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme* ne ordinò innumerevoli pezzi per la costruzione di nuove abitazioni. Il principio innovativo di queste sperimentazioni risiede nell'elemento strutturale longitudinale in acciaio con sostegni a "V" o "U" rovesciati posto al centro del modulo abitativo liberando l'involucro da ogni funzione strutturale. Le pareti, infatti, realizzate in pannelli di legno o lamiera modulari e intervallati da una serie di aperture, consentono una composizione libera a seconda delle necessità e delle funzioni (fig.340). Evoluzione delle maisons à portiques sono i tre prototipi della Maisons

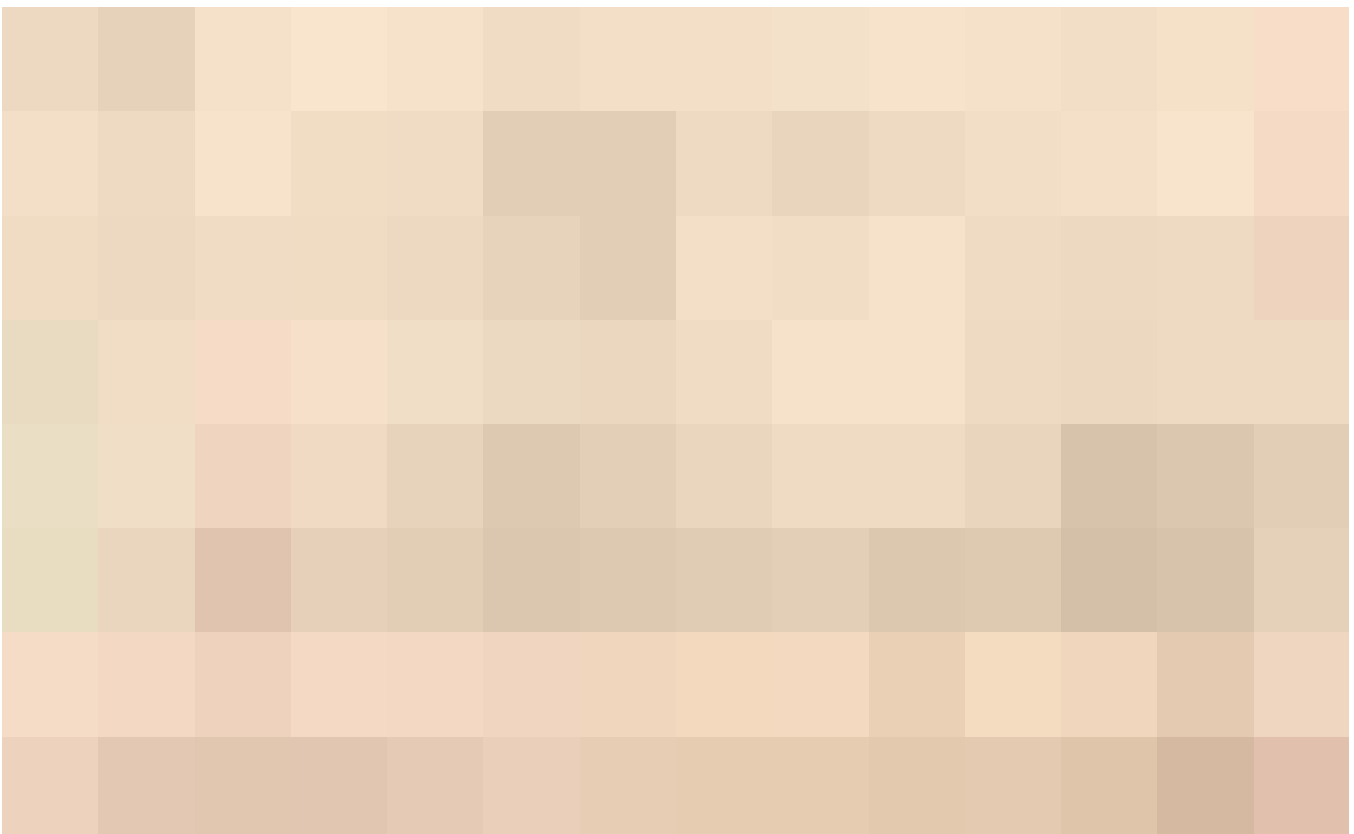


340

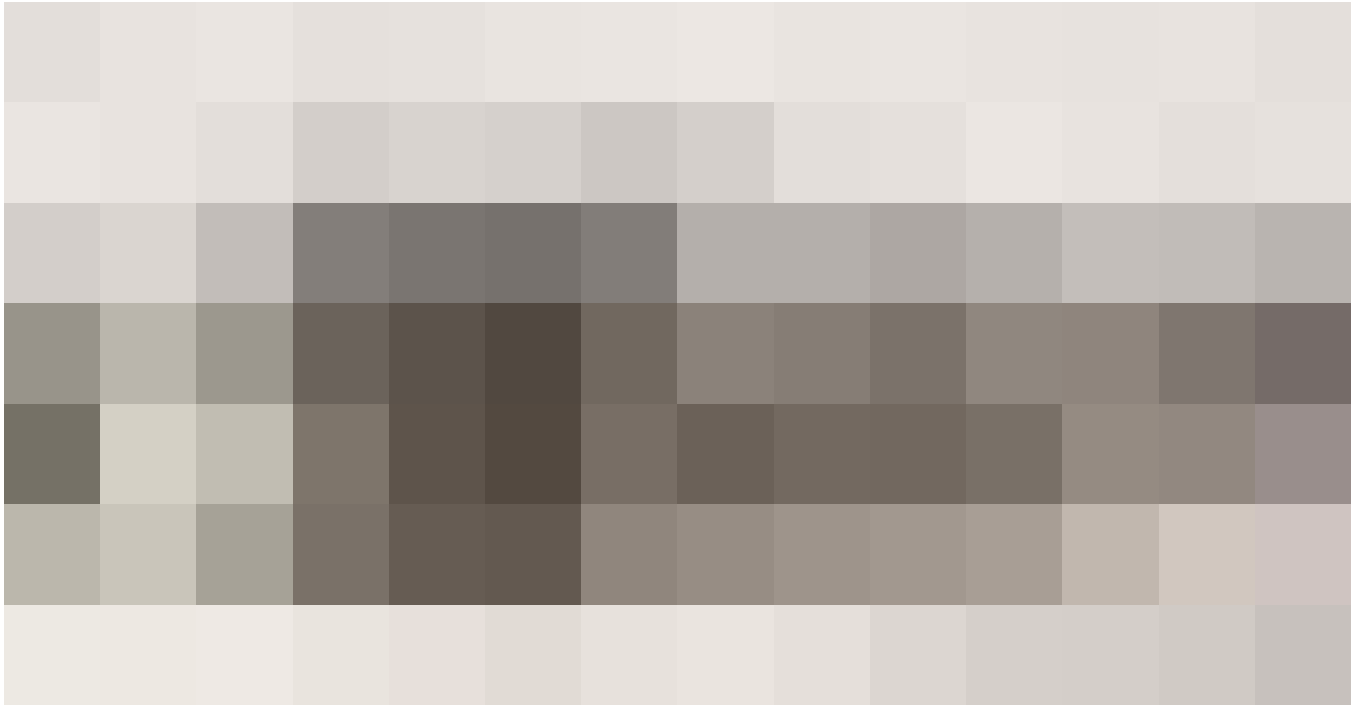
Tropicales, di cui una effettivamente realizzata negli anni '50 A Niamey (Niger) ed a Brazzaville nella Repubblica del Congo (figg.341-343), sviluppo ideativo di Jean Prouvé ed Henri Prouvé per affrontare la carenza di abitazioni nelle colonie francesi dell'Africa centro-occidentale. Prouvé rifacendosi all'architettura

339. Ateliers Jean Prouvé, Maison démontable 8x8, Planche 8868, 1941.

340. Modalità operative di montaggio per la costruzione delle Maisons à portiques, in brochure pubblicitaria dell'Ateliers Jean Prouvé Studal, Parigi, 1950.



339

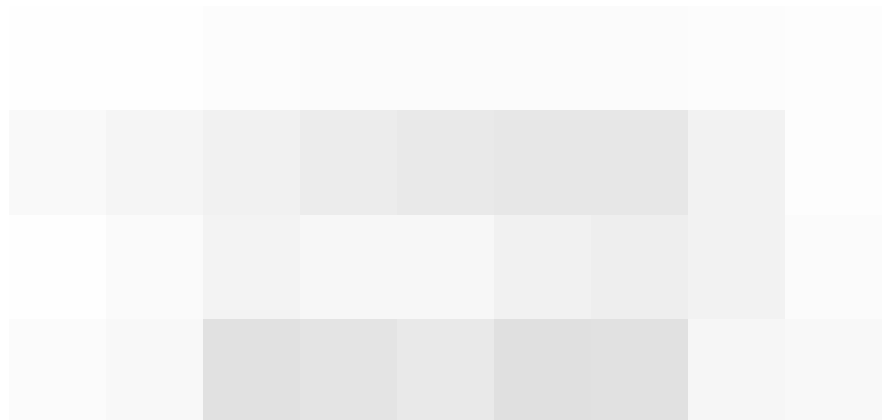


341

341. La Maison Tropicale progettata da Jean Prouvè e costruita nel 1949 a Niamey in Niger e particolare del «*sun-shutter*», frangisole in pannelli di alluminio.

342. Sezione del Tipo A della Maison Tropicale.

343. Le Maisons Tropicales progettate da Jean Prouvè e costruite nel 1951 a Brazzaville nella Repubblica del Congo.



342



343



344

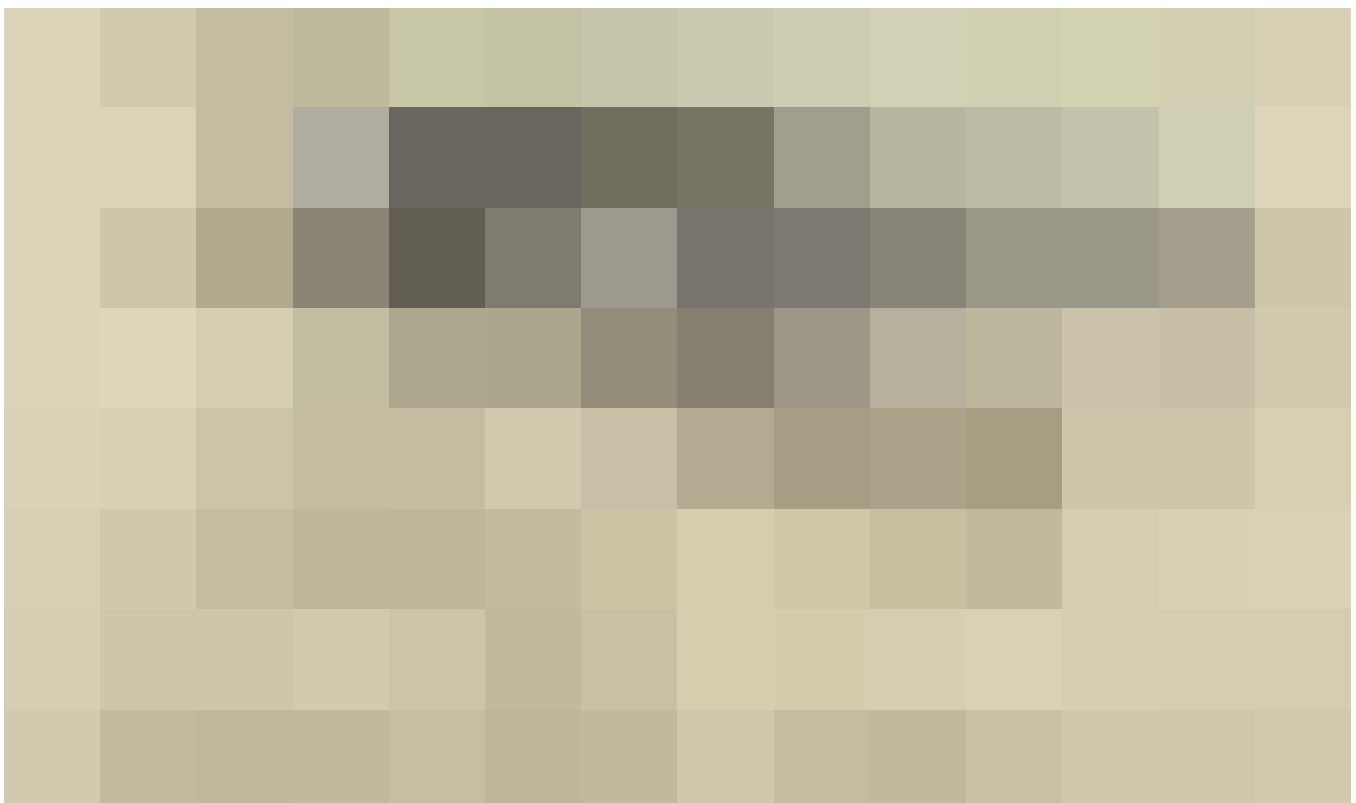
locale, propose un'innovativa soluzione utilizzata dai costruttori nativi per affrontare le difficili condizioni climatiche: sopraelevò la struttura su una palafitta in calcestruzzo armato per favorire la ventilazione e isolare la casa dal terreno e dall'umidità e progettò per il portico uno schermo in pannelli di alluminio orientabili («*sun-shutter*») in grado di riflettere i

raggi solari. I fori dei pannelli interni («*porthole panel*»), invece, erano in grado di filtrare ed abbassare il gradiente termico dell'aria mediante l'*effetto venturi*²²⁸ (fig.344-346). L'involucro esterno insieme alla copertura e all'involucro interno genera una camera d'aria ventilata (*effetto camino*²²⁹) collegata ad uno sfiato posto al colmo di copertura (fig.345).

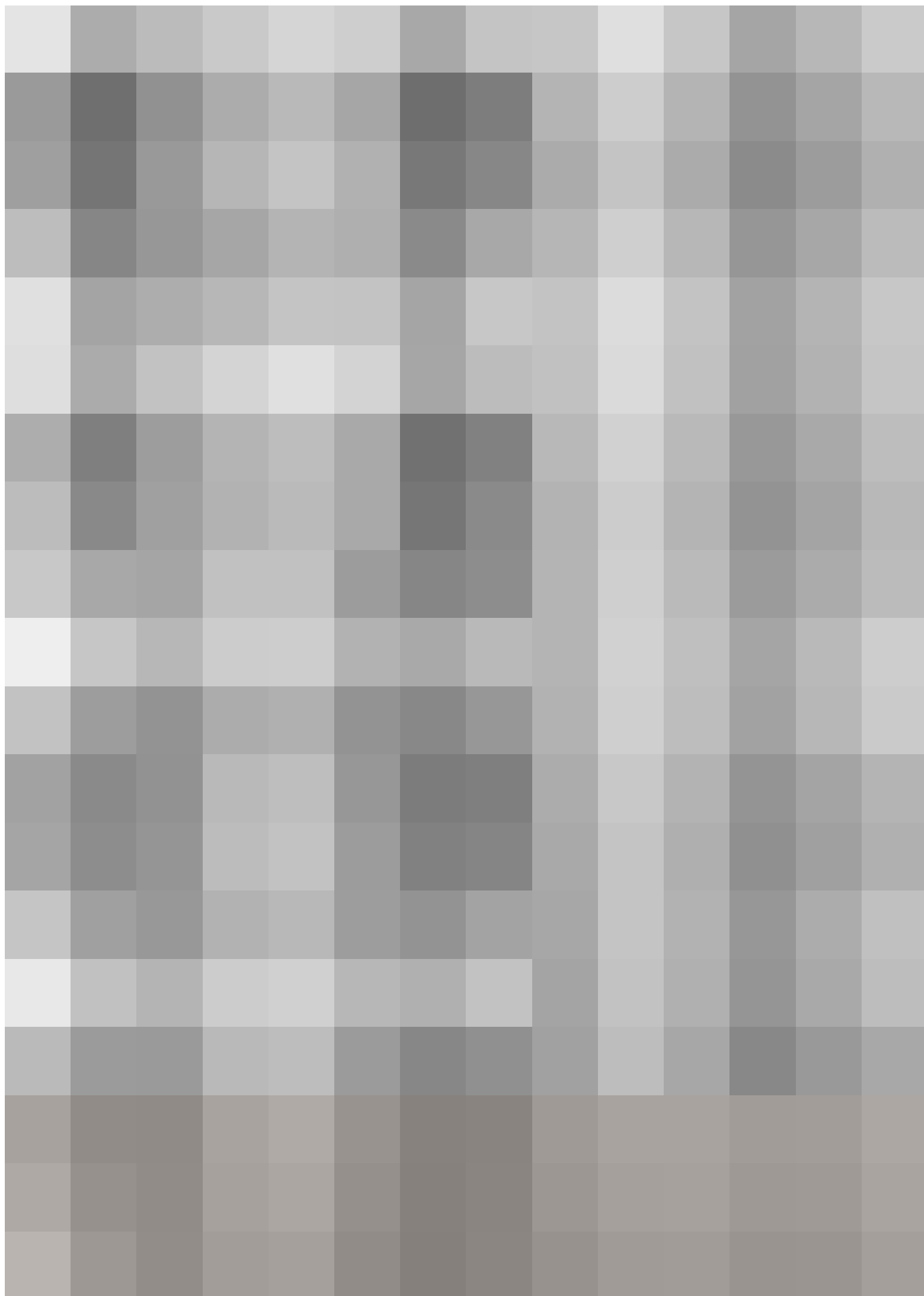
344. Ateliers Jean Prouvé, prototipo di Maison Tropicale realizzata al Musée des Beaux-Arts di Nancy, 2012.

345. Dettaglio della copertura ventilata (*toiture aeree*) della Maison Tropicale, planche 11954, © Fonds des ateliers SCE Jean Prouvé, 1952.

346. Nella pagina successiva: Jean Prouvé, «*porthole panel*», Galerie Patrick Seguin, 1951.



345



Il pannello a oblò, tra i motivi di facciata più iconici di Jean Prouvé progettati per le Maisons Tropicales, trovano un interessante punto di contatto con il fenomeno di riuso di un materiale bellico desunto dalla Seconda Guerra Mondiale, avvenuto dieci anni prima la prototipazione del sistema. Si tratta delle cosiddette *Pierced Steel Planks* (PSP) o *Marston Mats* conosciute in italiano come “*grelle metalliche perforate*” neologismo derivato della lingua inglese grill o, molto più probabilmente, dal cognome dell’inventore Greulich (Gerald G. Greulich) che collaborò con la Carnegie-Illinois Steel Corporation nello sviluppo e produzione del prototipo. Esse sono elementi modulari costituiti da lamiere di acciaio rettangolari preformate a macchina mediante pressatura e successivamente forate, impiegate durante la Seconda Guerra Mondiale per la realizzazione delle piste di decollo e atterraggio degli aeroporti militari americani dislocati nei territori nemici, in modo particolare nel Meridione Italiano, in prossimità della *Gotenstellung*. L’aspetto più interessante è il riuso delle grelle da parte della popolazione locale con la fine dello stato di belligeranza. Esse, infatti, vennero “bonificate” dalla popolazione rurale e riutilizzate principalmente come recinzioni, porte,



348

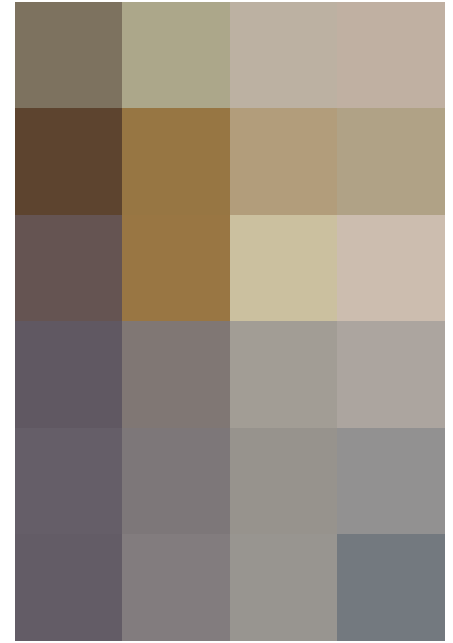
cancelli e addirittura come elementi strutturali (Cine-teatro “Leonardo Centrone” a Gravina in Puglia). A Venosa, in Basilicata, è possibile ravvisare la presenza di cancelli (recinzioni o porte) che compaiono congiuntamente al ricco patrimonio del passato romano e medievale della città, ed in modo particolare per la chiusura delle cantine per la vinificazione dei vini, in cui i fori garantivano sia la ventilazione all’interno, sia il processo di fumigazione dei gas derivanti dal processo di vinificazione²³⁰ (figg.347-348).

347. Immagini fotografiche dei cancelli delle cantine di Venosa (Basilicata) realizzati con il recupero delle Pierced Steel Planks, residuo bellico utilizzato durante la Seconda Guerra Mondiale per la realizzazione delle piste di decollo e atterraggio degli aeroporti militari americani dislocati nei territori nemici.

348. Immagini del sistema capriata realizzato con le Pierced Steel Planks.



347



349

349. Charles and Ray Eames, *The Eames House*, 1949, © Modern Homes.

350. Sistema modulare in acciaio 'a secco' MAXI (a sinistra) e MINI (a destra) per la costruzione di architetture efficienti e convertibili, © Buchli USM.

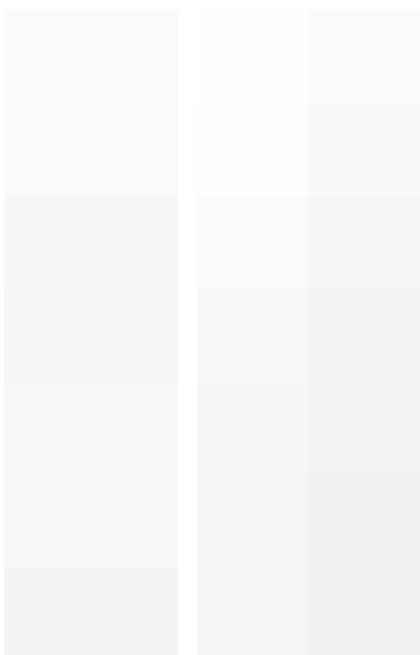
351. Struttura portante MAXI in costruzione, © Buchli USM.

352. Residenza privata Hafter realizzata con il sistema di costruzione modulare in acciaio MINI, © Buchli USM.

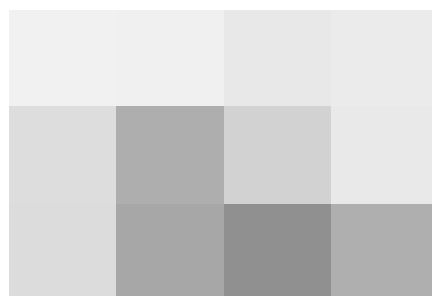
L'attività pionieristica di Jean Prouvé e il tema di riuso sviluppatosi con la fine della seconda guerra mondiale offrono agli architetti la possibilità di adattare prodotti e tecnologie sviluppati per la guerra alla prefabbricazione per scopi pacifici. I nuovi materiali sono la plastica, i leganti, i collanti e le resine sintetiche. I designers e compagni Charles Ormond Eames (1907-1978) e Bernice Alexandra Ray Kaiser Eames svolgono un analogo ruolo pionieristico a quello introdotto da Prouvé. Il progetto n.8 definito Eames House - insieme al n.9 di Eero Saarinen - relativi all'assegnazione delle *Case Study Houses Project* di Los Angeles ven-

gono pubblicati alla fine del 1945. Il progetto degli Eames rielabora in modo radicale la casa con struttura prefabbricata in semilavorati e giunti in acciaio secondo il nascente concetto del *design thinking* (fig.349).

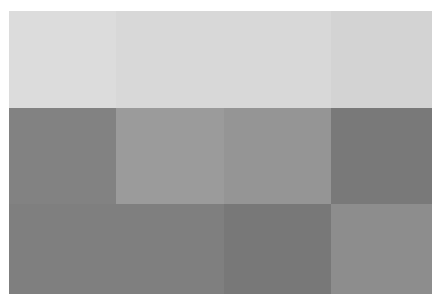
Come controparte alla progettazione estetica della coppia americana è l'architetto svizzero Fritz Haller (Soletta, 1924 - Berna, 2012) che sviluppa edifici modulari e convertibili partendo da elementi di fabbrica progettati in maniera funzionale. Numerosi progetti, infatti, vengono realizzati con i suoi sistemi di costruzione modulare 'a secco' in acciaio per architetture efficienti e convertibili, come il "MIDI", il "MAXI" ed il "MINI". Il MIDI è particolarmente indicato per complessi multipiano, in cui le disposizioni geometriche dei sistemi di tubazioni di impianti tecnici facevano parte della disposizione generale. Il MAXI è un sistema modulare costituito da una struttura portante in puntelli e travi reticolari di acciaio utilizzato per la costruzione di edifici monopiano con ampie campate. La facciata libera è svincolata da ogni aspetto strutturale e le finestre sono intercambiabili e adattate a qualsiasi esigenza della committenza. Il MINI, infine, si basa sulla stessa struttura dei due sistemi precedenti ma declinata per la realizzazione di complessi residenziali che richiedono tempi di costruzione brevi (figg.350-352).



350



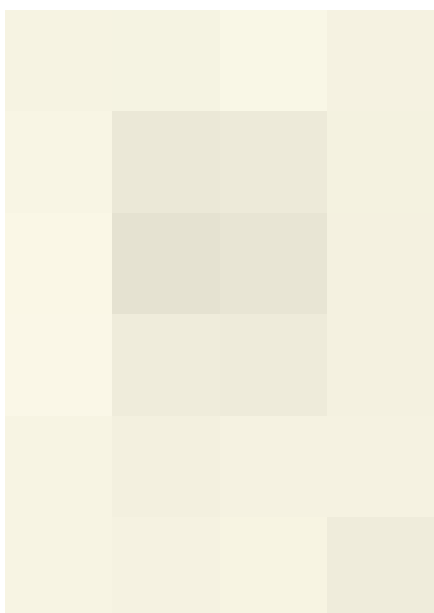
351



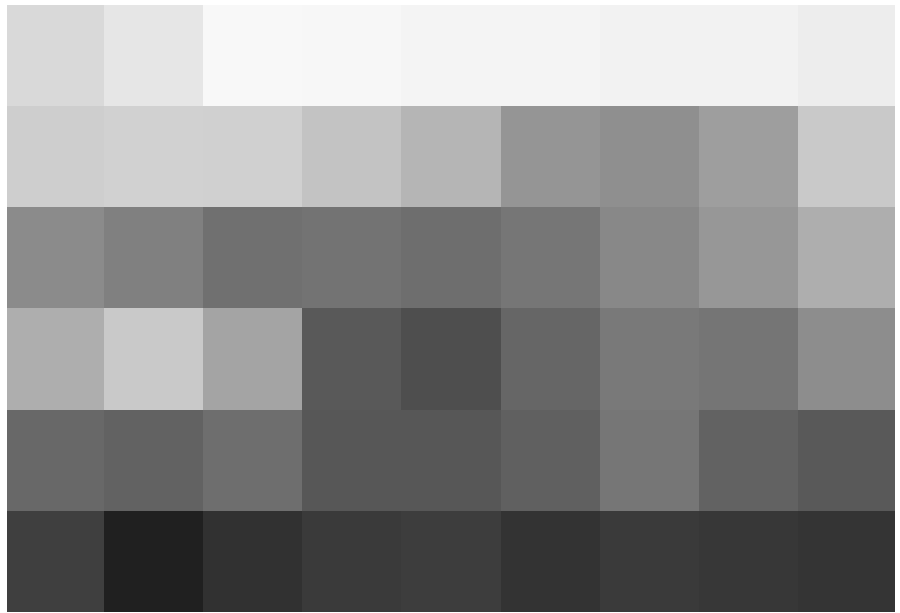
352

L'esempio architettonico più interessante progettato con i sistemi strutturali ideati da Fritz Haller è Casa Schärer a Münsingen (1968). La casa è costruita su una griglia di puntelli in acciaio che si basa su un ritmo di 2:5:2:5:2. Al piano terra, l'asse centrale accoglie l'ala d'ingresso con la scala a chiocciola in metallo che conduce al piano superiore, rialzato e supportato da pilastri; al piano seminterrato si trovano un ufficio e una camera per gli ospiti. Al piano superiore, all'impianto centrale che funge anche da snodo di accesso si affaccia la cucina e a nord-est tre camere da letto con bagno e doccia. A Sud-ovest, il soggiorno/pranzo open space con un balcone si estende a valle per tutta la larghezza dell'edificio; l'asse esterno forma un balcone anche sul retro (figg.353-354).

Con Casa Schärer, la sfida architettonica consisteva nel dover rispondere in termini di spazio e strutturalmente alle irregolarità del paesaggio e al «terreno molto complicato», come scriveva Fritz Haller nel 1978. Haller ha risolto abilmente questo compito rialzando su puntelli il piano superiore. A dare l'impressione di trasparenza e leggerezza non contribuisce solo la stessa enorme convertibilità del sistema di costruzione, ma anche la libertà di interpretazione nell'approccio architettonico (figg.355-357).



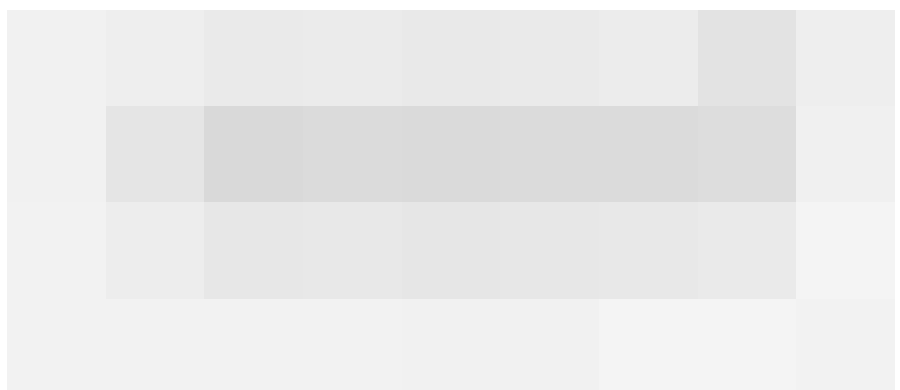
353



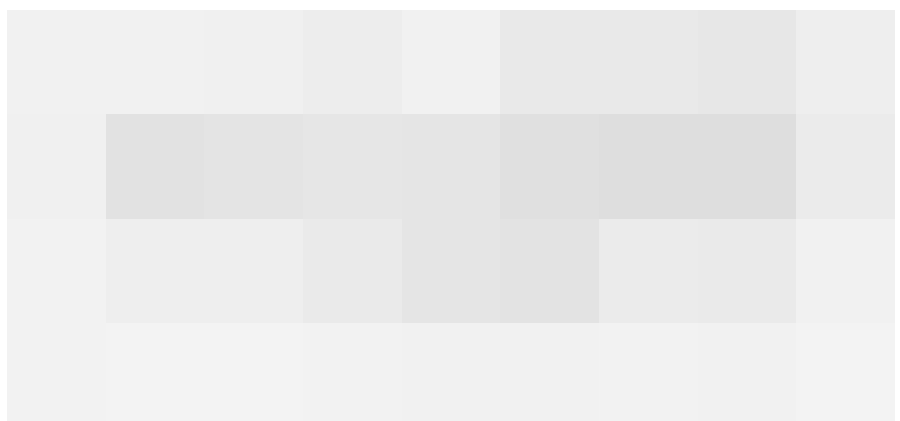
354



355



356

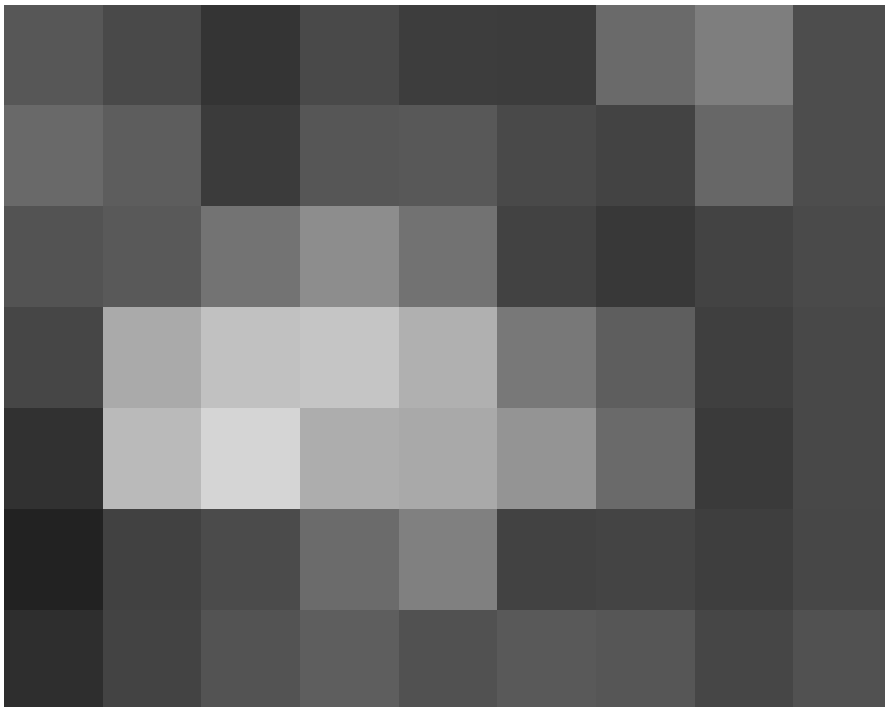


357

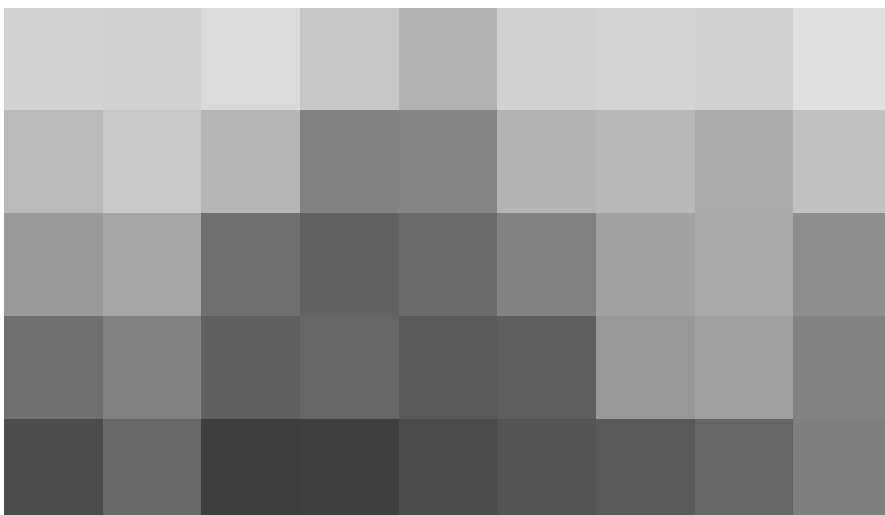
353. Nella pagina precedente: pianta originale del 1968 di Casa Schärer a Münsingen, progettata da Fritz Haller, © Buchli USM.
354. Nella pagina precedente: struttura prefabbricata in acciaio con sistema MINI, © Buchli USM.
355. Nella pagina precedente: fasi di costruzione del sistema MINI: realizzazione della struttura.
356. Nella pagina precedente: fasi di costruzione del sistema MINI: distribuzione.
357. Nella pagina precedente: fasi di costruzione del sistema MINI: finiture.
358. Richard Buckminster Fuller, Dymaxion House, 1927, © Buckminster Fuller Institute.
359. Richard Buckminster Fuller, Wichita House, Kansas, 1946, © Buckminster Fuller Institute.

Con Jean Prouvé, anche Richard Buckminster Fuller (Milton, 1895 – Los Angeles, 1983) non era architetto avendo lasciato l'Università di Harvard, ma viene ricordato per aver portato mutevoli innovazioni nell'architettura, in un periodo - quello della Ricostruzione - caratterizzato dall'emergenza di fornire celermente nuove abitazioni. Nel 1927 sperimenta il concetto di *Dymaxion*, un *portmanteau* formato dalla fusione di *Dynamic*, *Maximum* e *Tension* come processo di avanzamento tecnologico per portare l'edilizia al passo con l'industria e la tecnologia. Dopo un primo esperimento di casa trasportabile con un dirigibile, la *Dymaxion House* (1927) (fig.358) e la Wichita

House (1946) (fig.359) aprono un'era di sperimentazioni e visioni nell'abitare, dei prototipi costituiti da una calotta sferica in laminato metallico e struttura in alluminio con gli impianti tutti concentrati nel nucleo centrale della casa, da dove vengono distribuiti vari tipi di utenze domestiche. Il progetto di Fuller, quindi, proponeva un nuovo sistema abitativo, nello stesso anno in cui a Stoccarda - all'Esposizione del Weissenhof - i più grandi maestri europei presentavano le proprie soluzioni di abitare moderno. Lo spazio abitabile era diviso in maniera flessibile dal pavimento al soffitto che - con un speciale sistema di scaffali rotanti - avevano il duplice compito di funzionare da armadiatura e come supporto per attrezzature. L'utopico progetto era concepito come il prototipo dell'industria dell'abitazione a scala mondiale, paragonabile per dimensione, alle industrie automobilistiche, navali ed aeronautiche²³¹. Fuller ha descritto la *Dymaxion Dwelling Machine* come «un atteggiamento e un principio interpretativo» che mobiliterebbe e integrerebbe la società. Era un ardente sostenitore del «fare di più con meno» (non a caso è il primo a introdurre il cartone come materiale da costruzione in architettura) e la sua ambizione era quella di mantenere relazioni eque e sostenibili in ogni contesto e disciplina. Nel 1947 il focus della ricerca di Fuller diventa la cupola geodetica costituita da un involucro tetraedrico e piramidale in grado di garantire alti valori di resistenza in qualsiasi materiale esse vengono realizzate (plastica, metalli, cartone, etc.). La premiazione alla Triennale di Milano del 1954 precedono la registrazione definitiva del brevetto, che renderà Fuller una figura preminente nella cultura architettonica e di massa. La più famosa cupola geodetica rimarrà quella per il padiglione degli Stati Uniti all'esposizione di Montréal del 1967, simbolo di un'epoca e di un immaginario di spazio cui si connettono le ricerche di molte architetture radicali di quegli anni, come quelle degli Archigram, di Cedric Price e dell'architettura Hi-tech (figg.360-362).



358



359



360

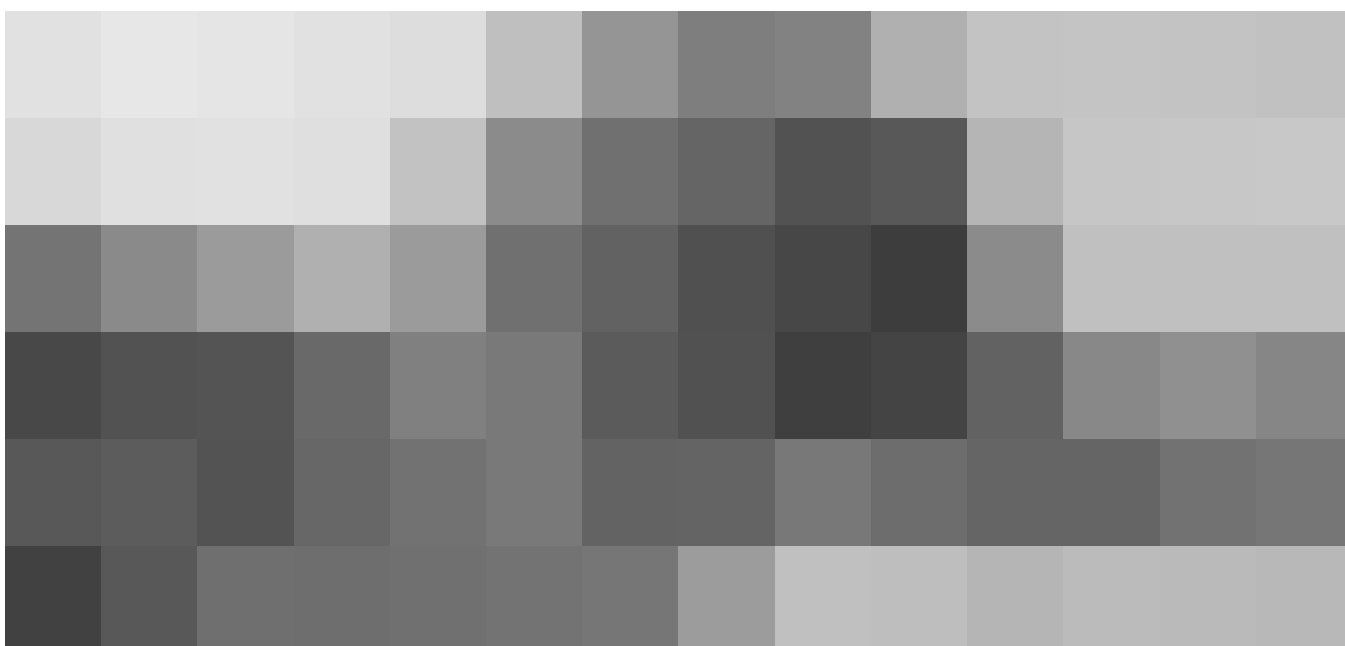


361

360. Sezione della cupola geodetica per il padiglione dell'Esposizione di Montreal del 1967, in Lewis P., Tsurumaki M., Lewis D.J., *Manual of section*, Princeton Architectural, 2016, pag.139.

361. Dettaglio della cupola geodetica.

362. Richard Buckminster Fuller, cupola geodetica per il padiglione dell'Esposizione di Montreal del 1967, © Buckminster Fuller Institute.

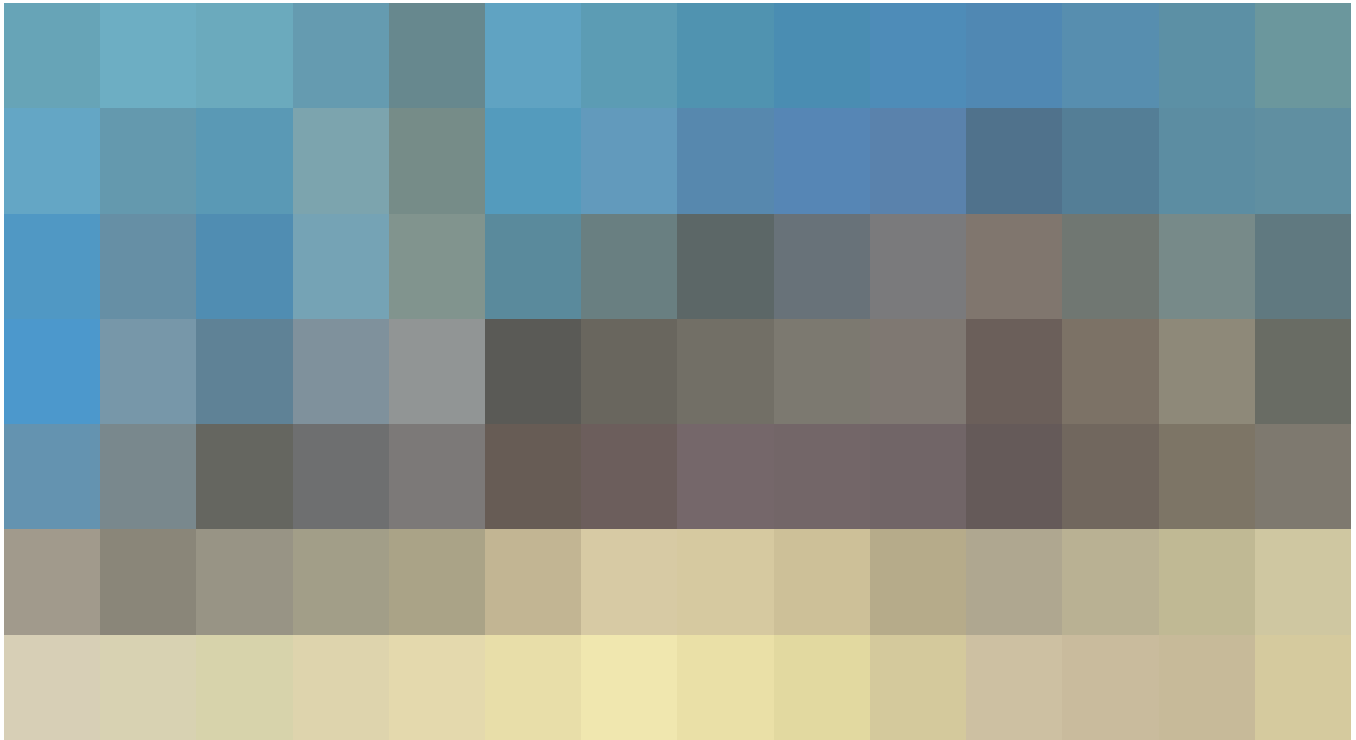


362

Anche in Italia il linguaggio espressivo dell'architettura del Novecento vede l'affermazione di nuove sperimentazioni stilistiche, simbolo di una nuova corrente caratterizzata dall'utilizzo di innovativi materiali costruttivi e dalla codificazione di tecnologie costruttive più idonee alla nuova tendenza generale della "civiltà delle macchine". La cultura architettonica italiana tra la fine della *Belle Époque* e l'inizio del Secolo Breve è sancita dal desiderio di far rinascere l'architettura cercando forme espressive completamente nuove. All'indomani dell'impulso determinante promosso dal *Congrès Internationaux d'Architecture Moderne* (CIAM), fondato nel 1928 dai più illustri maestri del Movimento Moderno, in Italia si delineano nuove forme di architettura plasmate dalla élite architettonica preminente, coinvolta nella ricerca di "nuove tendenze" e dalle contingenze politiche, foriere di una rinnovata propulsione nella produzione di nuovi materiali e sistemi tecnologici che forniscono un «paesaggio evocativo, schietto omaggio al trionfo dell'industrializzazione, ai fenomeni tecnici e sociali del XIX secolo che si ampliavano allora nell'aviazione e nell'energia elettrica»²³².

È proprio il Futurismo a proclamare in Italia la supremazia culturale di questo paesaggio evocativo della "civiltà delle macchine", espressione estetica e anticulturale del classicismo e delle arti plastiche a favore della nuova forma della «macchina per abitare» («*La maison est une machine à habiter*»²³³) e dell'«abitazione razionale»²³⁴. Il movimento futurista, che affonda i suoi principi nell'etica della velocità, del ritmo incalzante delle forme, nell'azione dei corpi e nel "dinamismo architettonico", trova il suo episodio scatenante nell'incidente automobilistico di Filippo Tommaso Marinetti (scrittore italiano e fondatore del movimento futurista) del 1908, "parodia del battesimo a una nuova fede", come commentò successivamente Reyner Banham. Seguivano, poi, gli undici punti del Manifesto Futurista «di cui i primi quattro esaltavano le virtù della

*temerarietà, dell'energia e dell'audacia, mentre rivendicavano la supremazia magnificenza della velocità meccanica, in quel paesaggio ormai famoso che dichiarava che una macchina da corsa è più bella della Vittoria alata di Samotracia. I punti dal quinto all'undicesimo continuavano a idealizzare il conducente di un tale veicolo come parte integrante delle traiettorie dell'universo, e seguitavano celebrando diverse altre virtù come il patriottismo, ed esaltando la guerra»*²³⁵. Anche dopo la morte di Marinetti, non si spense l'ardito anelito della corrente futurista: infatti, il "dinamismo architettonico", declinazione in architettura del "dinamismo plastico" coniato da Umberto Boccioni durante la realizzazione di alcune delle sue più celebri opere artistiche, rappresenta la «visione di splendore meccanico»²³⁶ rinveniente nelle opere del celebre architetto futurista Antonio Sant'Elia (Como, 1888 – Monfalcone, 1916). Il maestro comacino è l'artefice di una nuova forma rigorosa che l'architettura avrebbe dovuto adottare, in cui puntualizza come «non si tratta di trovare nuove sagome, nuove marginature di finestre e porte, di sostituire colonne, pilastri, mensole con cariatidi, mosconi, rane; non si tratta di lasciare la facciata a mattone nudo, o di intonacarla, o di rivestirla di pietre, né di determinare differenze formali tra l'edificio nuovo e quello vecchio; ma di creare di sana pianta la casa nuova, costruita tesoreggiando ogni risorsa della scienza e della tecnica»²³⁷. L'arte del costruire si è evoluta nel tempo mutando lo stile e mantenendo inalterati i caratteri generali dell'architettura; all'indomani dell'avvento del processo di industrializzazione e dei mutamenti delle esigenze abitative, però, avviene «un profondo mutamento nelle condizioni dell'ambiente, che scardinano e rinnovano, come la scoperta di leggi naturali, il perfezionamento dei mezzi meccanici, l'uso razionale e scientifico del materiale. Il calcolo sulla resistenza dei materiali, l'uso del cemento armato e del ferro escludono l'architettura intesa nel senso classico e tradizionale.



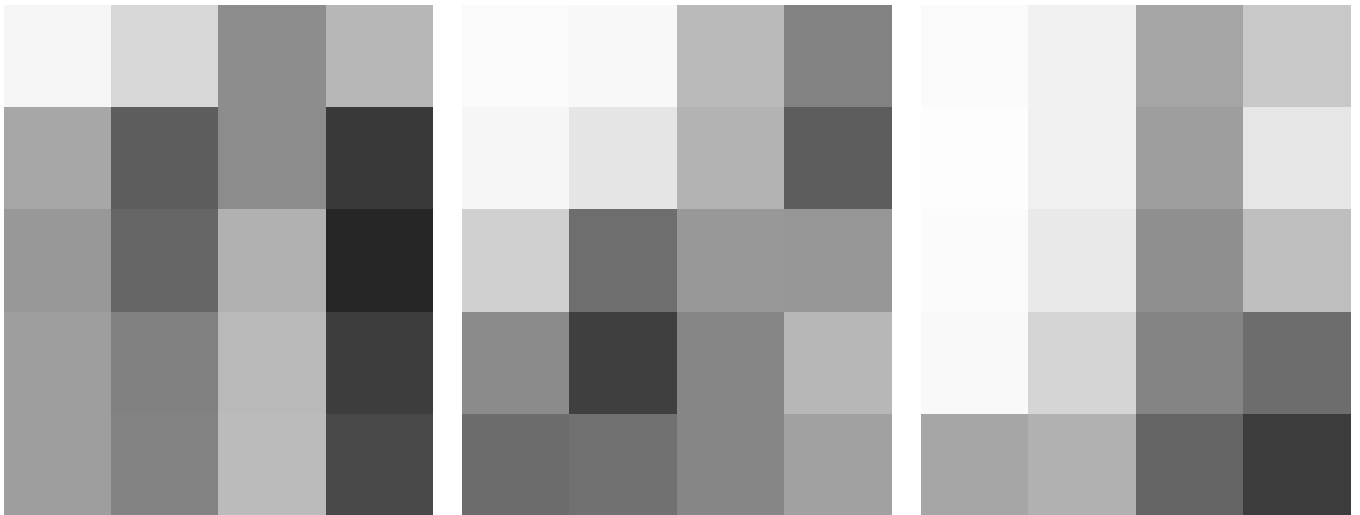
363

I materiali moderni da costruzione e le nostre nozioni scientifiche, non si prestano assolutamente alla disciplina degli stili storici; essi sono la causa principale dell'aspetto grottesco delle costruzioni "alla moda" nelle quali si vorrebbe ottenere dalla leggerezza, dalla snellezza superba della poutrelle e dalla fragilità del cemento armato, la curva pesante dell'arco e l'aspetto massiccio del marmo»²³⁸. In questo monologo, sullo sfondo della nascente "Città Nuova", Sant'Elia coniuga l'annullamento tra il mondo moderno e quello antico, una formidabile antitesi che trova la massima espressione nella città futurista, immaginata come un «immenso cantiere tumultuante, agile, mobile, dinamico in ogni sua parte, e la casa futurista simile ad una macchina gigantesca. Gli ascensori non debbono rincantucciarsi come vermi solitari nei vani delle scale; ma le scale, divenute inutili, devono essere abolite e gli ascensori devono inerpicarsi, come serpenti di ferro e di vetro, lungo le facciate. La casa di cemento, di vetro, di ferro, senza pittura e senza scultura, ricca soltanto della bellezza congenita alle sue linee e ai suoi rilievi straordinariamente brutta nella sua meccanica semplicità, alta e larga quanto più è necessario, e non quanto è prescritto

dalla legge municipale, deve sorgere sull'orlo di un abisso tumultuante: la strada, la quale non si stenderà più come un suppedaneo al livello delle portinerie, ma si sprofonderà nella terra per parecchi piani, che accoglieranno il traffico metropolitano e saranno congiunti, per i transiti necessari, da passerelle metalliche e da velocissimi tapis-roulants»²³⁹. Questi aspetti sono ricorrenti nei numerosi schizzi di studio dell'architetto dove ciò che si evidenzia è il dinamismo urbano dato dalla relazione tra gli edifici e i numerosi livelli stradali e ferroviari, ponti, piste di atterraggio e ascensori accentuanti l'estrema verticalità, non assimilabili ai contemporanei grattacieli statunitensi, ma come elementi di interconnessione strutturale che costituiscono il tessuto della nuova metropoli (fig.363).

Questi disegni saranno esposti alla Prima mostra d'arte del gruppo Nuove Tendenze; Sant'Elia proietta lo spettatore all'interno di prospettive urbane il cui sfondo è riempito da monumentali opere, quali centrali elettriche (elemento propulsore del progresso tecnologico, nonché nuova cattedrale della fede della velocità futurista), stazioni (in grado di accogliere non solo locomotive o moderni treni, ma anche aerei e

363. Antonio Sant'Elia, Progetto della nuova stazione di Milano, 1914.



364

364. Alcune opere architettoniche dell'architetto e capo delle Ferrovie dello Stato, Angiolo Mazzoni. Da sinistra verso destra: Palazzo delle Poste di Ostia (1934); Centrale termica della stazione di Santa Maria Novella a Firenze (1934); Torre dell'acqua della stazione Termini di Roma (1950) - © 1934-1950, Angiolo Mazzoni

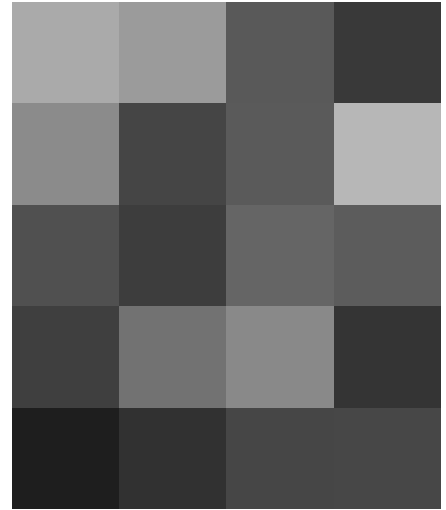
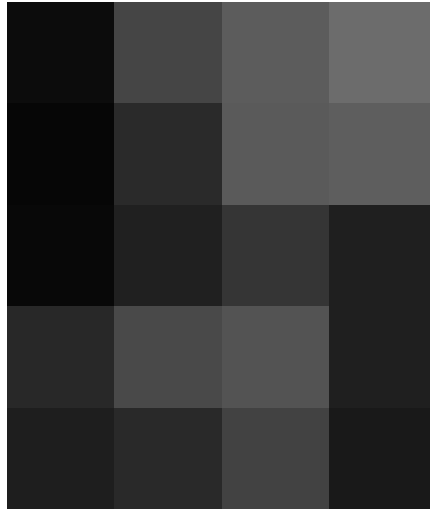
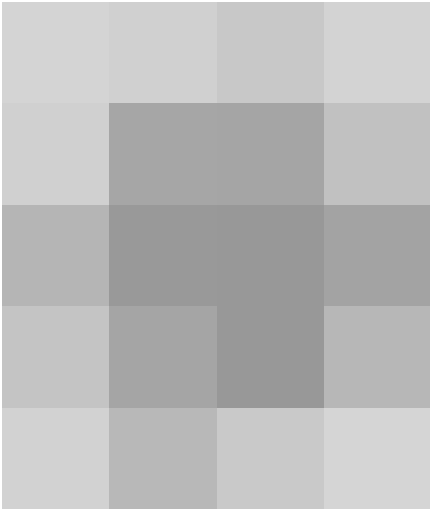
vari mezzi di trasporto atti a rispondere alle esigenze di mobilità sempre più intense), cimiteri e altissime case a gradoni per la Città Nuova. I progetti di Sant'Elia trovano, però, poca concretezza nella concezione costruttiva e di fattibilità esecutiva dell'opera: infatti, la mancata cura nella definizione di piante, sezioni e dettagli costruttivi è una scelta in linea con la poetica futurista il cui interesse è solo quello di suggestionare l'osservatore all'impressione del dinamismo urbano, senza incappare nell'astrazione dei "disegni esecutivi". L'estrema suggestiva espressività e la Grande Guerra (che nel frattempo aveva privato il movimento dei suoi migliori talenti - tra cui proprio Sant'Elia), di fatto sancirono la fine del futurismo.

Ai reduci, quali Marinetti, Carrà, Severini, Balla e Russoli, fu demandato il dovere di guidare la generazione postbellica verso la realizzazione finale del nazionalismo e nel trionfo dello stato fascista.

Se fino agli albori della Grande Guerra il futurismo non troverà mai un'opera concretamente realizzata, con l'ascesa del regime Fascista e l'estrema volontà di rinnovamento culturale e architettonico della nuova politica, la seconda generazione di futuristi potette vivere l'occasione reale di realizzare concretamente alcune opere significative, anche se talvolta discordanti con alcuni degli stilemi tipicamente futuristi.

Sono esempi significativi alcune opere dell'architetto e capo delle Ferrovie dello Stato Angiolo Mazzoni (1894-1979), tra l'altro uno degli autori de "Il Manifesto futurista sull'architettura aerea", come il Palazzo delle Poste di Ostia, la Centrale termica della stazione di Santa Maria Novella a Firenze e la Torre dell'acqua della stazione Termini di Roma (le cui strutture estremamente dinamiche si legano indissolubilmente ai disegni d'avanguardia dell'ormai deceduto Antonio Sant'Elia, ma al tempo stesso si fanno portatori dei primi innesti di monumentalismo classico, indottrinato dalla nascente architettura del Regime (fig.364). Se per figure preminenti della prima metà del Novecento, come l'architetto Angiolo Mazzoni, il concetto di dinamismo architettonico si è dissolto nel nascente monumentalismo, altre figure emergenti, invece, perseguivano il principio fondante della dottrina futurista progettando opere sempre più vocate alla quarta dimensione, proponendo volumi che sfidano i limiti imposti dalla fisica.

Il padiglione italiano pensato dall'architetto Maurizio Sacripanti nel 1970 per l'esposizione Internazionale di Osaka è, per esempio, uno dei tanti progetti che si allontanano dalla concretezza architettonica, un prodotto dinamico in grado di recepire non solo avanguardistiche connotazioni costruttive, ma di offrire uno spazio architettonico mutevole nel tempo, una esperienza fornita da una doppia serie di "lame metalliche curvi-



365

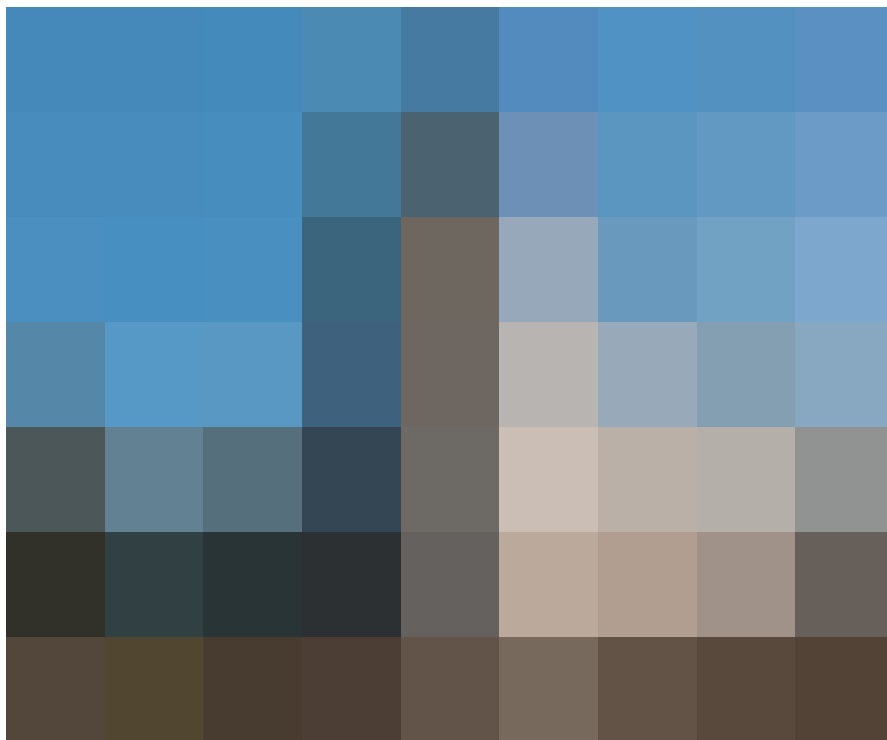
linee” oscillanti, azionate da un sistema idraulico in grado non solo di mutare gli spazi, ma di flettere la luce in un espediente spaziale suggestivo ed estremamente variabile. Sono numerosi gli altri progetti pionieristici e costruttivamente avanguardistici, forieri della fede dinamica futurista e sempre persistenti sia nella prima che nella seconda metà del Novecento, come il Grattacielo elicoidale a New York (1968) dell’architetto Manfredi Nicoletti, il Palazzo di giustizia di Savona (1987) dell’architetto Leonardo Ricci, il Ponte sul Basento a Potenza (1975) dell’ingegnere Sergio Musmeci, la Palazzina di Piazzale Clodio a Roma (1955) di Luigi Pellegrin e molti altri esempi (fig.365), che costituiscono solo alcuni tra i più suggestivi esempi di architettura neo-futurista (definita da Jean-Louis Cohen come «*un corollario della tecnologia, essendo le strutture costruite oggi dai prodotti di nuovi materiali per creare forme precedentemente impossibili*»²⁴⁰) come forma di allontanamento del postmodernismo, caratterizzato da un ripensamento non solo dell’estetica, ma soprattutto della funzionalità e della capacità dell’architettura di mutare la propria morfologia per migliorare le prestazioni e il benessere abitativo.

La costante presenza di progetti d’avanguardia nella parabola temporale Novecentesca, dimostra come l’architettura italiana abbia sempre fornito un contributo determinante per la ricerca e la sperimentazione di nuovi sistemi costruttivi e di soluzioni inno-

vative adottate per il miglioramento dei requisiti prestazionali e spaziali. Infatti, tali edifici spesso superano il codice di partenza, combinando nuovi linguaggi della contemporaneità e al tempo stesso tecnologie costruttive di assoluta innovatività ponendosi, talvolta, come edifici-prototipo per la sperimentazione e la validazione di nuovi materiali e sistemi costruttivi, declinati successivamente nelle costruzioni di massa.

Una delle opere più rappresentative di questa spinta progressista che ha caratterizzato il movimento futurista - in linea con i precetti pionieristici di Jean Prouvé - può senza dubbio essere Villa Girasole a Marcellise (Verona), progettata dall’ingegnere Angelo Invernizzi (Marcellise, 1884 – Marcellise, 1958) in collaborazione con l’architetto Ettore Fagioli (1984-1964) e l’ingegnere meccanico Romolo Carapacchi (1900-1974) (fig.366). Realizzata tra il 1929 e il 1935 è considerata un capolavoro del tempo e rappresenta una concretizzazione della visione utopica futurista di un immobile dinamico, un prototipo di casa girevole, unico esempio in Italia per tipologia strutturale e concezione architettonica. Lo stesso Marcello Piacentini nella rivista “Architettura”, recensisce la costruzione con alcune pagine destinate a diventare il riferimento assoluto «*sul quale i futuri ricercatori e pubblicisti attingeranno per stendere le loro conoscenze*»²⁴¹; non solo come capolavoro di architettura razionalista e futurista, ma un esempio

365. Alcune opere architettoniche neo-futuriste e post-moderniste. Da sinistra verso destra: Padiglione Italiano per l’esposizione Internazionale di Osaka dell’architetto Maurizio Sacripanti (1970); Grattacielo elicoidale a New York dell’architetto Manfredi Nicoletti (1968); Ponte sul Basento a Potenza dell’ingegnere Sergio Musmeci (1975).



366

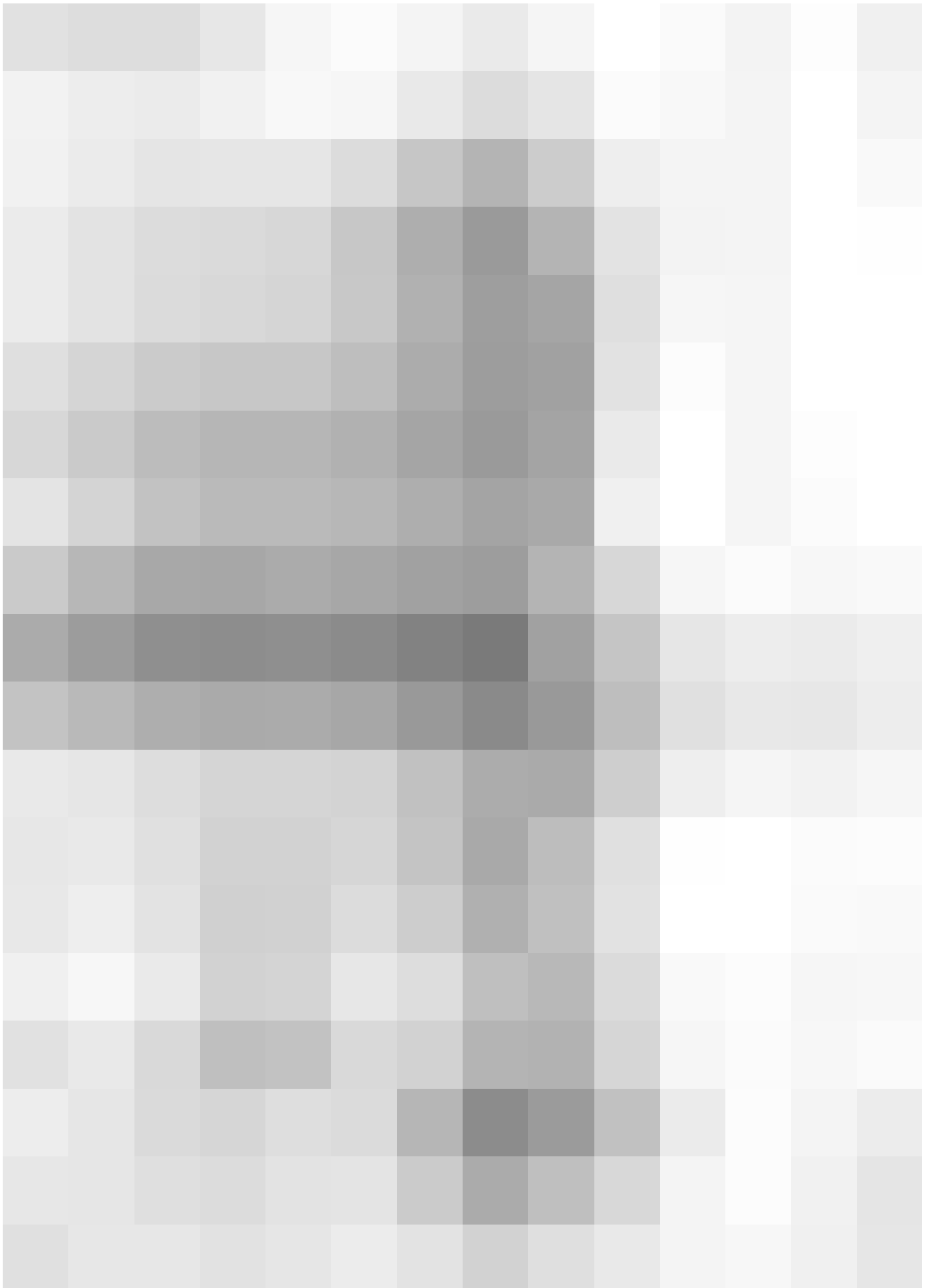
366. Angelo Invernizzi (Marcellise, 1884 – Marcellise, 1958), Ettore Fagioli (1984-1964), Romolo Carapacchi (1900-1974), Villa Girasole a Marcellise (Verona).

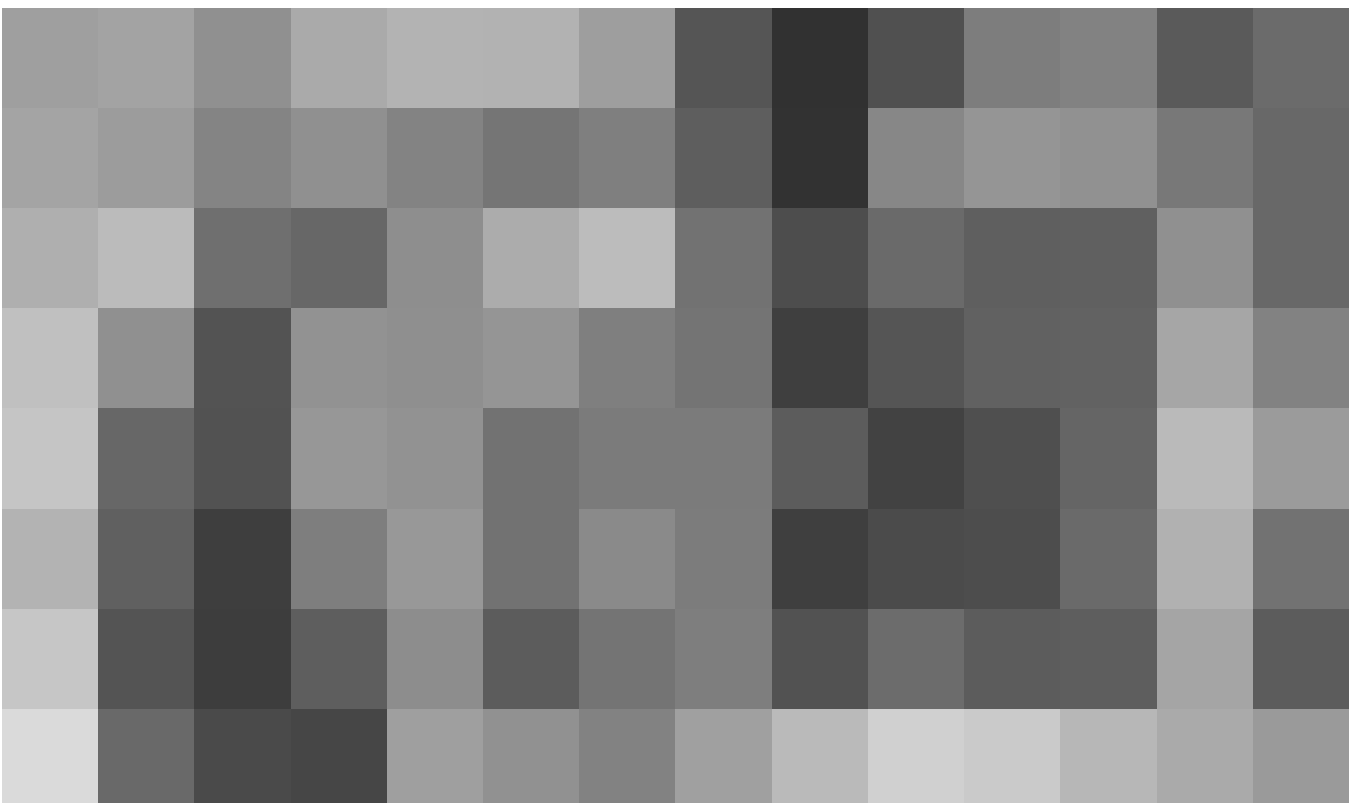
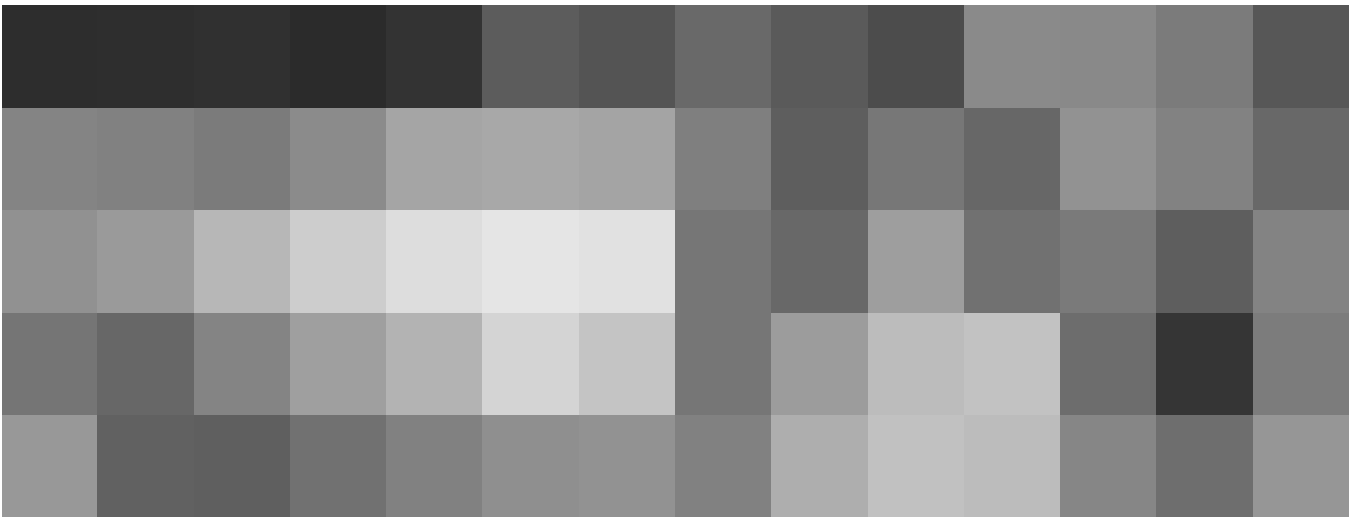
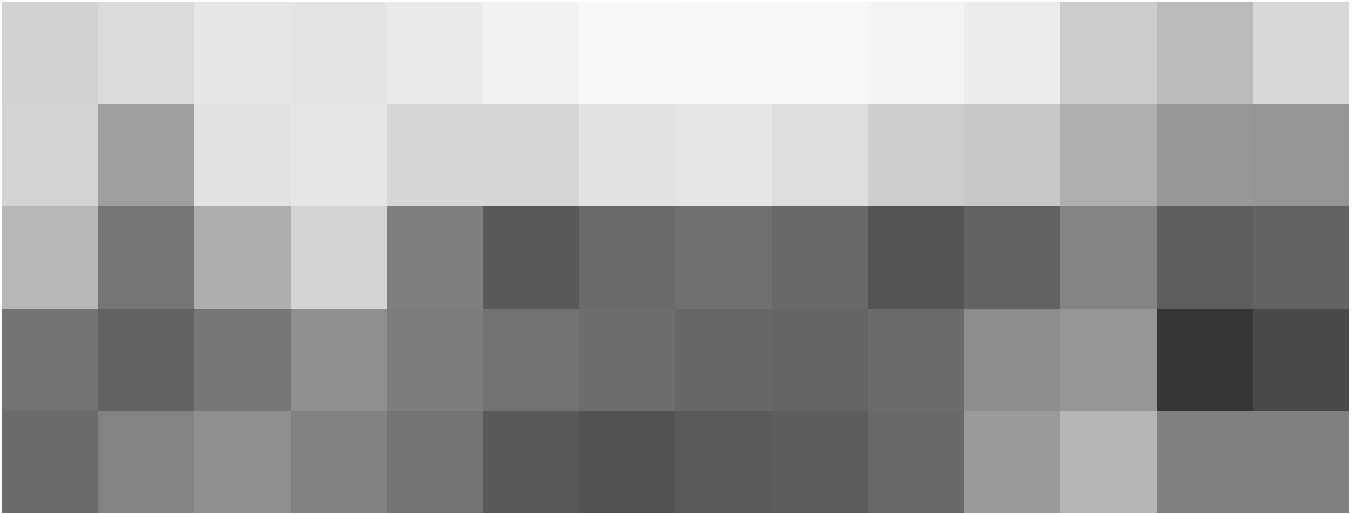
367. Nella pagina successiva: schema prospettico della struttura intelaiata in calcestruzzo armato con pilastri e travi della tipologia *Vierendeel* e della piattaforma mobile in calcestruzzo armato ancorata a rulli troncoconici di quindici carrelli e rulli di spinta. Alla base della torre centrale la piattaforma in ferro e la ralla di movimentazione, 1936, in *Architettura. Rivista del Sindacato Nazionale Fascista Architetti* diretta da Marcello Piacentini.

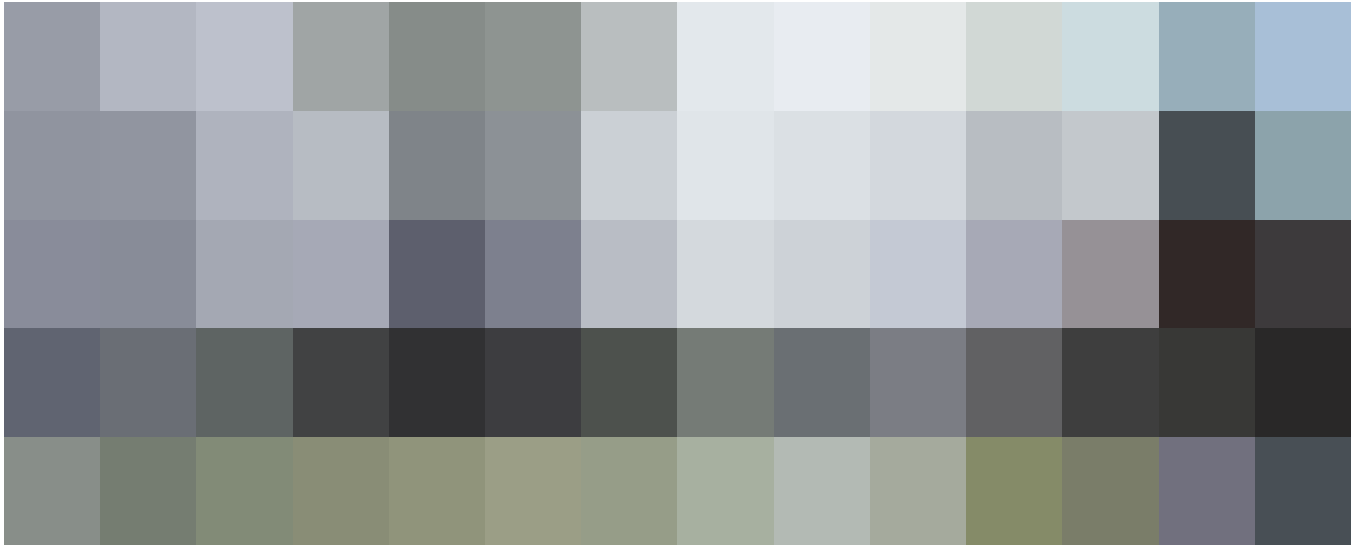
368. Nelle pagine successive: immagini storiche della costruzione di Villa Girasole. In alto, da sinistra verso destra: struttura intelaiata in calcestruzzo armato; piattaforma mobile in calcestruzzo armato ancorata ai rulli troncoconici di quindici carrelli; carrello motore. Al centro, da sinistra verso destra: particolare della ralla e della piattaforma metallica; particolare dell'anello di spinta in struttura mista alle cui estremità di sei travi a mensola sono innestate le 'armille' e l'armatura dei pilastri. In basso, da sinistra verso destra: particolare della carpenteria metallica e del sistema di casseforme impiegate per la realizzazione delle travi della tipologia "Vierendeel"; dettaglio della scala elicoidale in cui è visibile l'anello realizzato con travi della tipologia "Vierendeel", 1936, in *Architettura. Rivista del Sindacato Nazionale Fascista Architetti* diretta da Marcello Piacentini

di approccio pioneristico agli aspetti energetici e costruttivi, considerato ancora oggi un manifesto di come un'idea poteva superare le difficoltà e i limiti tecnologici all'indomani della nascente civiltà industriale italiana. Quest'opera, infatti è un complesso di ruote, rotaie e ingranaggi in grado di ruotare l'intera struttura seguendo il movimento del sole. Un prototipo di casa girevole, unico esempio in Italia per tipologia strutturale e concezione architettonica. La struttura di Villa Girasole è completamente in calcestruzzo armato, divisa in due parti distinte: il basamento cilindrico di sostegno (del diametro di 44,50 metri sormontato da un ampio loggiato e da due strutture rettangolari) e la piattaforma girevole imperniata intorno all'asse verticale della torre (collegata da una ralla centrale a rulli troncoconici da quindici carrelli a ruote scorrevoli su tre rotaie circolari e da una corona di 20 rulli di spinta a realizzazione orizzontale) (figg.367-368). La ralla sopporta una piattaforma a struttura mista in ferro e calcestruzzo, alla cui estremità di sei travi a mensola sono presenti degli elementi di collegamento chiamate "armille" (collari), nelle quali è inglobata l'armatura metallica dei pilastri di sostegno della torre (figg.367-368). La struttura di

elevazione della torre è realizzata da anelli di calcestruzzo armato realizzati con travi della tipologia *Vierendeel*, morfologicamente in grado di resistere alle sollecitazioni flessionali e torsionali derivanti dal movimento del complesso (figg.367-368). All'interno della torre (alta 42,35 metri e di 7,50 metri di diametro), si sviluppa una scala elicoidale con il relativo ascensore. La corona e i rulli di spinta scorrono su una rotaia fissa movimentati da due carrelli motore azionati elettricamente e collocati sulla rotaia di raggio maggiore (20,85 metri) i quali, con una potenza di 3 HP, muovono un peso totale di 1500 tonnellate. Il tempo impiegato a compiere un giro completo è di circa 9,20 ore con una velocità periferica di circa 4 mm al secondo²⁴². La ralla e la piattaforma metallica vennero realizzate dalle Officine Meccaniche Verrina di Genova, mentre i rulli, i carrelli motore e le rotaie dall'Ansaldo di Sanpieroarena e dalla Ditta Ferroteaie. Nel calcolo delle strutture in calcestruzzo armato si è tenuto conto delle sollecitazioni che gli elementi motore (carrelli, ralla, rulli) generano sia sugli elementi strutturali che sulle membrature. Per ridurre la trasmissione delle sollecitazioni dovute all'attrito e ai fenomeni connessi al movimento, i carrelli, su cui poggia la struttura, sono dotati di cerniere cilindriche in grado di dissipare gli sforzi di trazione e compressione. Inoltre, «*si sono adottati materiali di primissima qualità: calcestruzzo con cemento ad alta resistenza con carico di sicurezza di 65 kg/cm² e ferro omogeneo con carico di sicurezza di 1200 kg/cm². Di proposito si è voluta l'ossatura molto elastica per la presenza e la disposizione di rilevanti quantità di ferro e per l'esigua altezza delle travi*»²⁴³. Il calcolo della struttura, inoltre, è stato eseguito «*per le condizioni più sfavorevoli, assoggettando la costruzione ad una forte pressione del vento (250 kg/m² con prescritto dal Regolamento Italiano per i ponti), caricandola in corrispondenza dei pilastri, [...] alla trazione in caso di rottura di un carrello ed, infine, ad un momento torcente che è il momento di attrito della ralla*»²⁴⁴.







369

Per limitare l'eventuale formazione di fessurazioni in corrispondenza delle murature, essendo la struttura portante iperstatica, Invernizzi ha adottato un sistema sperimentale in grado di coniugare la teoria della scienza delle costruzioni, la pratica di cantiere e l'avanguardistico sperimentalismo italiano in merito alla diffusione di innovativi materiali. Infatti, tutti i pilastri in corrispondenza della parte mobile sono incernierati alla base creando «dei giunti di dilatazione nelle murature, mascherando tali giunti all'esterno con fasciamento in lamiera di Alumàn di 8/10 di spessore, prodotte dalla ditta milanese “Lavorazioni Leghe Leggere”, specializzata in costruzioni e arredamenti aeronautici, ferroviari e navali e che ha dato alla Villa un aspetto caratteristico, specialmente per il colore, cangiante con la variazione del colore del sole, e per certi riflessi madreperlacei notturni che si verificano col chiarore lunare»²⁴⁵ (fig.369). L'impiego di questo materiale segna una tappa fondamentale dell'industrializzazione del processo costruttivo, con l'affermazione di nuove leghe metalliche che diventarono il simbolo e il risultato tangibile del progresso ed espressione dell'Italia autarchica.

L'Alumàn, infatti, è un materiale composto da alluminio e manganese (da cui deriva l'abbreviazione del nome del materiale: al[um]i[n]o e man[ganese]) noto anche come “Aluman 881” prodotto quale materiale in sostituzione del rame e del ferro zincato. La par-

ticolarità di questo materiale è sia la capacità di riflettere il colore sia la sua estrema leggerezza («un metro quadrato di lamiera spessa 0.7 mm pesa 2 kg in confronto ai 16 kg della lamiera ondulata zincata»²⁴⁶), caratteristiche che lo resero uno dei materiali più adoperati per i sistemi di rivestimento e di copertura. «Sfruttando le sue proprietà inossidabili, infatti, l'Alumàn fu adoperato quale sistema di rivestimento del Padiglione del porto industriale di Venezia per la Fiera Campionaria di Padova del 1932, progettato dall'architetto Brenno del Giudice»²⁴⁷. L'innovatività di questa architettura risiede anche nella sensibilità dei progettisti nell'occuparsi degli aspetti legati al rapporto con l'ambiente, al comportamento energetico, al sistema impiantistico ed al benessere indoor. Villa Girasole, infatti, rappresenta una delle prime opere a recepire non solo materiali da rivestimento futuristici come il suddetto Alumàn e sistemi meccanici per il movimento, ma anche materiali d'avanguardia celati nelle stratigrafie orizzontali e verticali con lo scopo di migliorare le prestazioni energetiche ed soddisfare i requisiti di isolamento termico e acustico; la copertura, infatti è isolata termicamente con uno strato di feltro bitumato della tipologia *Ruberoid* e da due strati di cartone catramato resi solidali da quattro strati di bitume della tipologia *Holz cement*; la membratura di tamponamento, invece, per garantire al tempo stesso coibenza termica e leggerezza,

369. Rivestimento della superficie esterna con lastre di *Aluman*, prodotto e commercializzato dalla ditta milanese “Lavorazioni Leghe Leggere” - © FAI - Fondo Ambiente Italiano



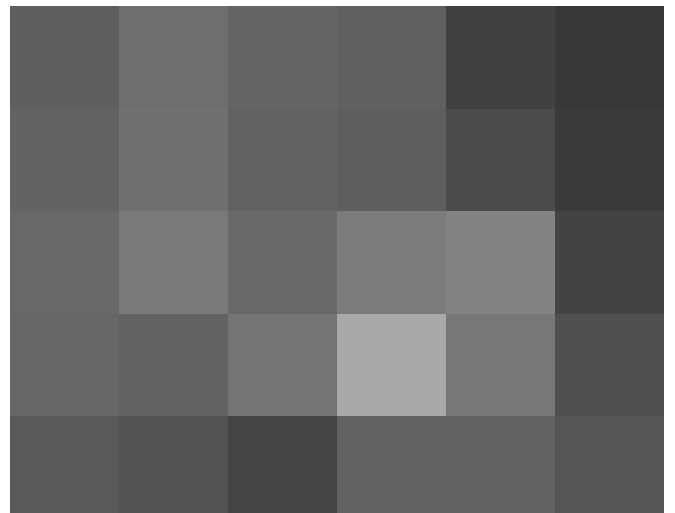
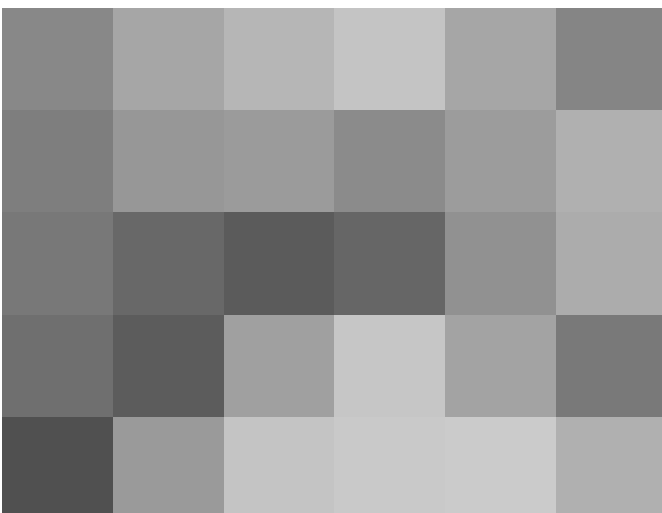
370

370. Immagine storica della costruzione di Villa Girasole: particolare del sistema di tamponamento della struttura intelaiata in calcestruzzo armato con blocchi-lastre di Eraclit.

371. Dettaglio del solaio laterocementizio e dettaglio della copertura della lanterna realizzata con il sistema costruttivo del vetrocemento, con diffusori in cristallo prodotti e commercializzati dalla ditta Saint Gobain, Chauny & Cirey, 1936, in *Architettura*. Rivista del Sindacato Nazionale Fascista Architetti diretta da Marcello Piacentini.

venne realizzata con blocchi di *Eraclit*, un materiale introdotto in edilizia pochi anni prima della costruzione della Villa Girasole, scelto in fase di progettazione per le ottime qualità coibenti e per l'estrema leggerezza, sostituendo di fatto la muratura tradizionale (fig.370). L'Eraclit, tutt'oggi ampiamente commercializzato dalla Società Azioni Eraclit Venier a Portomarghera (Venezia) «*si basa principalmente sullo sfruttamento di fibre legnose o, meglio, di sottili e lunghi trucioli di legno (pioppo) trattati in modo da essere resi incombustibili e imputrescibili, sono riuniti, compressi ed induriti con uno speciale impasto cementizio*»²⁴⁸. Il nome del prodotto rievoca la fusione della parola Herakles (Erocole) con il vocabolo lithos (pietra)²⁴⁹, sottolineando figurativa-

mente le straordinarie caratteristiche tecniche e prestazionali del prodotto (generalmente in forma di lastre ed a matrice legnosa, ridotta in sottilissime fibre rese solidali attraverso l'uso di colle, cementi o materie sintetiche), che non solo contribuiscono alla definizione di tamponamenti e chiusure verticali, ma si pongono come rottura definitiva delle comuni murature in pietra o laterizio che hanno caratterizzato da sempre la tradizione costruttiva italiana. Tradizionali, invece, sono i sistemi tecnologici per le partizioni orizzontali, della tipologia laterocementizia con travetti gettati in opera e fortemente armati in più direzioni per garantire una globale rigidezza in risposta alle deformazioni derivanti dal cinematicismo della struttura (fig.371). La copertura della lanterna superiore, invece è realizzata con il sistema costruttivo del vetrocemento, con diffusori in vetro forniti dalla ditta Saint Gobain, Chauny & Cirey (fig.371). Tra i diversi sistemi vetrocementizi prototipati dalla ditta Saint Gobain, Chauny & Cirey, la tipologia Duralux è quella che maggiormente si prestava alla realizzazione della lanterna di Villa Girasole. Il Duralux, infatti, è un diffusore di vetro circolare ad alta resistenza e temprato ed al tempo stesso molto leggero grazie alla presenza su un lato di una cavità "a scatola". Il profilo "a scaglioni" del diffusore e la presenza di una lieve strombatura, inoltre, favorisce la solidarizzazione tra l'elemento e la cappa di malta cementizia impermeabile, miglioran-



371

do notevolmente la tenuta all'acqua e prestandosi alla realizzazione di solette di copertura piane o curve. Infine, degna di nota è la progettazione inerente il sistema impiantistico, fortemente innovativo rispetto alle convenzionali reti idrico-sanitarie, fognanti, elettriche e di riscaldamento. Difficoltà connesse agli impianti tecnici, quali gli attacchi dell'acqua e gli scarichi hanno portato a soluzioni inedite per una abitazione sperimentate nel settore navale: infatti, le acque bianche e reflue sono raccolte in specifiche vasche a tenuta disposte sotto la piattaforma girevole e vuotate all'occorrenza mediante tubazioni flessibili. A completamento della facciata, infine, sono gli avvolgibili celesti azionati elettricamente da comandi posti nelle varie camere, così come la presenza di un quadro generale con tre comandi (avanti, indietro, arresto) in grado di muovere l'intera struttura come un primordiale esempio di casa domotica²⁵⁰. L'idea di far ruotare gli edifici costituisce una estrema sfida al rapporto tra architettura e costruzione. «*La componente della mobilità, l'idea di concepire la casa come una macchina in movimento, ricorre spesso nei proclami futuristi in cui si afferma l'importanza di applicare in architettura i procedimenti industriali seriali, secondo le seguenti prerogative: bassi costi di produzione, rapidità di costruzione, possibilità di cambiare periodicamente la casa, orientabilità nel caso vengano montate su piattaforme girevoli, sicurezza contro i terremoti e i cicloni*»²⁵¹. Nel 1934 la rivista “Quadrante” pubblica una casa girevole, su progetto dell'ingegnere Pier Luigi Nervi, con una struttura troncoconica interamente in calcestruzzo armato, descritta dallo stesso Nervi come «*un sintomo notevole degli sviluppi della tecnica edile, che, senza passare da avveniristi ad ogni costo, è prevedibile liberi un bel giorno le abitazioni dalla schiavitù dell'immobilità*»²⁵². Come anticipato dalla figura pionieristica di Pier Luigi Nervi, la progettazione e la prototipazione di opere architettoniche spinte oltre “i limiti fisici” della tecnica, rappresentano ancora oggi un campo d'indagine

fortemente caratterizzato dai più innovativi sistemi costruttivi e dai materiali figli dell'industria spesso adoperati in veste di prototipi per la validazione e valutazione delle loro caratteristiche prestazionali. L'analisi di queste opere, talvolta di visione utopistica, può rappresentare un campo d'indagine utile alla conoscenza non solo dei contributi inventivi e sperimentali delle tecniche costruttive e dei materiali, ma in modo particolare quali sono stati i limiti obsolescenziali riscontrati dalla estremizzazione del processo costruttivo. La visione futurista, a distanza di oltre un secolo, persiste nella contemporaneità attraverso la tecnologia digitale a cui è demandata il compito di creare dinamismo servendosi di grandi schermi che dinamizzano le facciate che però mettono in crisi gli stessi paradigmi vitruviani dell'*hic et nunc* e della distinzione tra animato ed inanimato, svilendo ulteriormente la stessa opera architettonica a cui è demandato il solo compito di fornire supporto agli schermi informatizzati. Diventa, dunque, imprescindibile analizzare criticamente le architetture futuriste del Novecento, in modo particolare degli edifici prototipo che per prima hanno recepito le avanguardie costruttive ed i materiali più innovativi. L'approfondita conoscenza e sistematizzazione di queste avveniristiche opere si pone come valido strumento per progettare oggi edifici-impianto sempre più vocati ai temi della sostenibilità ambientale ed energetica, accostando anche evoluti sistemi impiantistici e domotici in grado di “regolare” l'apporto energetico e i relativi consumi al variare delle condizioni ambientali del contesto.

Villa Girasole, le opere di Jean Prouvé e di Richard Buckminster Fuller rappresentano «*un monumento al progresso e simbolo della capacità dell'uomo di controllare la tecnica per un habitat migliore*»²⁵³, in grado di coadiuvare in un singolo edificio le trasformazioni ed il progresso raggiunto dai settori dell'ingegneria meccanica, elettrica, aeronavale, impiantistica ed architettonica.

372. Sezione del Faro Eddystone Rock presso Plymouth, progettato nel 1755 da John Smeaton.

373. Cemento Portland.

374. William Boutland Wilkinson, disegno del suo brevetto per la costruzione mista ferro-calcestruzzo di un solaio, 1854.

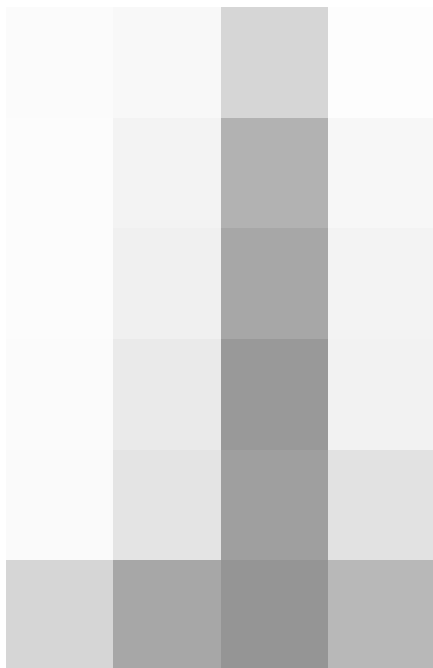
Il calcestruzzo armato nell'architettura moderna: struttura, involucro e tecniche nuove

Il rapporto architettura-industria rispettivamente a livello di metodo con Paxton, a livello economico con Snow, a livello funzionale e integrale con la Scuola di Chicago e a livello innovativo con Jean Prouvè e Fuller, trova nella prima metà del Novecento la reale presa di coscienza culturale degli architetti europei nel voler individuare uno sviluppo concreto dell'architettura rispetto alle esigenze moderne. Quando William Morris nel 1862 inizia la sua attività teorica e pratica nelle cosiddette Arti Applicate, Henry Van de Velde disegna e fabbrica mobili e arredi come beni di consumo e Muthesius è inviato in Inghilterra per studiare l'abitazione inglese, un piccolo gruppo di artisti, architetti e uomini di cultura si riunirono per avviare quel dibattito del Movimento Moderno attorno al quale l'interesse per la civiltà delle macchine e dell'industria intesa come strumento produttivo delle loro opere, si pone come *fundamentum* della nuova architettura. Così, mentre le case si riempivano di mobili di serie (i tipi *Unit* di Dresda, i *Thonet* di Vienna, i *Liberty* inglesi) e la standardizzazione era alla base di tutti i processi produttivi industriali, l'impresa

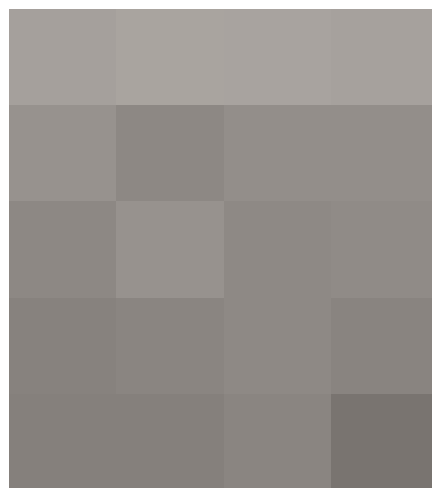
francese Hennebique vendeva con le sue 42 agenzie estere i primi manufatti industriali realizzati con l'innovativo telaio in calcestruzzo armato²⁵⁴.

Il calcestruzzo armato è il contributo più importante dato all'architettura moderna e si basa su una pluralità di conoscenze scientifiche e tecnologiche, alcune delle quali provengono dall'antichità (per esempio, l'*opus caementicium*). Dimenticato nel medioevo, questo materiale venne riscoperto solo intorno alla metà del Settecento con la stesura del volume *Architecture hydraulique* di Bernard Forest de Bélidor, pubblicato nel 1753 in cui viene utilizzato il termine *beton* (da *bethyn* o *becton* che in francese stava a significare "maturatura") per definire un composto di malta resistente all'acqua con inerti grezzi. Seguirono, quindi, varie sperimentazioni con lo scopo di migliorare le qualità intrinseche e la resistenza alla trazione degli elementi in calcestruzzo per poi perfezionare le possibilità costruttive in architettura. La parabola evolutiva del calcestruzzo può essere sintetizzata per punti:

- nel 1755 l'inglese John Smeaton scoprì che una certa quantità di argilla nel cemento favoriva la presa della malta cementizia sott'acqua valutando, in seguito, la resistenza del materiale all'acqua. Con questa scoperta gli fu incaricato di progettare il faro distrutto sullo scoglio roccioso di Eddystone Rock presso Plymouth (fig.372);
- nel 1796 l'inglese James Parker riuscì a riproporre l'antico conglomerato romano sostituendo l'argilla con il *trass*, la pozzolana bavarese.
- Nel 1824 il capomastro inglese Joseph Aspdin sviluppò il Cemento Portland, un composto di argilla e pietra calcarea ideato per migliorare la produzione di pietre artificiali (fig.373).
- Nel 1852, William Boutland Wilkinson realizza il primo solaio in cemento con l'integrazione di cavi metallici depositando il brevetto nel 1854 (fig.374).
- Nel 1854 Françoise Coignet



372



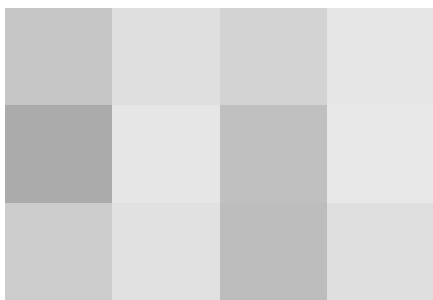
373



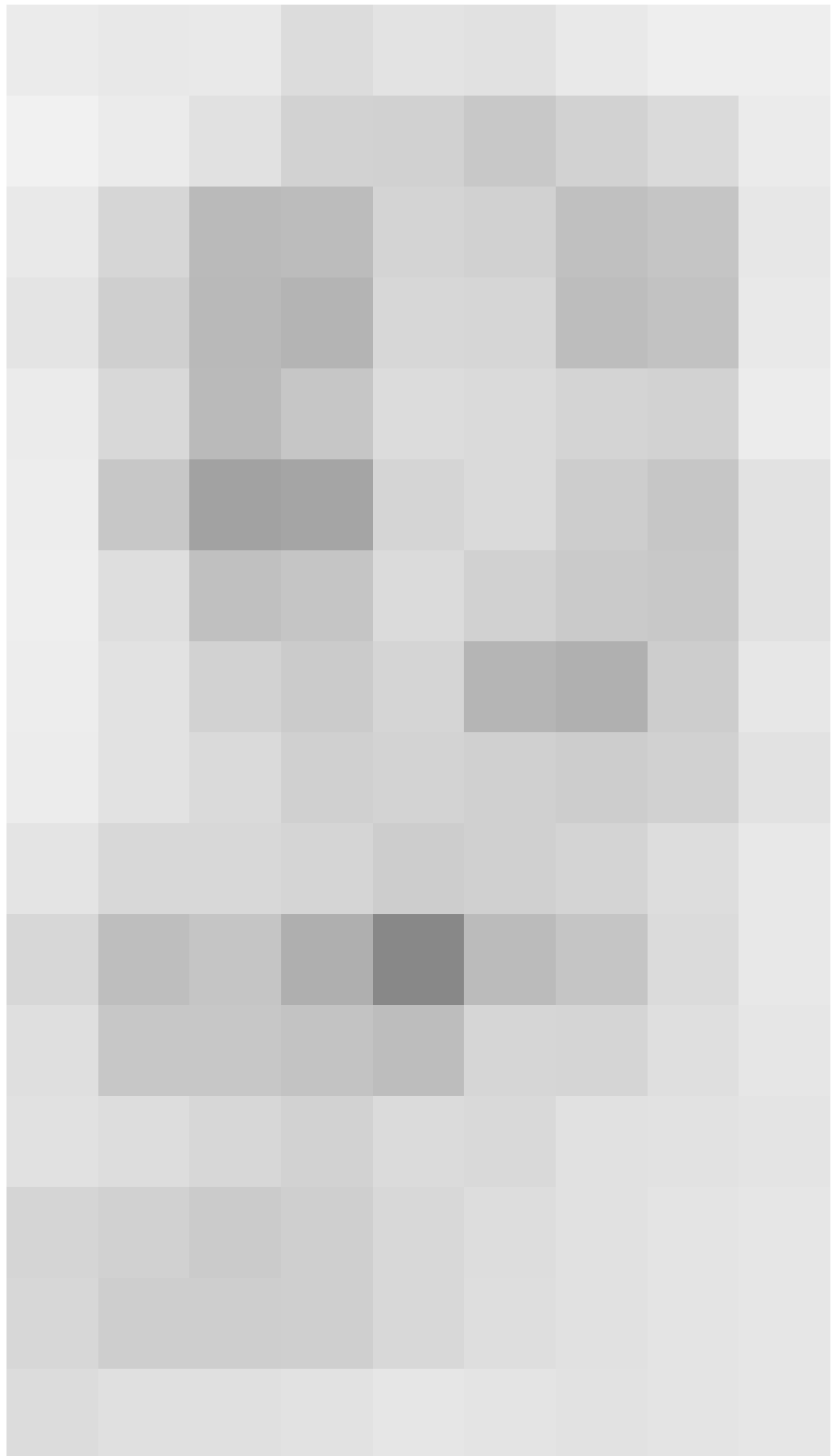
374

(1814-1888) sviluppa un metodo per la produzione di calcestruzzo battuto denominato *béton aggloméré* e realizza la maison de François Coignet adottando anche una particolare soluzione di armature con barre di ferro incrociate. Il materiale è prodotto secondo i precedenti studi di Louis Joseph Vicat (1796-1861).

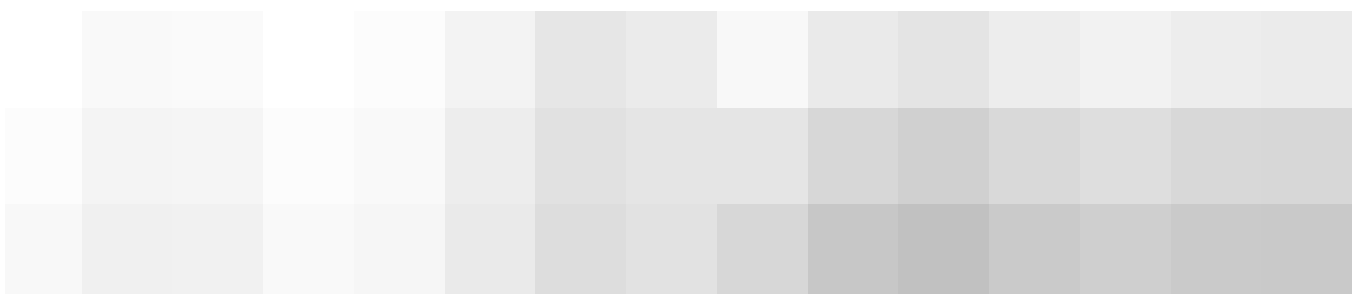
- Nel 1855 Joseph-Louis Lambot (1814-1887) con l'intento di sostituire il legno nelle costruzioni navali, brevetta il *Ferciment*, una soluzione di armature metalliche incrociate e inglobate nel calcestruzzo (fig.375). Con questo sistema realizza una piccola imbarcazione presentata all'Esposizione Universale di Parigi del 1855.
- Nel 1867 il giardiniere Joseph Monier (1823-1906) produce vasi da giardino costruiti con una rete metallica ricoperta da un impasto di cemento. Questa idea gli consente di ottenere il brevetto per «*il procedimento di produzione di oggetti di vari tipi che unisce scheletri metallici e cemento*»²⁵⁵ (fig.376). Monier adotta il metodo brevettato anche per la costruzione di ponti e solette in calcestruzzo armato con rete metallica a maglia quadrata, pubblicate nel 1887 nel primo trattato sul calcestruzzo di Gustav Wayss (fig.377).



376



375



377

375. Nella pagina precedente: Joseph-Louis Lambot, disegno del suo brevetto del 1855 del Ferciment.

376. Nella pagina precedente: Joseph Monier, disegno del suo brevetto del 1867 per il procedimento di produzione di oggetti di vari tipi che unisce scheletri metallici e cemento

377. Nella pagina precedente: sistema a piastra Monier, brevettato nel 1878; primo brevetto monier per la realizzazione di travi in calcestruzzo armato con la disposizione di staffe e dei ferri longitudinali disposti sui due lembi; sistema misto Monier in acciaio e calcestruzzo per solette. La lastra era semplicemente appoggiata sulle putrelle metalliche a doppio "T".

378. Thaddeus Hyatt, disegno del suo primo brevetto per il calcestruzzo armato, 1871.

379. François Hennebique, disegno del brevetto per le costruzioni a tecnica mista ferro-calcestruzzo, 1892.

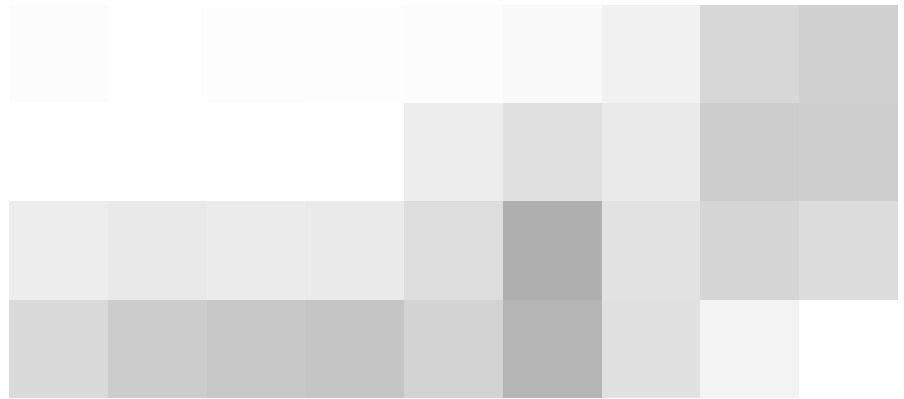
380. Nella pagina successiva: le fondazioni, le pilastrate, i muri e le scale in cemento armato del sistema Hennebique, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933, tav.LXV.

381. Nella pagina successiva: le fondazioni, le pilastrate, i muri e le scale in cemento armato del sistema Hennebique, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933, tav.LXV.

382. *Ivi*, tav.LXVI.

383. Nelle pagine successive: i cementi armati del sistema Coignet e del sistema Hennebique, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933, tav.LXIII.

384. Nelle pagine successive: le impalcature con travi maestre del sistema Coularou e del sistema Walsler-Gerard, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933, tav.LXVII.

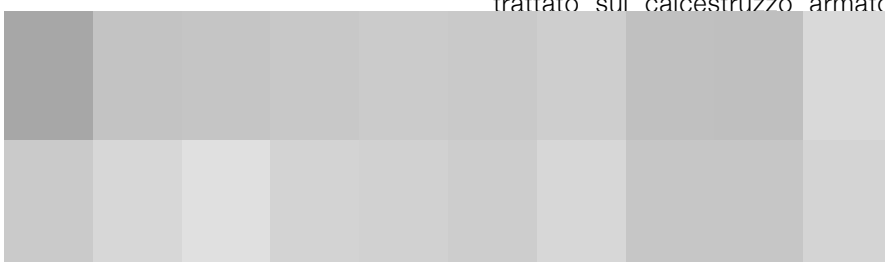


378

- Nel 1877 sono introdotte in Germania le prime normative per l'impiego del cemento e vengono realizzate le prime costruzioni in calcestruzzo non armato in occasione dell'esposizione di giardinaggio del 1879 nel Dreieichen Park di Offenbach, presso Francoforte sul Meno.
- A fine Ottocento, l'avvocato americano Thaddeus Hyatt (1816-1901) analizza e definisce le connessioni statiche del calcestruzzo armato e scopre, inoltre, la resistenza del materiale al fuoco, le dilatazioni termiche simili del conglomerato e dell'armatura, il comportamento elastico. Sviluppa così molti elementi costruttivi in calcestruzzo armato, tra cui la trave a doppio "T", la cui forma risulta staticamente molto valida²⁵⁶ (fig.378).
- Nel 1880 la ditta di Edmond Coignet introduce il concetto del rapporto acqua/cemento e definisce il processo di confezionamento per un calcestruzzo di alta qualità.
- Nel 1887 Gustav Adolf Wayss acquisisce il brevetto di Monier per avviare la realizzazione di grandi costruzioni in Germania. Tra queste è la realizzazione di solai e volte portanti del Reichstag di Berlino. Pubblica, inoltre, il primo trattato sul calcestruzzo armato

che diede un forte contributo alla diffusione in Germania di questo nuovo metodo costruttivo.

- Nel 1891 la ditta Coignet utilizza per la prima volta nel Casino di Biarritz degli elementi prefabbricati in c.a. Esso rappresenta il punto di partenza per l'architettura moderna di edificio realizzato con elementi costruttivi prefabbricati in calcestruzzo.
- Nel 1892 François Hennebique (Neuville-Saint-Vaast, 1842 – Parigi, 1921) brevetta un procedimento per costruzioni miste in acciaio e calcestruzzo. Attraverso una serie di esperimenti giunge a perfezionare la produzione di una soletta nervata (fig.379) unita in modo monolitico al pilastro in calcestruzzo armato diventando la tecnica più comune per le costruzioni (figg.380-383).
- Nel 1896 Hennebique progetta un casello ferroviario come primo edificio e, nel 1904, la sua casa privata a Bourg-la-Reine, manifesto delle eccelse proprietà della tecnica da egli brevettata.
- Nel 1902 viene costruito il primo grattacielo al mondo in calcestruzzo armato: l'Ingalls Building.
- Nel 1903 l'ingegnere Robert Maillart comincia ad eseguire i primi calcoli delle strutture in c.a.
- A Giovanni Antonio Porcheddu (1860-1937) si deve non solo la diffusione del sistema Hennebique in Italia, ma anche la realizzazione di alcune opere che hanno raggiunto il primato nel mondo (silos granari, Genova; Ponte Risorgimento, Roma; Fiat Lingotto, Torino).



379



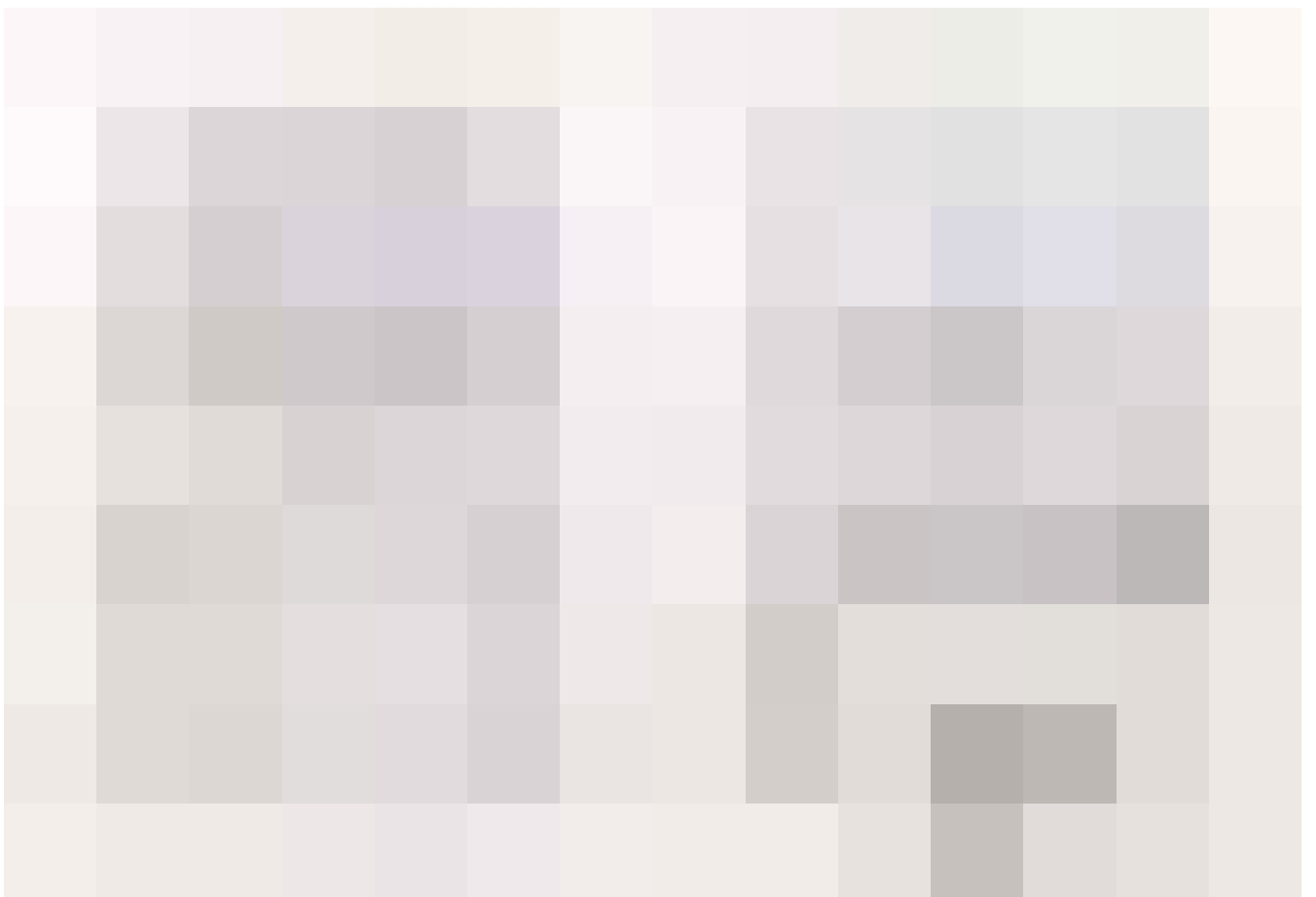
380



381



382



383

Il cemento, secondo la definizione della norma europea, è un materiale inorganico finemente macinato che, mescolato con acqua, forma un impasto plastico che giunge alla fase indurimento a seguito di reazioni e processi di idratazione, mantenendo la sua resistenza e stabilità anche per immersione in acqua. Il cemento, dunque, fa parte della categoria dei cosiddetti leganti idraulici, di cui fanno parte anche le calce idrauliche, considerate le antesignane dell'attuale cemento. Come detto, la calce idraulica propriamente detta è stata prodotta industrialmente fin dal 1700 per riscaldamento a circa 900 - 1000 °C di una marna calcarea naturale, il cui contenuto di argilla consente di ottenere una miscela di ossidi di calcio, allumina e silice; questi, combinandosi tra loro formano prodotti in grado di indurire una volta miscelati con acqua e di mantenere caratteristiche meccaniche soddisfacenti anche sott'acqua. Anticamente, un legante idraulico capace di tenere insieme elementi lapidei ed altri materiali normalmente di recupero (pezzi di mattone, cocci di anfore, ecc.) veniva realizzato mescolando la calce aerea con pozzolana naturale macinata: quest'ultima, particolarmente reattiva grazie alla sua origine vulcanica, forniva dunque la silice e l'allumina indispensabili per provocare la formazione, con la calce, dei prodotti con caratteristiche di leganti idraulici. Le opere costruite con l'utilizzazione di questo materiale sono in gran parte ancor oggi in perfetto stato di conservazione e testimoniano dell'efficacia del prodotto usato, oltre che naturalmente della bontà del progetto. Tra i cementi, il Portland è quello di gran lunga più noto e utilizzato; esso è ottenuto macinando il *clinker* e aggiungendo nel mulino stesso gesso biidrato. Il clinker è dal punto di vista morfologico un insieme di sferette irregolari di diametro compreso tra 3 e 25 mm, e dal punto di vista chimico una miscela di silicato bicalcico (C_2S), silicato tricalcico (C_3S), alluminato tricalcico (C_3A), ferroalluminato tetracalcico (C_4AF) e altri componenti minori, tra i quali gli ossidi di sodio e di potassio rivestono grande impor-

tanza ai fini dell'ambiente che sono in grado di creare nel prodotto finale. Il clinker viene ottenuto per cottura ad elevata temperatura, in lunghi forni rotanti pressoché orizzontali, di una miscela di calcare e argilla in proporzioni opportune. Il rapporto tra i materiali di partenza governa il rapporto tra i quattro costituenti del clinker sopra citati e quindi le proprietà del prodotto finale²⁵⁷.

Oltre al cemento Portland, vengono largamente usati altri leganti idraulici denominati cementi di miscela, che contengono altri materiali inorganici che hanno la capacità di partecipare alle reazioni di idratazione (aggiunte minerali). Le aggiunte principali sono i materiali pozzolanici e le loppe di altoforno granulate. Un cemento che viene oggi utilizzato solamente per usi industriali è il cemento alluminoso, ottenuto da una miscela di calcare e di bauxite.

Il calcestruzzo è un conglomerato a matrice cementizia ottenuto da una miscela di legante (cemento), acqua e aggregati fini e grossi (sabbia e ghiaia), con l'eventuale aggiunta di additivi (fluidificanti, ritardanti, acceleranti, aeranti, antiritiro, viscosizzanti, etc.) che influenzano le proprietà principali fisiche e chimiche del conglomerato.

Così come il primordiale Sistema Hennebique, il calcestruzzo viene gettato all'interno dei casseri e costipato creando gli elementi del telaio strutturale, costituito da solai (piastre in calcestruzzo armato), travi, pilastri, e plinti, travi rovesce o platee di fondazione. La muratura di tamponamento è la parete portata di chiusura perimetrale di un edificio rispetto all'ambiente esterno. Pertanto la funzione portante è assicurata dal telaio strutturale; quella di chiusura e di separazione tra spazio esterno e spazio interno è garantita dalla muratura di tamponamento. Da queste considerazioni si sviluppa a partire dagli inizi del '900 un nuovo modo di concepire l'involucro edilizio secondo diverse esigenze funzionali e prestazionali.

385. Nella pagina successiva: schema sintetico del cemento e del calcestruzzo.

Cemento

Definizione: *miscela (clinker) di silicati di calcio e alluminati di calcio ottenuti dalla cottura ad alta temperatura di calcare e argilla (o marna). Il clinker di Portland viene finemente addizionato con gesso (5%) con la funzione di ritardante di presa. Il cemento una volta miscelato con acqua di idrata e solidifica progressivamente.*

Principali reazioni che avvengono nella produzione del cemento Portland	
Argilla (intorno a 500°C)	⇒ Silice, Allumina, Ossido ferrico e Acqua
Calcare (intorno a 900°C)	⇒ Calce e Anidride carbonica
$3CaO + Al_2O_3$	⇒ C_3A (alluminato tricalcico)
$4CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	⇒ C_4AF (alluminato tetracalcico)
$2CaO + SiO_2$	⇒ C_2S (silicato bicalcico)
$3CaO + SiO_2$	⇒ C_3S (silicato tricalcico)

Nota: l'acqua (vapore) e l'anidride carbonica si allontanano insieme ai fumi di combustione

Tipo di cemento	Denominazione	Sigla	Clinker	Loppa	Micro Silice	Pozzolana Natur. Artif.	Genere volante		Scisto	Calcare	Altri	
							calcaica	silicea				
I	Portland	I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
II	Portland alla loppa	II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland alla microsille	II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland alla pozzolana	II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portland alle ceneri volanti	II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		II/A-W	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
II/B-W		65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
Portland allo scisto calcinato	II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
	II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
Portland al calcare	II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
	II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
Portland composito	II/A-M	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
	II/B-M	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
III	Cemento d'altoforno	III/A	35-64	35-65	-	-	-	-	-	-	0-5	
		III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0-5	
		III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0-5	
IV	Cemento pozzolanico	IV/A	65-89	-	-	11-35	-	-	-	-	0-5	
		IV/B	45-64	-	-	36-55	-	-	-	-	0-5	
V	Cemento composito	V/A	40-64	18-30	-	-	18-30	-	-	-	0-5	
		V/B	20-39	31-50	-	-	31-50	-	-	-	0-5	

Calcestruzzo

Definizione: *conglomerato cementizio artificiale costituito da una miscela di legante (cemento), acqua e aggregati fini e grossi (ghiaia, sabbia) con l'eventuale aggiunta di additivi (fluidificanti, ritardanti, acceleranti, aeranti, antiritiro, viscosizzanti, etc.) che influenzano le proprietà principali fisiche e chimiche del conglomerato.*

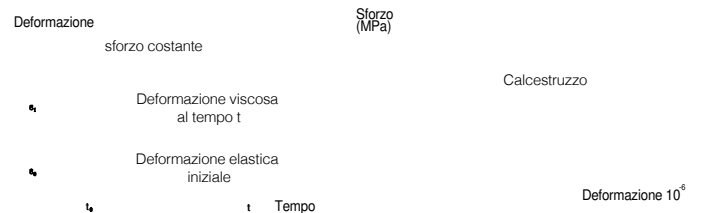
Classificazione del calcestruzzo	
In relazione alla struttura	
Calcestruzzo con struttura aperta o porosa	Calcestruzzo a struttura chiusa o densa
In relazione al peso specifico	
Calcestruzzo leggero: $800 < \text{massa volumica} < 2000 \text{ kg/m}^3$	
Calcestruzzo con struttura aperta o porosa	
Calcestruzzo con struttura chiusa o densa	
Tipologie varie	
Calcestruzzo ad alta resistenza	Calcestruzzo ciclopico
Calcestruzzo ad alte prestazioni	Calcestruzzo fibrorinforzato
Calcestruzzo ad altissime prestazioni	Calcestruzzo leggero
Calcestruzzo aerato autoclavato	Calcestruzzo proiettato
Calcestruzzo armato	Calcestruzzo rinforzato con FRP
Calcestruzzo alleggerito con polistirolo	Calcestruzzo drenante
Calcestruzzo autocompattante	

Classi di consistenza in funzione dell'abbassamento al cono di Abrams		
Slump (cm)	Classe di consistenza	Denominazione
0-4	S1	Terra umida
5-9	S2	Plastica
10-15	S3	Semifluida
16-20	S4	Fluida
> 21	S5	Superfluida



Principali cause di degrado delle opere in calcestruzzo armato	
Meccaniche	Abrasion Erosione Urto Esplosione
Fisiche	Gelo - disgelo Incendio
Strutturali	Sovraccarichi Assesamenti Carichi ciclici
Chimiche	Alcali - aggregati Attacco da solfati Attacco da solfuri Attacco da acque contenenti CO ₂
Corrosione	Carbonatazione Attacco da cloruri

Tecniche fisiche e chimiche per la diagnosi delle condizioni di un calcestruzzo		
Esami fisici		
Resistenza meccanica	Localizzazione vuoti	Caratteristiche dei pori
Prove su carote Martello di Schmidt Pull - out Ultrasuoni	Radiografia Radar	Assorbimento di acqua Permeabilità all'acqua Assorbimento superficiale Permeabilità all'aria Diffusione di gas Petrografia
Esami chimici		
Contenuto di cemento - Profilo di concentrazione di cloruri - Profondità di carbonatazione		



Per qualche periodo il calcestruzzo armato viene utilizzato - pur con l'affinamento della tecnica - come materiale con il quale realizzare forme che riecheggiano architetture del passato, pur nel desiderio di innovare il linguaggio. Inizialmente il calcestruzzo veniva impiegato per realizzare strutture a prova di incendio, inglobando colonne in ghisa e travi di ferro all'interno di pilastri in calcestruzzo armato. Successivamente le colonne e le travi a doppio "T" lasciarono spazio a tiranti e tondini di ferro disposti nelle parti strutturali maggiormente sollecitate. Inizialmente il nuovo sistema venne adottato per la realizzazione di solai a doppia nervatura in calcestruzzo armato secondo il Sistema Hennebique, come il Mulino di Don, i Mulini di Brebières a Douai (Francia) e la fabbrica di pettinatura della lana a Tourcoing (fig.386) i cui impalcati sono stati progettati per sopportare carichi fino a 3200 kg per metro quadrato di superficie.

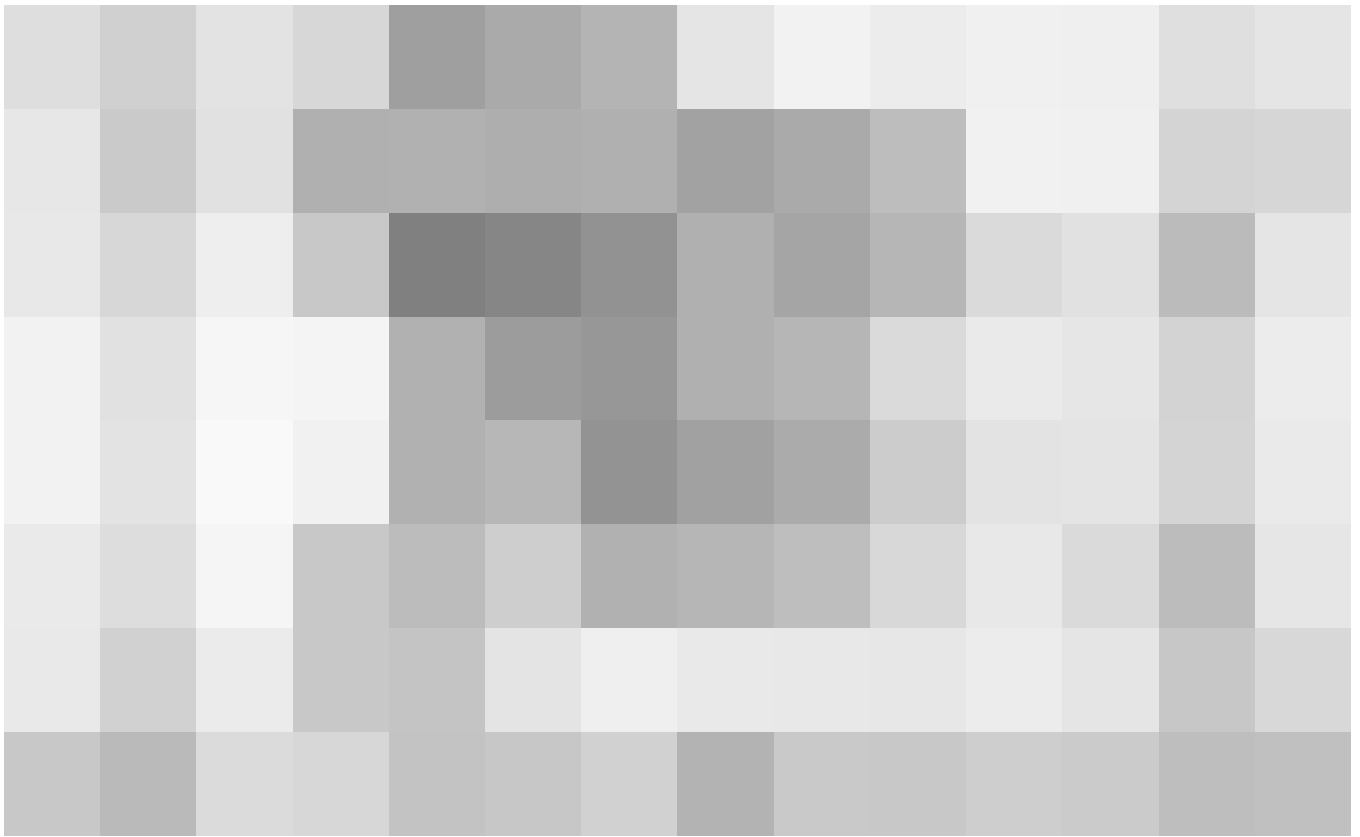
Uno degli esempi più eclatanti di soluzione dicotomica tra tradizione costruttiva e innovazione del materiale è la realizzazione della chiesa di Saint-Jean de Montmartre a Parigi progettata da Anatole de Baudot (Sarrebouurg, 1834 - Parigi, 1915) nel 1894 insieme a Paul Cottancin, la cui tecnica delle *épine armée* rappresenta per quel periodo un intervento di grande impegno. Secondo Frampton: «*il ciment armé di Cottancin utilizza mattoni perforati rinforzati con tondini di ferro come struttura permanente di un'armatura del cemento, insieme a gusci di cemento leggero e sottile. [...] Il rinforzo in filo metallico e il tamponamento cementizio sono stati considerati come agenti indipendenti, il primo in trazione e il secondo in compressione*»²⁵⁸. «*Ma la ricerca di un nuovo linguaggio, oltre alla realizzazione di vele sottili, vede la diffusione di edifici residenziali dove il telaio diviene la tipologia strutturale prevalente. L'ossatura è esibita e affiancata da elementi di tamponamento e occultata da rivestimenti realizzati con materiali tradizionali*»²⁵⁹ (fig.387).



386



387



388

386. Schema strutturale della fabbrica di pettinatura della lana realizzato con telaio e solai nervati in calcestruzzo armato secondo il brevetto Hennebique, in *Bulletin de la Société Vaudoise des Ingénieurs et des Architectes*, 1893, planche 23.

387. Immagine storica del cantiere per la realizzazione delle volte in calcestruzzo armato della Chiesa di Saint-Jean de Montmartre a Parigi, © Archivio della parrocchia di Saint-Jean de Montmartre, 1905.

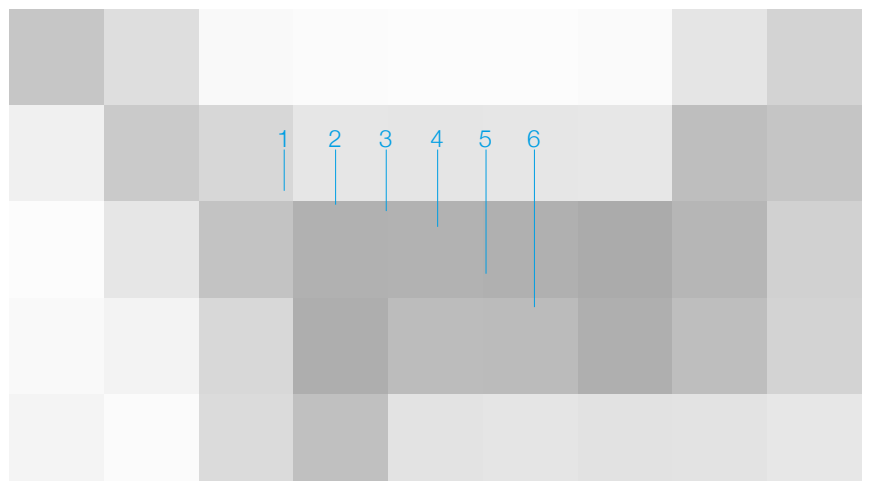
388. Anatole de Baudot, Paul Cottancin, schema strutturale dell'edificio residenziale in rue Pomereu, 1892

389. Dettaglio tecnologico del telaio di copertura e del sistema di copertura dell'abitazione di Rue Franklin progettata da Auguste Perret. Legenda: 1 massetto in cemento impermeabile, 2 sabbia, 3 cemento vulcanico, 4 massetto di calce, 5 blocco alleggerito in calcestruzzo armato, 6 solaio laterocementizio.

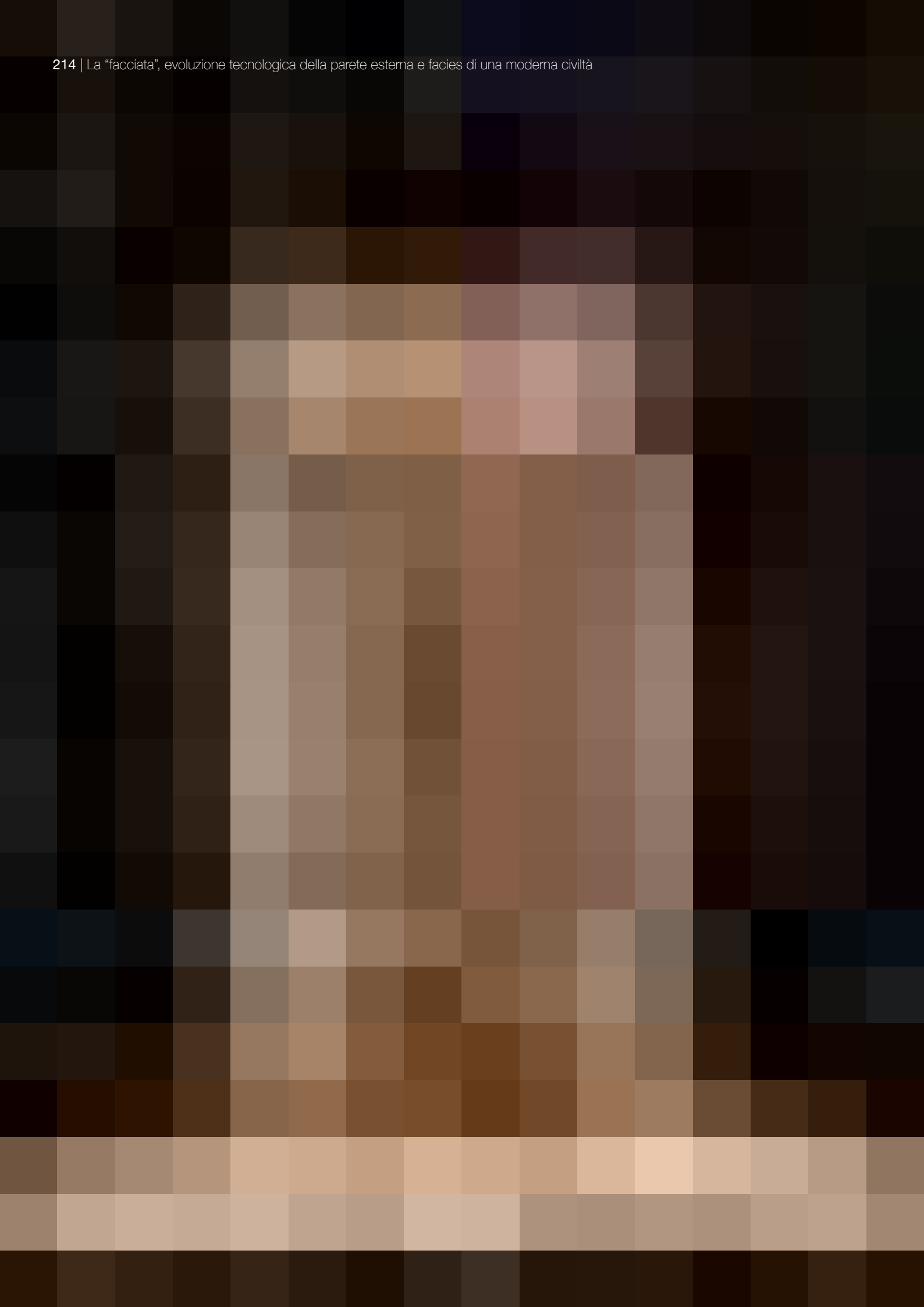
390. Nella pagina successiva: Maquette dell'abitazione in rue Franklin n.25, © Cité de l'architecture & du patrimoine/MMF/Gaston Bergeret.

Sempre di de Baudot e Cottancin è l'edificio residenziale in rue de Pomereu del 1892 in cui per la prima volta di cerca l'estrema razionalizzazione del sistema costruttivo con telaio in calcestruzzo armato e sulla possibilità formale di lasciare le superfici di calcestruzzo a vista senza ricorrere ad altri materiali. Per la prima volta anche le murature di tamponamento - in questo caso della tipologia a cassa chiusa - sono oggetto di importanti studi con lo scopo di migliorare l'isolamento termico ed acustico dell'organismo edilizio (fig.388).

Agli inizi del Secolo Breve (1900-1999) la società dei Perret Frères sono promotori di due importanti realizzazioni di edifici in calcestruzzo armato con l'adozione di stilemi gotici: l'abitazione al n.25 bis di rue Franklin e gli appartamenti in avenue Wagram, entrambi a Parigi. In questi progetti la struttura si denuncia sulle facciate che si sviluppa plasticamente - tra serramenti e pannelli rivestiti di ceramica con motivi floreali - in altezza per cinque o sei piani concluse con un coronamento e con l'ulteriore arretramento del solido (figg.389-390).



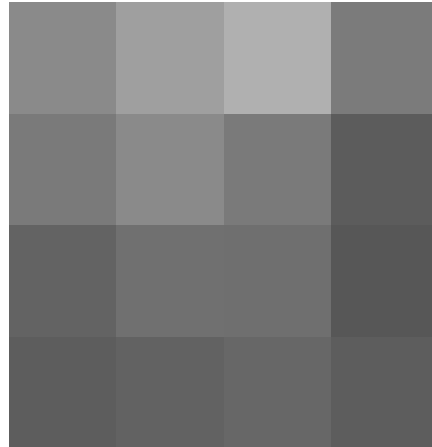
389



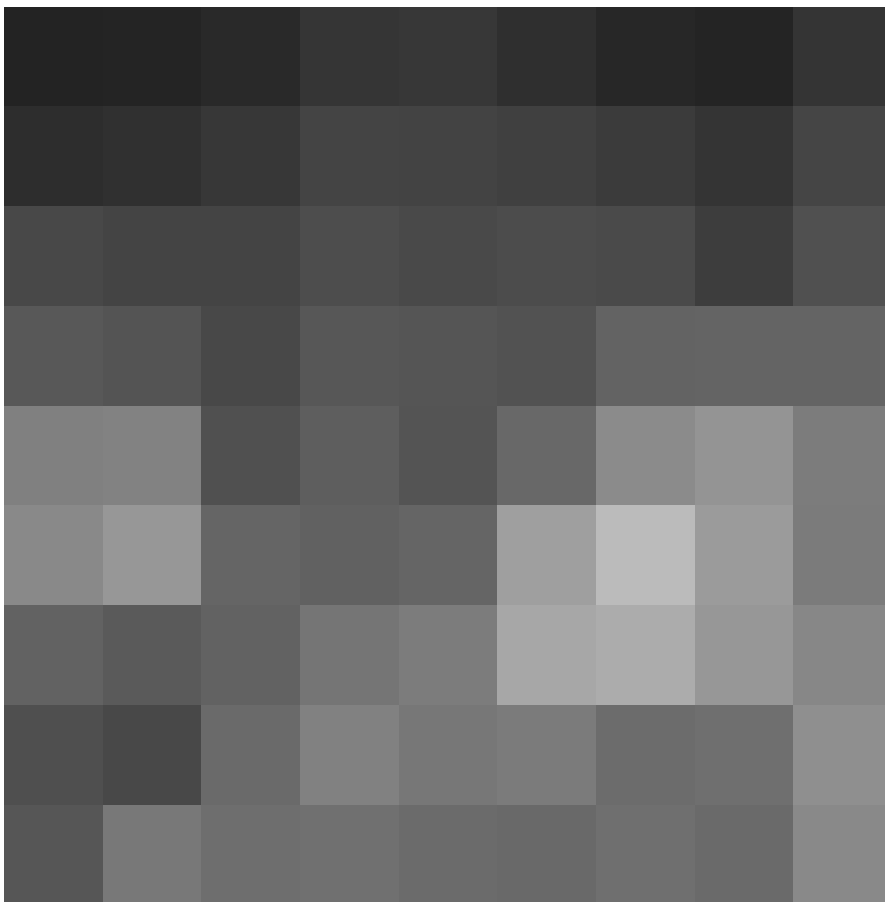
391. Frères Perret, facciata dell'atorimessa di rue Ponthieu a Parigi, 1906.

392. Frères Perret, interno della Chiesa di Notre-Dame a Raincy presso Parigi. Particolare della struttura in calcestruzzo armato e dell'involucro leggero grigliato con mattoni ornamentali, © Frank Yerbury, 1922.

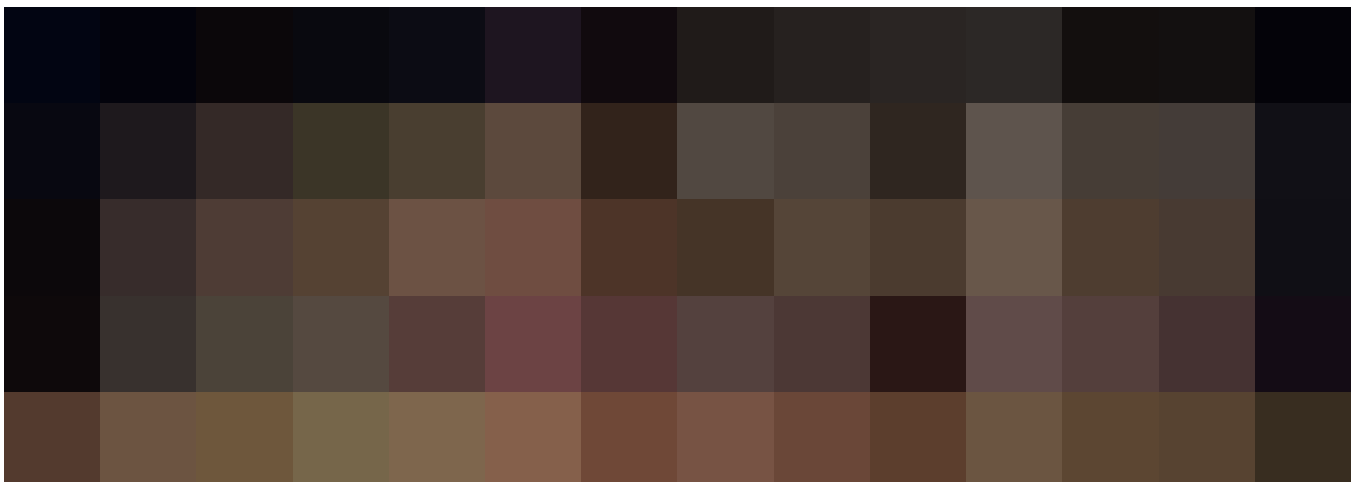
393. Maquette del Théâtre des Champs-Élysées, © Cité de l'architecture & du patrimoine/MMF/Gaston Bergeret.



391

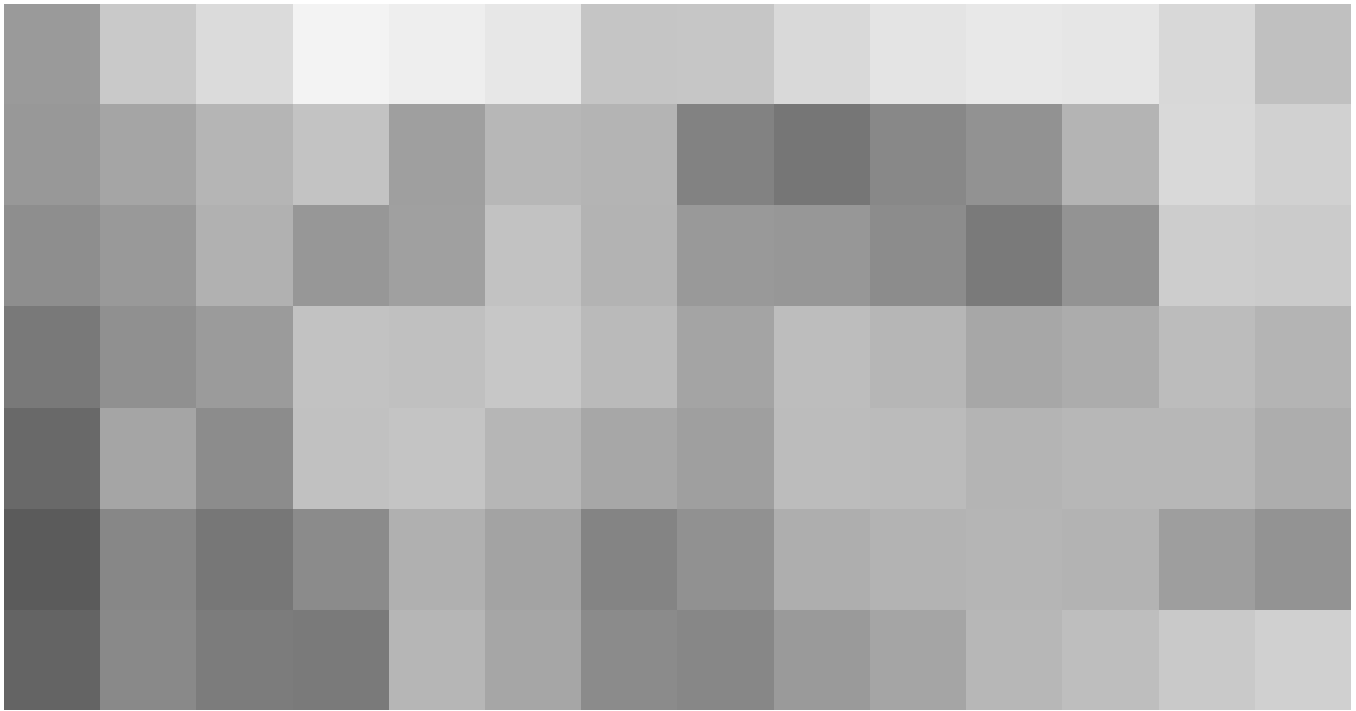


392



393

L'opera di Auguste Perret diventa determinante per lo sviluppo dell'architettura moderna in calcestruzzo armato poiché giunge ad elaborare un proprio linguaggio formalmente originale combinando alla tradizionale architettura neogotica un impiego appropriato del nuovo materiale costruttivo. Una scelta questa che si riflette in molti suoi progetti: l'atorimessa di rue Ponthieu a Parigi (1906) (fig.391), in cui il sistema portante in calcestruzzo a vista viene chiuso con vetri ornamentali e motivi geometrici; la Chiesa di Notre-Dame a Raincy presso Parigi (1922) (fig.392) in cui la struttura a telai gli consente di "dissolvere" le pareti e di adottare un involucro leggero costituito da grate di mattoni ornamentali; il Théâtre des Champs-Élysées a Parigi (1913) un lavoro prestigioso dei fratelli Perret in grado di sminuire l'eccelsa consulenza di Henri Van de Velde ed il progetto originario di Roger Bouvard a favore di una gabbia strutturale in calcestruzzo armato ed una innovativa facciata in lastre di travertino e cemento decorato montate a secco (fig.393). I Perret non portano solamente un contributo diretto alla storia dell'industrializzazione edilizia, ma la rigorosa compiutezza del concetto di struttura a gabbia in calcestruzzo armato e della definizione tecnica degli elementi di tamponamento in pietra (naturale e artificiale) e laterizio. Il nuovo sistema permette lo sviluppo della pianta libera, componente tecnica determinante per la rivoluzione distributiva del tema dell'alloggio operata dal Movimento Moderno.



394

Contemporaneamente alle realizzazioni dei Perret, Frank Lloyd Wright realizza oltreoceano lo Unity Temple a Oak Park, Illinois, «il primo monolito in calcestruzzo al mondo»²⁶⁰. Esso è tra i primi edifici realizzati interamente in calcestruzzo armato gettato in opera, sia quale elemento strutturale innovativo, sia come materiale di finitura superficiale. La scelta di impiegare questo materiale si rivelò dapprima vincente, in quanto costituì un'occasione per esaltarne le straordinarie potenzialità espressivo-formali e tecnologico-strutturali, consentendo di creare prospetti di grande effetto, con un interessante gioco chiaroscurale garantito dalla lavorazione superficiale del paramento di facciata (ottenuta aggiungendo una ghiaia speciale), scandito dalle grandi superfici vetrate e valorizzato mediante l'aggetto dei solai di copertura, permettendo di mettere in risalto la monumentalità del manufatto, la possibilità di creare spazi imponenti grazie all'impiego di grandi luci, ampie finestrate e superfici aggettanti d'impatto, mantenendo bassi i costi di costruzione (fig.394).

Una delle costruzioni più imponenti realizzata nel primo Novecento (1911-13) è la Jahrhunderthalle di Breslavia dell'architetto Max Berg, un'opera che doveva presentare

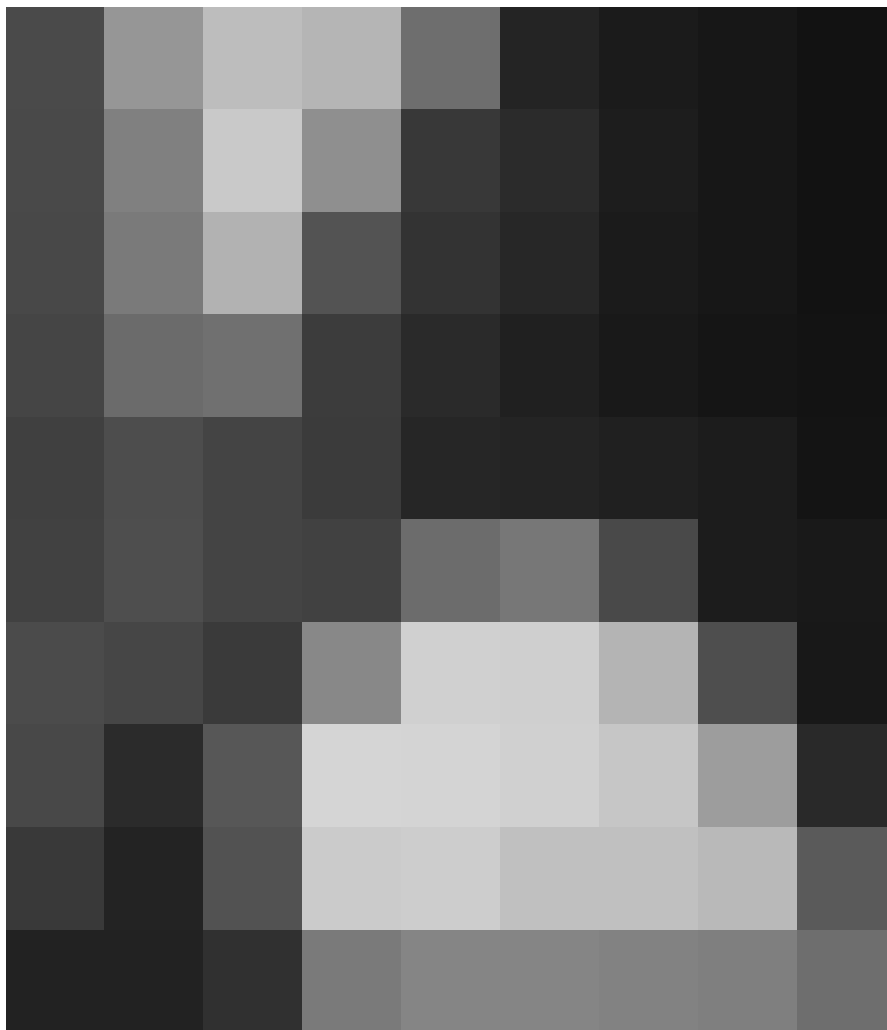
tutte le novità nel campo della tecnologia costruttiva, dominate dal calcestruzzo a vista impiegato tanto all'interno quanto all'esterno. Un colossale cupola con una luce di 65 m risultato dei più avanzati calcoli statici in grado di assicurarsi, dopo quasi 1800 anni, il primato di cupola in calcestruzzo armato più grande al mondo dopo quella del Pantheon di Roma (fig.395).

394. Frank Lloyd Wright, Unity Temple, Oak Park, Illinois, 1908.

395. Max Berg, Jahrhunderthalle, 1913.



395



396

396. Costruzione delle campate portanti in calcestruzzo armato realizzate con una enorme centina realizzata con correnti e tavole inchiodate di legno d'abeto a formare una struttura reticolare a tre componenti e spostata attraverso un sistema di carrelli piani.

397. Tipologie di involucri autoportanti o strutture a guscio in calcestruzzo armato: a) gusci cilindrici, b) gusci a bacino, c) gusci a vela, d) gusci a conoide, e) gusci a paraboloidi iperbolici.

Nasce l'involucro autoportante in calcestruzzo armato o struttura a guscio.

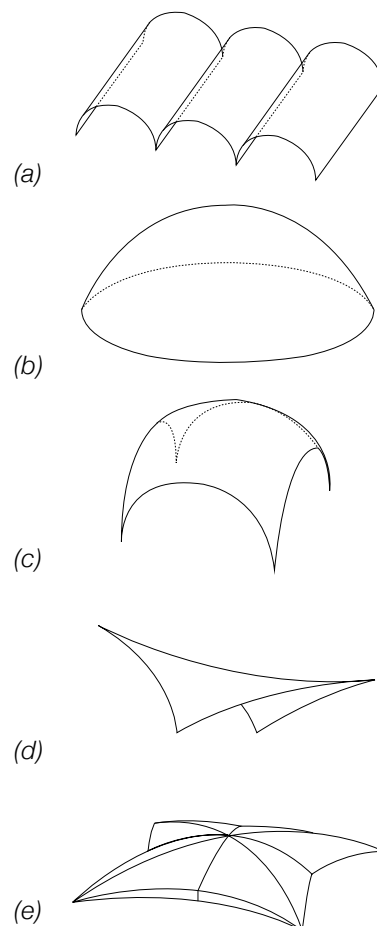
Tuttavia, la grande cupola di Marx Berg non sfrutta a pieno le possibilità costruttive offerte dal calcestruzzo rispetto, invece, al progetto dell'aviorimessa di Orly a Parigi di Eugène Freyssinet (Objat, 1879 – Saint-Martin-Vésubie, 1962) in cui la struttura parabolica a lastre portanti seguono le linee di pressione, eliminando la distinzione tra struttura portante e pareti. Nonostante la larghezza di 75m e le altezze comprese tra i 3 e i 5,40m, le lastre di calcestruzzo armato sono spesse solo 9 cm, una caratteristica che consente un enorme risparmio di materiale e la padronanza totale della tecnica, controllata ora dal punto di vista geometrico e matematico (fig.396).

Quest'opera ingegneristica aprì la strada per la progettazione di involucri autoportanti in calcestruzzo armato o *strutture a guscio* che negli anni successivi vide uno sviluppo rivoluzionario grazie agli espe-

rimenti di Franz Dischinger, Walter Bauersfeld, Ulrich Finsterwalder, Erich Mendelsohn ed Alvar Aalto.

La costruzione di gusci sottili in calcestruzzo armato, sia in opera che in prefabbricato, si deve al progresso della tecnica costruttiva del c.a. unitamente all'affinamento dei metodi di calcolo che hanno consentito di operare su stati tensionali bidimensionali e spaziali, sfruttando pienamente la capacità di resistenza dei materiali e raggiungendo elevate rigidità flessionali grazie alla conformazione curva, con un elevato rapporto tra luce e spessore. Con le strutture a guscio, oltre alle grandi luci è possibile raggiungere un elevato grado di conformabilità architettonica, dovuto in particolare alla "plasmabilità" del materiale. Le tipologie ricorrenti per le strutture a guscio sono:

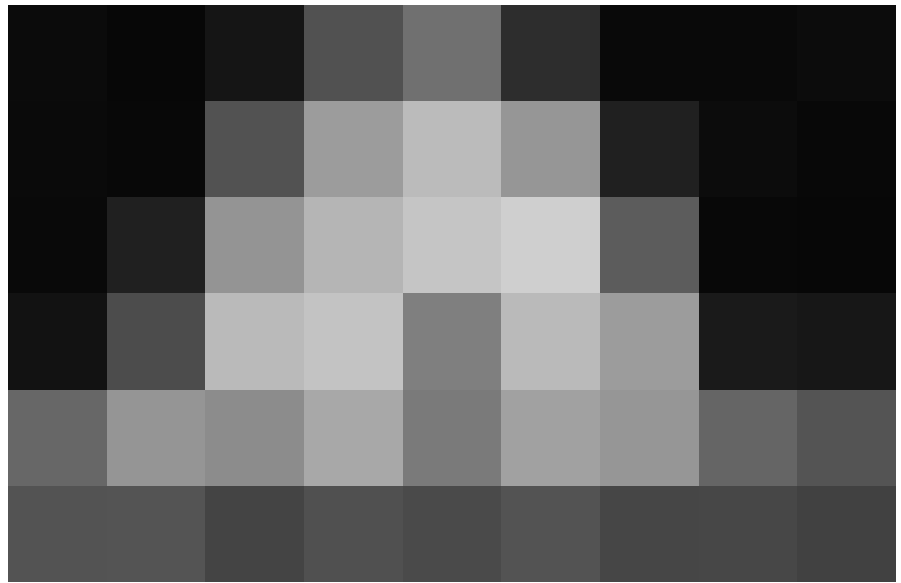
- gusci cilindrici;
- gusci a bacino (cupole);
- gusci a vela;
- gusci a conoide;
- gusci a paraboloidi iperbolici ²⁶¹ (fig.397).



397

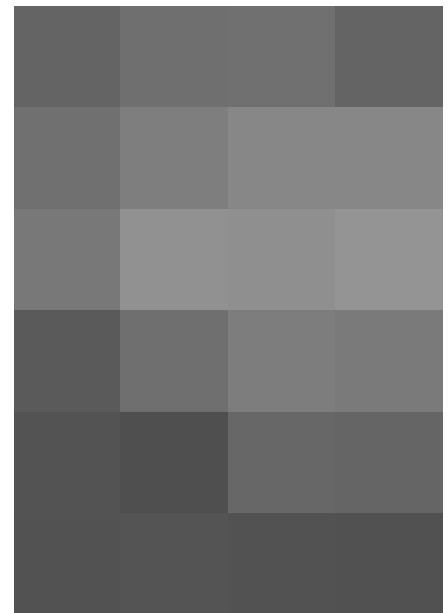
A partire dagli Anni Trenta le costruzioni a guscio in calcestruzzo armato permettono di realizzare grandi spazi, senza appoggi intermedi e con morfologie strutturali sino ad allora sconosciute. Il contributo dell'ingegnere Eduardo Torroja Miret (Madrid, 1899 – 1961) risulta determinante per questo tipo di costruzioni attraverso le sue opere più celebri: la cupola a guscio del Mercado de Abastos de Algeciras (1933), la tribuna del Hipódromo de la Zarzuela (1935) ed il Frontón Recoletos (1935) a Madrid (fig.398).

Nel 1939, in occasione dell'Esposizione Nazionale Svizzera, l'ingegnere Robert Maillart (Berna, 1872 – Ginevra, 1940) che dopo aver associato la sua creatività con le conoscenze teorico del maestro Hennebique, progetta la Zementhalle il padiglione a forma di guscio parabolico alto quasi dodici metri con uno spessore di soli 6cm (fig.399). Maillart riflette molto sulle caratteristiche del nuovo materiale affermando che «il calcestruzzo non cresce come il legno, non viene laminato come l'acciaio o messo insieme come la muratura, è essenzialmente un materiale colato in forme. Per questo suo aspetto è paragonabile alla ghisa, e forse possiamo proprio apprendere qualche cosa osservando le forme ottenute con la ghisa nelle quali non esistono passaggi bruschi fra i vari elemen-



399

ti, ma questi sono fra loro collegati in modo progressivo e continuo»²⁶². Maillart, inoltre, è autore nell'aver progettato e perfezionato molti elementi strutturali, come i *mushroom slab* (solaio a fungo) nel 1908²⁶³ a nervature ortogonali nei quali scompariva la canonica gerarchia soletta-trave-pilastro con quest'ultimo che nella sua forma elegante esprimeva il percorso delle forze dal piano orizzontale a quello verticale (fig.400). Una visione illuminata che nel 1936 gettò le basi concettuali dell'avveniristico progetto del Johnson Wax Administration Building in cui l'architetto Frank Lloyd Wright adottò per la maestosa Great Workroom delle particolari colonne ad albe-



400

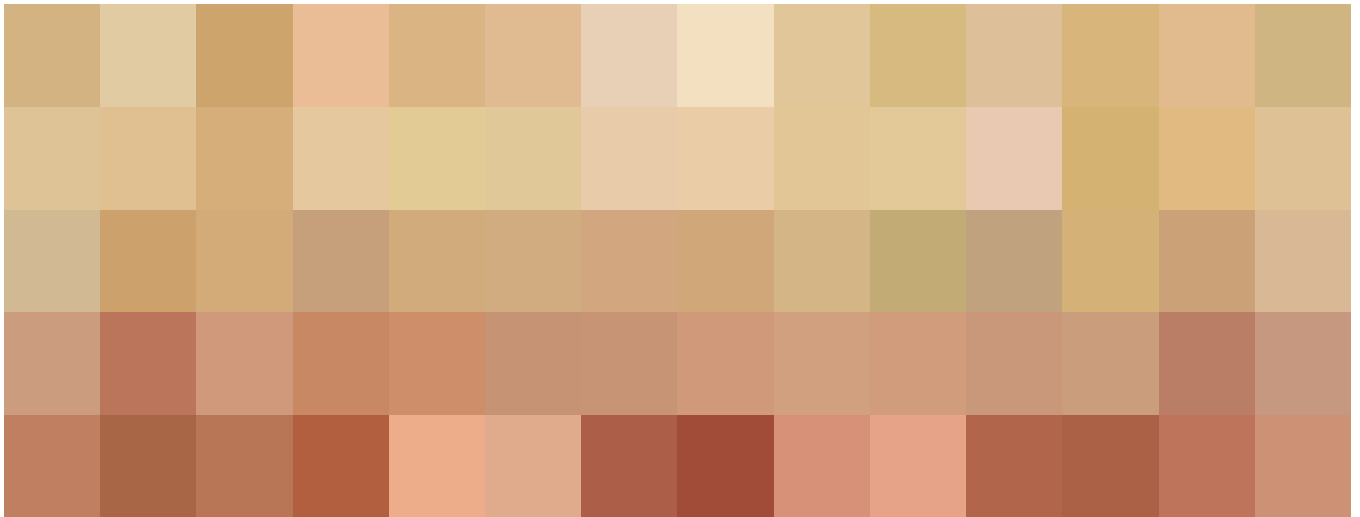


398

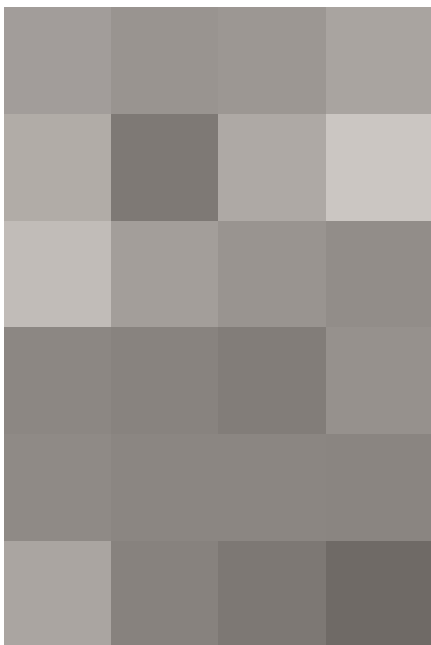
398. Eduardo Torroja Miret, Frontón Recoletos (1935) a Madrid. A destra: casseforme per la realizzazione del guscio trasparente a nervature triangolari, © Fondazione Eduardo Torroja.

399. Robert Maillart, padiglione Zementhalle costruito in occasione dell'Esposizione Nazionale Svizzera del 1939, © Hans Leuzinger - ETH-Bibliothek Zürich, Bildarchiv.

400. Robert Maillart, dettaglio del sistema mushroom slab (solaio a fungo) del magazzino dell'azienda Gerhard & Hey company a San Pietroburgo, 1912.



401



402



403

401. Interno della maestosa *Great Workroom* del *Johnson Wax Administration Building* progettato nel 1936 da Frank Lloyd Wright, © S. C. Johnson & Son.

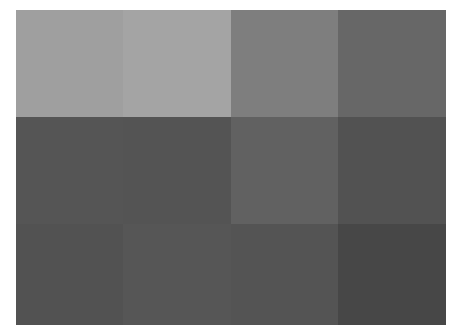
402. Test di integrità strutturale della colonna dendriforme progettata da Frank Lloyd Wright per la *Great Workroom* del *Johnson Wax Administration Building*, © S. C. Johnson & Son.

403. Posa in opera dell'involucro trasparente realizzato in tubi in vetro pyrex che rendono gli interni, destinati ad uffici, irradiati da una luce diffusa pur non consentendo la visione dell'esterno, © S. C. Johnson & Son.

404. Felix Candela, ristorante *Manantiales* di Xochimilco, Città del Messico, 1958.

ro che egli definì "dendriformi" con la base di soli 22,8cm di diametro ed il 'cappello' circolare nella parte superiore di 5,6m (fig.401). Nonostante l'incertezza e titubanza da parte della Wisconsin Industrial Commission e del committente H.F. Johnson, Wright convinse la platea un esperimento di integrità strutturale caricando le colonne con un carico di sessanta tonnellate, dieci volte maggiore il valore richiesto (fig.402). Il genio creativo di Wright non si focalizzò solo sulla parte strutturale, ma si estese anche allo studio dell'involucro trasparente di copertura costituito da oltre 70 km di tubi in *vetro pyrex* che rendono gli interni, destinati ad uffici, irradiati da una luce diffusa pur non consentendo la visione dell'esterno (fig.403).

Nel 1958 il ristorante *Manantiales* di Xochimilco è del tutto originale: otto paraboloidi iperbolici si sviluppano circolarmente come petali di un fiore. Il progetto è di Felix Candela (Madrid, 1910 – Durham, 1997) con lo stretto supporto dei fratelli Alvarez Ordones che scelgono di utilizzare il calcestruzzo armato per realizzare le loro idee più audaci (fig.404).

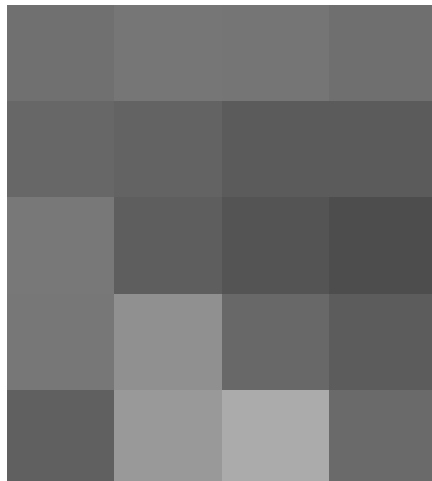


404

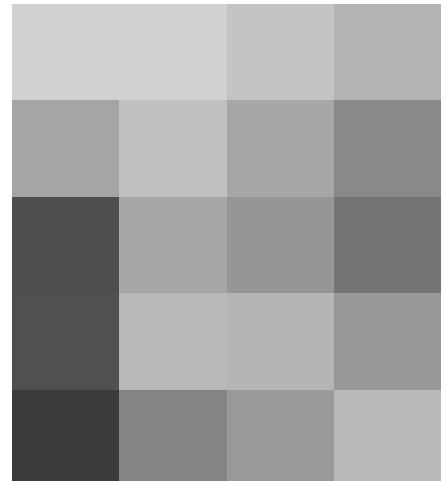
A conquistare il mondo delle costruzioni nel settore delle strutture a guscio in calcestruzzo armato è l'ingegnere Pier Luigi Nervi (Sondrio, 1891 – Roma, 1979) che elabora un linguaggio formale del tutto indipendente sfruttando appieno il potenziale plastico del calcestruzzo plasmandolo a espressioni fino ad allora sconosciute. Nonostante la formazione tecnica Nervi adotta nella progettazione un approccio intuitivo-empirico; nei suoi scritti, infatti, emerge come considerasse il supporto matematico quasi un vincolo alla creatività²⁶⁴. Questo profilo equilibrato tra tecnica e fisionomia architettonica è il tratto distintivo della Scuola d'ingegneria italiana che alla metà degli anni sessanta si trova ad affrontare l'*exploit* del miracolo economico fornendo lo spirito accademico per la ricostruzione delle grandi opere italiane, dall'autostrada del sole con i suoi quattrocento ponti, ai grattacieli milanesi di Arturo Danusso, Melchiorre Bega e dei fratelli Soncini, dalle cupole di Nervi, ai ponti di Silvano Zorzi, Sergio Muscmeci e Riccardo Morandi (figg.405-408).

Per Nervi il sistema portante è l'elemento formale più importante della costruzione. Nel 1935 disegna una aviorimessa coperta da un'unica superficie ad arco di 400 m², realizzata nel 1936 a Orvieto. La semplice struttura di travi a vista che si incrociano diagonalmente è sorretta solo da sei montanti (fig.409).

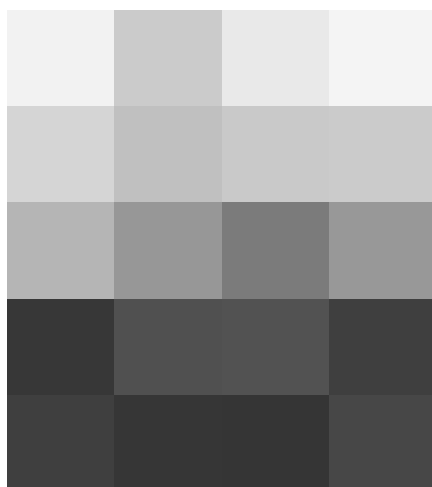
Le prime esplorazioni di Nervi iniziano nel 1950 quando invitato dall'Università di Buenos Aires, parte per il Sud America. Dell'esperienza argentina restano solo i progetti sulla carta di una gigantesca aviorimessa di 180 m di luce e un grattacielo alto 32 piani. Nel 1952 la prima vera opportunità arriva da Ernesto Nathan Rogers (Trieste, 1909 – Gardone Riviera, 1969) che lo individua come figura ideale per la partecipazione al progetto della sede UNESCO di Parigi, in collaborazione con Bernard Louis Zehrfuss (Angers, 1911 – Neuilly-sur-Seine, 1996) e Marcel Breuer (Pécs, 1902 – New York, 1981)²⁶⁵.



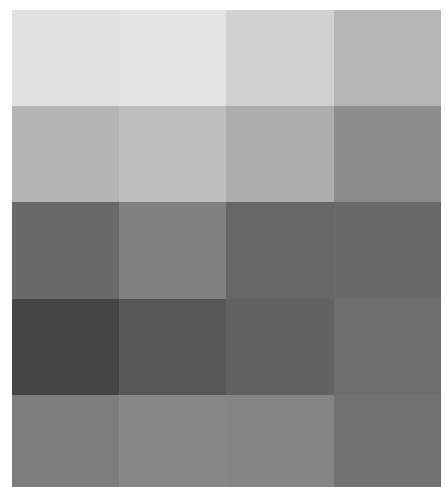
405



406



407

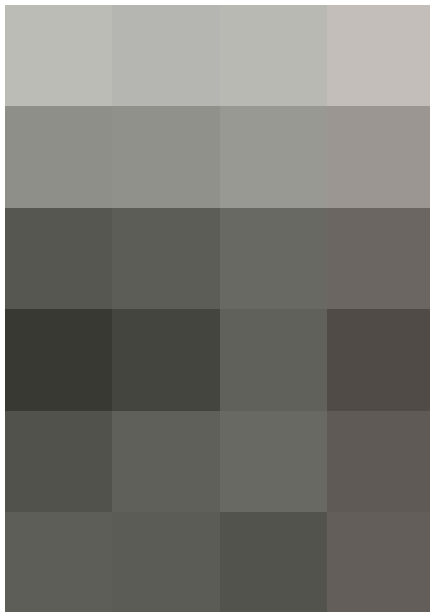


408



409

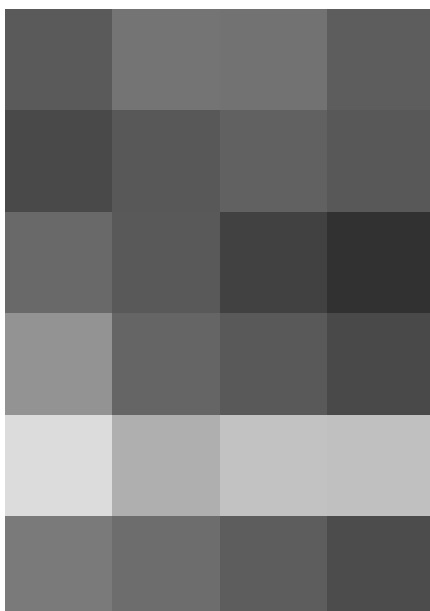
Sarà solo con il completamento del palazzetto dello Sport a Roma nel 1960 affinché la fama internazionale di Nervi si moltiplichi, tramutandosi da imprenditore a progettista in quella che Sergio Poretti ha definito la sua «terza vita»²⁶⁶ (fig.411). Quindi, mentre la sperimentazione della Nervi & Bartoli è in pieno svolgimento, la terza vita vede l'ingegnere italiano vestire i panni del titolare dello Studio Nervi. Numerosi sono i progetti nazionali ed internazionali che si susseguono, molti in collaborazione con importanti società estere come: il progetto per la cattedrale di New Norcia a Perth (1958), la George Washington Bridge Bus Terminal a New York (1962), la torre della Borsa a Place Victoria a Montreal progettata insieme con Luigi Moretti (1962), Chiesa nel quartiere Anic a Ravenna (1963), la Officina carte valori della Banca d'Italia a Roma (1963), la Australian Tower a Sidney (1964), il Memorial Fermi a Chicago (1964), la Field House al Dartmouth College (1967), la Cattedrale di St. Mary a San Francisco progettata con Pietro Belluschi (1967), Il Palazzo dello Sport a Norfolk, Virginia (1967), il centro sportivo a Kuwait City (1968), il progetto non realizzato per il ponte sullo stretto di Messina (1969), l'Ambasciata d'Italia a Brasilia con l'impiego dei pilastri tetrapodi (1969), il Good Hope Center a Cape Town (1970). Nella maggior parte di questi progetti è possibile leggere i caratteri essenziali del Sistema Nervi: le superfici nervate realizzate con l'impiego di casseri a perdere in ferrocemento o in calcestruzzo armato ordinario; le volte a profilo parabolico e ribassate di copertura a maglia triangolare; le fitte tessiture realizzate con tavelloni romboidali (fig.412), i solai a nervatura isostatiche - ottimizzazione resa possibile con la prefabbricazione strutturale (fig.413), le coperture dei corpi secondari (fig.414), i pilastri tetrapodi sagomati (fig.415), i plastici cavalletti (fig.416) e numerosi altri espedienti tecnici che fanno di Nervi, una figura dedicata alla sperimentazione di forme nuove spingendo al limite le caratteristiche tecniche del calcestruzzo armato.



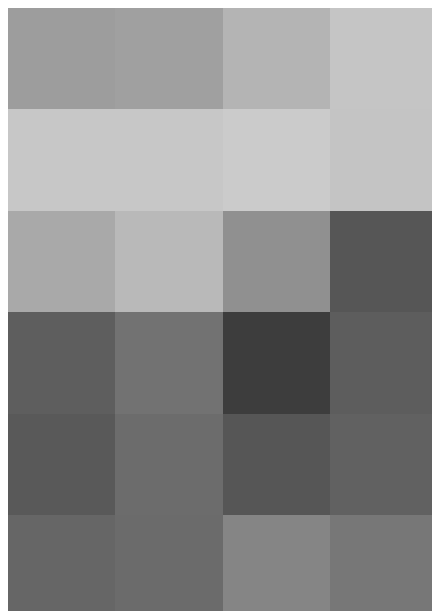
411



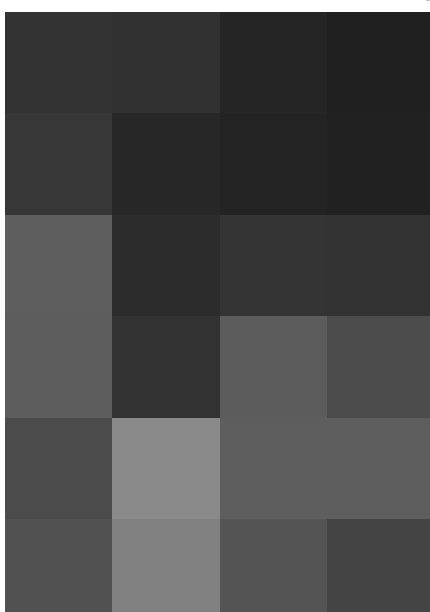
412



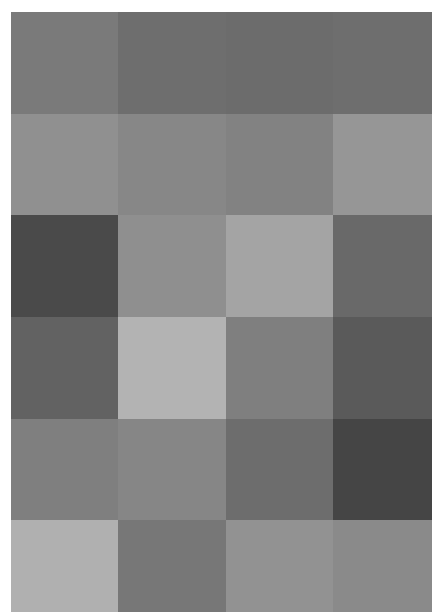
413



414



415



416

405. Nelle pagine precedenti: autostrada del Sole, © Archivio storico Autostrade per l'Italia.
406. Nelle pagine precedenti: Arturo D'Annunzio, Torre Velasca, Milano, 1957, © Paolo Monti - BEIC Biblioteca Europea d'Informazione e Cultura.
407. Nelle pagine precedenti: Riccardo Morandi, Ponte sul Polcevera, Genova, 1960-67, © Arno Hammacher.
408. Nelle pagine precedenti: i grattacieli di Milano negli Anni '60: Torre Galfa (in primo piano), Grattacielo Pirelli (sul fondo) e la Torre Servizi Comunali (a sinistra), © Giovanni Basilico.
409. Nella pagina precedente: Pier Luigi Nervi, Aviorimessa di Orvieto, © University of Michigan Photographic Services.
410. Nelle pagine precedenti: Pier Luigi Nervi in visita al George Washington Bridge Bus Terminal, New York, 1962, © NYC Municipal Archives WNYC Collection.
411. Pier Luigi Nervi, Palazzetto dello Sport in costruzione, Roma, 1960, © MAXXI - Museo Nazionale delle arti del XXI secolo.
412. Pier Luigi Nervi, particolare delle fitte testiture realizzate con tavelloni romboidali (brevetto n.465636 del 1950) dell'intradosso dell'iperbolica copertura della Cattedrale di New Norcia, Perth, 1968.
413. Pier Luigi Nervi, particolare del solaio a nervature isostatiche (brevetto n. 45678 depositato dalla Società Nervi & Bartoli il 23 Luglio 1949) del Lanificio Gatti, Roma, 1951.
414. Pier Luigi Nervi, particolare della copertura del Good Hope Center, Cape Town, 1970.
415. Pier Luigi Nervi, particolare dei pilastri tetrapodi dell'Ambasciata d'Italia a Brasilia, 1969.
416. Pier Luigi Nervi, particolare dei cavalletti del Palazzetto dello Sport, Roma, 1960.
417. Nella pagina successiva: costruzione della copertura del Palazzo delle Esposizioni di Torino realizzato con elementi prefabbricati a conci d'onda.
418. Nella pagina successiva: Brevetto n.429331 - Ferrocemento. Operai durante la realizzazione delle pareti in ferrocemento del Padiglione alla Magliana, Roma, 1944, © Fondo P.L. Nervi, Centro Archivi Architettura, MAXXI, Roma.
419. Nella pagina successiva: Brevetto n.445781 - Conci d'onda. Sezione di un elemento prefabbricato in ferrocemento della tipologia conci d'onda.

Fin dalle prime esperienze con il sistema Hennebique e con l'apprendistato presso gli studi pionieristici di Silvio Canevazzi e Attilio Muggia, Pier Luigi Nervi si è sempre distinto per le capacità innovative nella modellazione del calcestruzzo armato. I limiti imposti dall'autarchia nell'utilizzo della tecnica costruttiva a seguito delle Sanzioni Economiche del 1935 lo costringe a rimodulare completamente il suo approccio alla progettazione in un processo di rinnovamento che si caratterizza a partire dalle costruzioni delle aviorimesse prefabbricate per l'Aeronautica italiana nel dopoguerra. Sarà questo processo di costruzione esteticamente efficace, ma economica e rapida a rappresentare il punto di partenza per i successivi perfezionamenti strutturali che sanciranno la fama mondiale dell'ingegnere. Questo stile di costruzione inedita si tramuterà nel *Sistema Nervi*, una serie di invenzioni protette da privative industriali. La sperimentazione più importante riguarda il Ferrocemento, brevettato (n.429331) da Nervi nel 1939 durante le restrizioni autarchiche e costituito da una fitta maglia metallica sottile inglobata nel conglomerato cementizio applicato a mano o con cazzuola per spessori non superiori a 3 cm. «*Il ferrocemento è un materiale nuovo, che si presta a una nuova concezione statica, figurativa e soprattutto esecutiva: con un comportamento intermedio tra l'acciaio e la pietra artificiale, è leggero, duttile, straordinariamente resistente, isotropo, richiede in proporzione assai meno armatura del cemento armato ordinario e può assumere, senza bisogno di casseforme di legno, qualunque geometria, anche più complessa a doppia curvatura inversa, resistente per forma*»²⁶⁷.

A questo innovativo sistema fa riferimento il brevetto della prefabbricazione industriale (n.377969) con l'intento di proteggere il «*procedimento di scomposizione geometrica della struttura in parti piccole, da prefabbricare a terra e poi montare, su ponteggi leggeri, collegandole con piccoli getti in opera*»²⁶⁸.

Nervi, dunque, rinnega la tradizionale tecnica del getto integrale monolitico tipico del sistema Hennebique, a favore di un sistema di assemblaggio di elementi prefabbricati fuori opera.

Così Nervi sviluppa e brevetta tra il 1948 ed il 1950 i *conci d'onda* (brevetto n.445781) ed il *tavellone romboidale* (brevetto n.465636). Il primo sistema è utilizzato per la realizzazione di strutture cementizie ondulate o curve con o senza tensione preventiva, resistenti per forma (anziché per massa) che consentono un notevole risparmio di materiale. Sono realizzate con diaframmi prefabbricati in ferrocemento, mutualmente incastrati tra loro e solidarizzati con nervature in calcestruzzo armato gettato in opera in corrispondenza dei profili curvi. Il secondo sistema, invece, riguarda dei tavelloni in ferrocemento che funzionano come casseforme a perdere per il getto delle nervature. Sono ottenuti su una dima e replicati con un procedimento matricale di matrici e contromatrici, che consente di fabbricare con il sistema "nonna, figlia mamma". In quest'ultimo sistema, il tracciamento degli "spicchi" romboidali sulla dima litica avviene secondo le antiche tradizioni grafiche del tracciamento, tipiche conoscenze segrete dei maestri muratori e degli scalpellini costruttori delle grandiose cattedrali gotiche.

Anche il principio del solaio a nervature isostatiche (brevetto n.455678) persegue il rapporto estetico/economia sviluppato con l'autarchia, realizzato con casseforme in ferrocemento mobili secondo un procedimento già ampiamente sperimentato nel cantiere del Lanificio C. Gatti a Roma (1951). Si tratta di un perfezionamento nella costruzione di solai, volte, cupole, travi-parete e strutture portanti in genere a due o tre dimensioni, con disposizione delle nervature resistenti lungo le linee isostatiche dei momenti o degli sforzi normali.

Di seguito sono riassunti i principali brevetti di Pier Luigi Nervi.

Prefabbricazione industriale

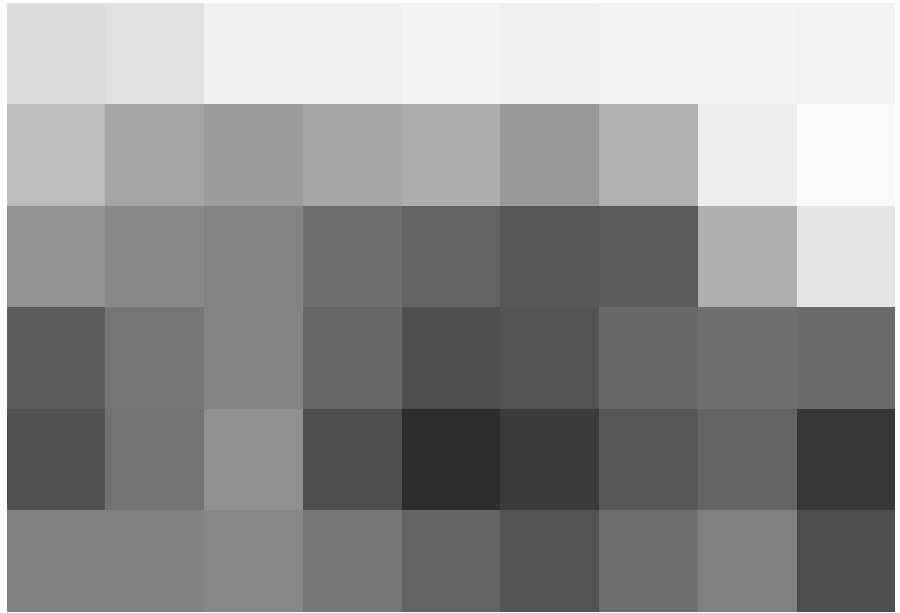
Brevetto n.377969

Titolare: Società Bartoli & Nervi

Data deposito: 09/11/1939

Descrizione: il brevetto descrive il processo di prefabbricazione industriale con l'intento di ridurre i tempi di costruzione e le spese delle opere. Si sviluppa attraverso l'impiego del cassettonato che consente di limitare lo spessore del calcestruzzo tra le nervature - permettendo un notevole risparmio di materiale - e di scomporre la copertura in componenti standardizzate, preparate a terra attraverso l'impiego di casseforme metalliche riutilizzabili.

Esempio: Aviorimessa di Orvieto.



417

Ferrocemento

Brevetto n.429331 e n.406296

Titolare: Società Bartoli & Nervi

Data deposito: 09/11/1939

Descrizione: il ferrocemento è un materiale composito, nato durante il periodo dell'autarchia, quando in Italia viene limitato l'impiego del calcestruzzo armato. Nervi brevetta una soluzione alternativa utilizzando strati di reti metalliche inglobate nel conglomerato cementizio. Il materiale è caratterizzato da elevata resistenza, leggerezza, economicità, plasticità ed elasticità.

Esempio: Padiglione della Magliana, Roma, 1945.



418

Conci d'onda

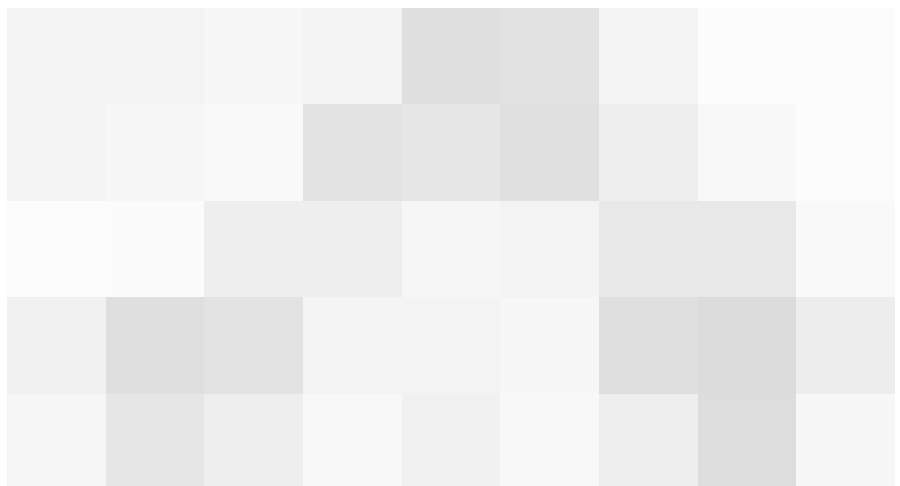
Brevetto n.445781

Titolare: Società Bartoli & Nervi

Data deposito: 26/08/1948

Descrizione: utilizzato per la realizzazione di strutture cementizie ondulate o curve con o senza tensione preventiva, resistenti per forma (anziché per massa) che consentono un notevole risparmio di materiale. Sono realizzate con diaframmi prefabbricati in ferrocemento, mutualmente incastrati tra loro e solidarizzati con nervature in calcestruzzo armato gettato in opera in corrispondenza dei profili curvi.

Esempio: Salone B del Palazzo delle Esposizioni di Torino, 1948.



419

Tavellone romboidale

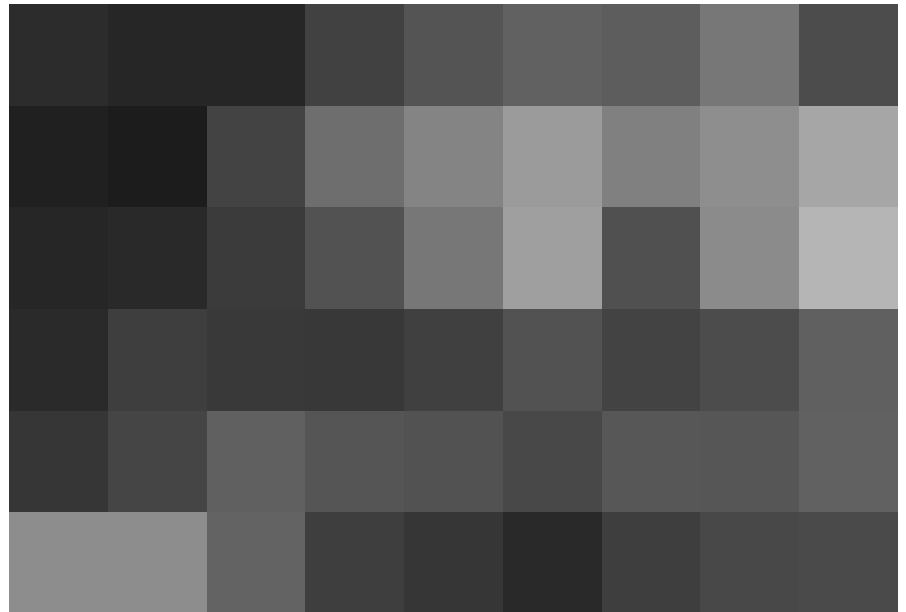
Brevetto n.465636

Titolare: Società Bartoli & Nervi

Data deposito: 19/05/1950

Descrizione: i tavelloni sono in ferrocemento e funzionano come casseforme a perdere per il getto delle nervature. Sono ottenuti su una dima e replicati con un procedimento matriarcale di matrici e contromatrici, che consente di fabbricare con il sistema "nonna, figlia mamma" «*tredici nonne, da cui ottenere diverse mamme e, infine, produrre centootto figlie identiche*»²⁶⁸.

Esempio: Magazzini del Sale, Margherita di Savoia, 1949-51.



420

Solaio a nervature isostatiche

Brevetto n.455678

Titolare: Società Bartoli & Nervi

Data deposito: 23/07/1949

Descrizione: perfezionamento nella costruzione di solai, volte, cupole, travi-parete e strutture portanti in genere a due o tre dimensioni, con disposizione delle nervature resistenti lungo le linee isostatiche dei momenti o degli sforzi normali. Il successo della tipologia fu dovuto ad approfonditi studi teorici e all'impiego del ferrocemento prefabbricato in apposite casseforme a perdere.

Esempio: Lanificio C.Gatti e C., Roma, 1951.



421

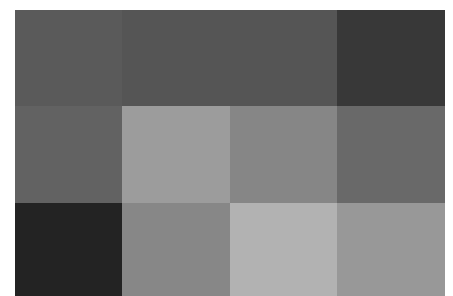
Pilastri tetrapodi e pilastri a fungo

Brevetto n.-

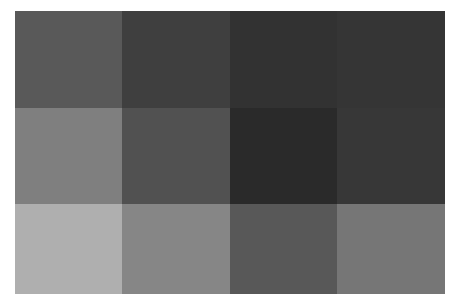
Titolare: Privativa Industriale

Data deposito: -

Descrizione: il pilastro tetrapode è l'elemento strutturale cardine dell'architettura di Nervi. Si tratta di un pilastro a sezione ottagonale che si apre in sommità con quattro braccia su cui poggia la piastra del solaio in calcestruzzo armato. Anche il pilastro a fungo fa parte del ricco repertorio delle strutture di Nervi, sostituito successivamente con il pilastro a geometria variabile sormontato da una raggiera di travi in acciaio.
Esempio: Ambasciata Italiana, Brasilia, 1969.



422



423

420. Brevetto n.465636 - Tavellone romboidale. Tavelloni romboidali utilizzati per la costruzione della copertura del Palazzetto dello Sport di Roma, 1960.

421. Brevetto n.455678 - Solaio a nervature isostatiche. Casseforme per la realizzazione del solaio a nervature isostatiche del Lanificio C.Gatti e C., Roma, 1951.

422. Pier Luigi Nervi, particolare dei pilastri tetrapodi dell'Ambasciata d'Italia a Brasilia, 1969.

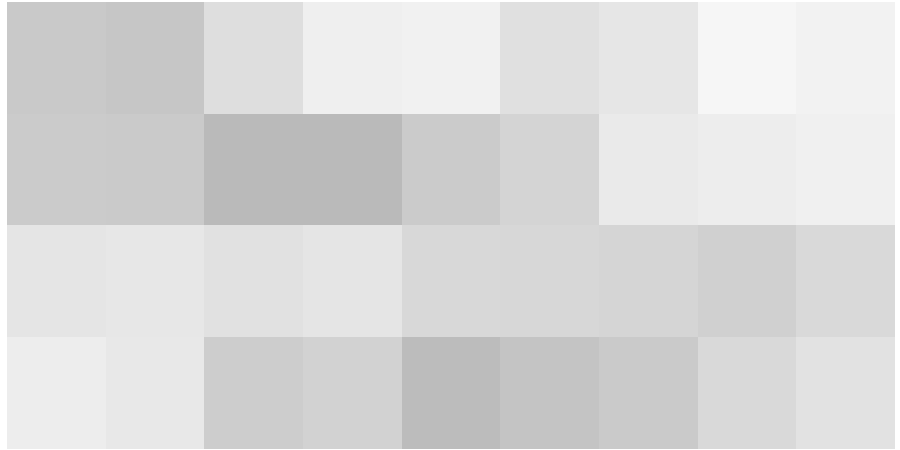
423. Pier Luigi Nervi, Sala ristorante dello stabilimento balneare Kursaal al Lido di Castelfusano, Roma, 1950, © Archivio Pier Luigi Nervi, Collezione MAXXI Architettura.

Con questi personaggi illustri si chiude con molta probabilità la stagione dei successi dell'*Italian Style* e della compressione del calcestruzzo armato, durato quasi un secolo. Tutti i successivi autori hanno creato nuovi spazi architettonici, nuovi segni ed innovativi involucri, reinterpretando oggetti e forme, ma dal punto di vista concettuale più nulla è stato aggiunto, sia per quanto riguarda l'interpretazione dei meccanismi che di nuove forme strutturali. Le uniche speranze per la nascita di nuove forme di architettura sono riposte nel cosiddetto *form-finding* (già affrontato nel paragrafo "Costruzione a tenda" del presente capitolo), introdotto empiricamente dalla genialità di Frei Otto e dalle brillanti sperimentazioni di Silvano Zorzi (fig.424) e di Sergio Musmeci (fig.425).

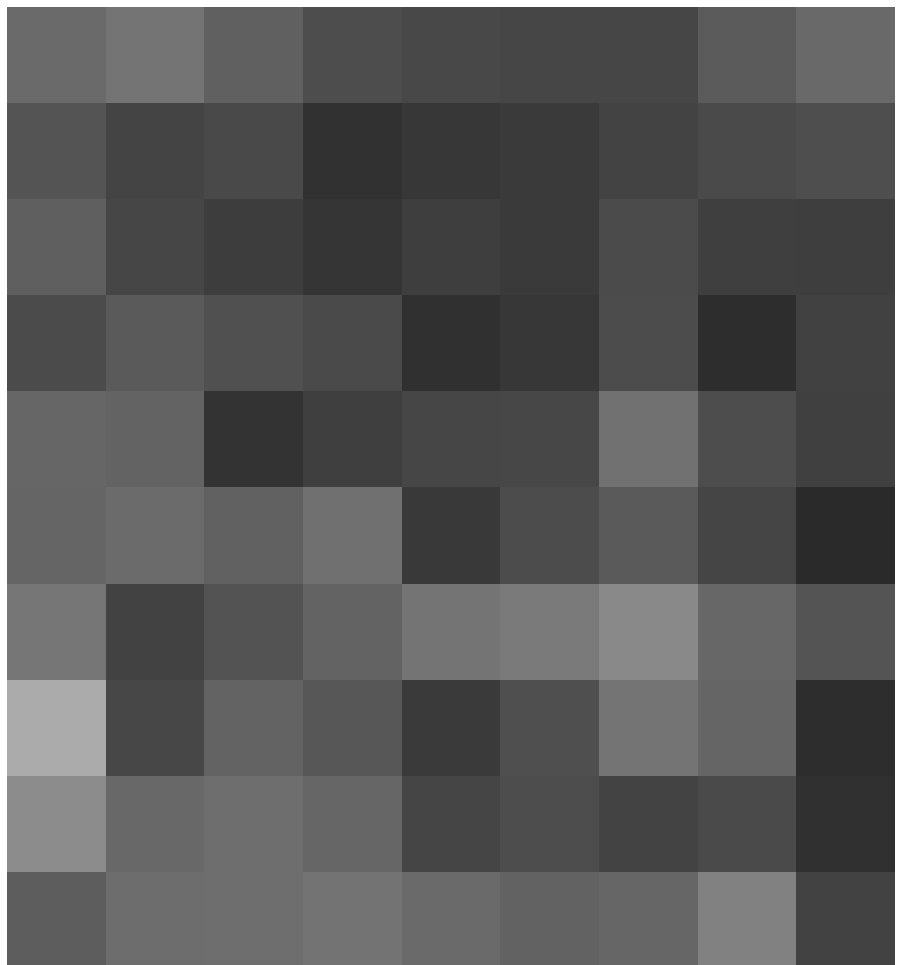
Nemmeno con l'evoluzione del calcestruzzo strutturale ad alta resistenza si è manifestato un momento di massima sperimentazione come quello vissuto nel trentennio 1900-30, la cui testimonianza è demandata semplicemente a grandiosi grattacieli in e strutture più snelle, efficienti e leggere²⁶⁹.

Sempre durante gli anni in cui la Scuola Italiana di Ingegneria raggiunge l'apice della fama internazionale, molti architetti italiani operanti fuori dai confini italiani si cimentano in progettazioni ardite, spinte a volte fino all'utopia. Tra questi Paolo Soleri (Torino, 1919 – Cosanti, 2013) che trasferitosi stabilmente in Arizona, interpreta ed esplora in maniera del tutto personale l'impiego del calcestruzzo armato per ottenere visionarie strutture a guscio. Progetta nel 1948 il The Beast Bridge, una soluzione di grande impatto visivo, ma anti-economica, ammonito da Nervi nel 1959 in un numero della rivista Casabella.

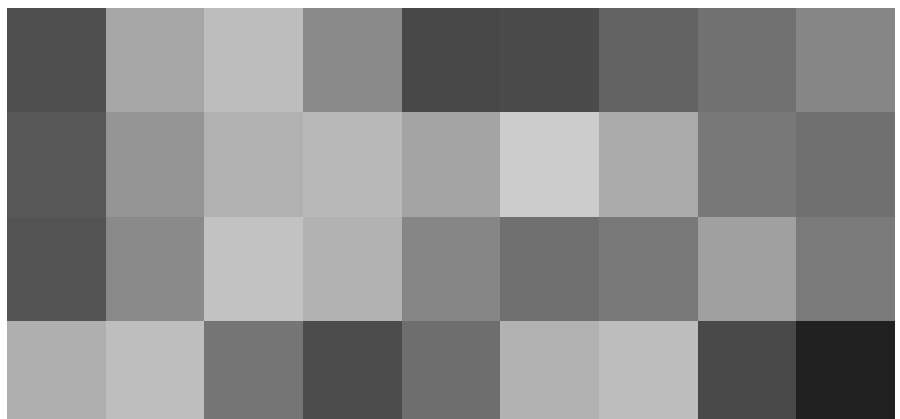
Due anni più tardi torna in Italia per seguire la progettazione dell'unica sua architettura realizzata sul territorio nazionale: la fabbrica di ceramiche Solimene a Vietri sul Mare (fig.427), «dove l'involucro aderisce al concetto di uno spazio continuo,



424



425



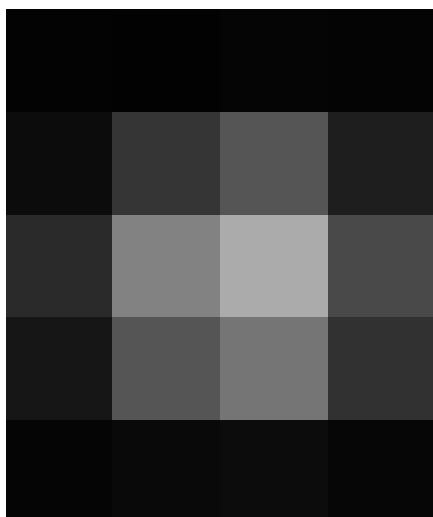
426



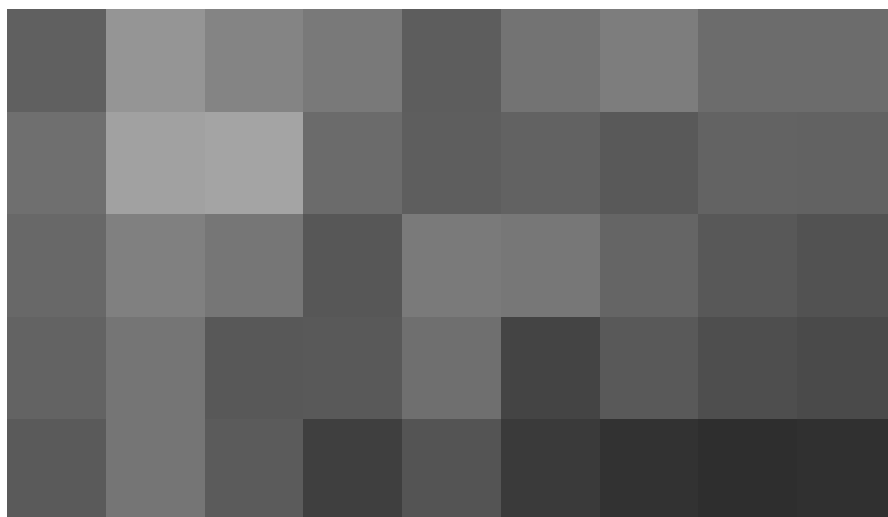
427



428



429



430

424. Nella pagina precedente: Silvano Zorzi, progetto per la realizzazione del ponte sul Rio Guayllabamba in Ecuador (1968), © Ministerio de obras publicas.

425. Nella pagina precedente: Sergio Musmeci, copertura dell'Auditorium del Centro ricerche atomiche di Trombay, India, 1960. Sorprende nell'immagine storica la fase di getto del conglomerato mediante "betoniere umane" allineate per eseguire a mano, con secchi e ceste, i complicati getti, Collezione MAXXI Architettura.

426. Nella pagina precedente: Paolo Soleri, The Beast Bridge, 1948, © Atlas Cement Corporation.

427. Paolo Soleri, Fabbrica di ceramiche Solimene, Vietri sul Mare, 1950.

428. Dettaglio della facciata realizzata con vasi di ceramica policroma.

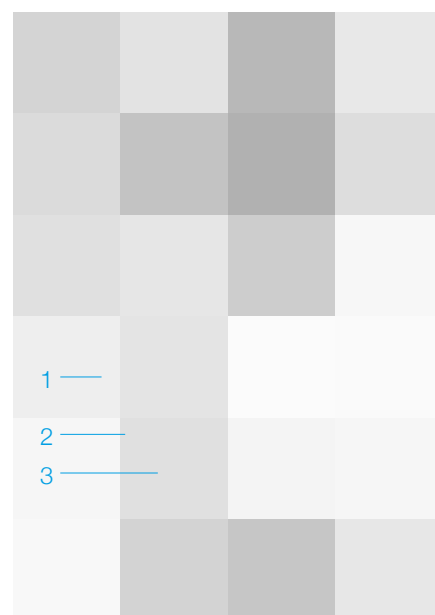
429. Vaso di ceramica, © Cardellicchio L.

430. Costruzione della facciata, © Fondazione Cosanti, Archivio Soleri, 1953.

431. Dettaglio della facciata. Legenda: 1 vaso, 2 malta cementizia, 3 filo metallico.

non gerarchico ma unitario, in osmosi con l'ambiente circostante. Una forma architettonica inaudita, ma veicolata da un linguaggio materiale e formale familiare ai luoghi»²⁷⁰. Una struttura organica in calcestruzzo armato con pilastri dendriformi plasmato nella massa vernacolare e della superficie curva, a coni dritti e rovesci; un volume fluente e continuo punteggiato da 16.000 vasi di ceramica policroma grezzi e smaltati che oltre a rappresentare il manifesto della fabbrica di ceramica, migliorano la coibenza termica del sistema parete, interrotto solamente da fasce vetrate triangolari (fig.428). I vasi cavi sono posti in opera con malta cementizia: la parte interna presenta un collo discoidale per favorire il piegamento del cavo di acciaio protetto poi da uno strato sottile di malta (figg.429-431). Un sistema di involucro che, nonostante nessuna affinità, ricor-

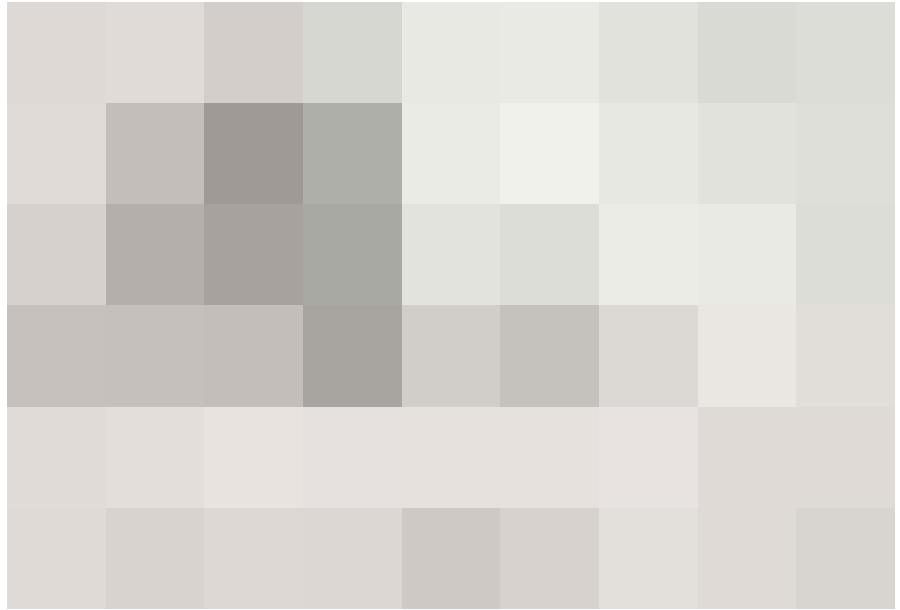
da il sistema tradizionale di alleggerimento delle volte con le *bubbole*, tubi fittili in terracotta impiegati in molte località Meridionali, in modo particolare nel materano²⁷¹.



431

Negli anni '60 fonda a Cosanti una scuola di pensiero basata sui concetti dell'*Arcologia*, sintesi di due discipline, *Architettura* ed *Ecologia* che si fondono per dare vita ad un nuovo progetto di città autosufficienti ad alta densità di popolazione. Concentrazione e complessità sono, secondo Soleri, la soluzione per una città nuova e più efficiente, come *Arco-santi*, due grandi strutture avvolgenti in grado di accogliere 5000 persone (fig.432); *Arcodiga* una macrostruttura alta 750 m in grado di inglobare pezzi di città dai toni futuristici.

Nel 1962 anche Vittorio Giorgini (Firenze, 1926 – Firenze, 2010) giunge negli Stati Uniti dopo aver realizzato in Italia due particolari abitazioni: Casa Esagono (1957) e Casa Saldarini a Baratti, Livorno (1962) (fig.433). Quest'ultima, in modo particolare, è considerata il primo esempio di architettura realizzata con una membrana isoelastica di rete e cemento, anticipatrice dei moderni esempi di *architettura blob* movimento architettonico contemporaneo in cui le costruzioni assumono una forma amebiforme²⁷². Esempi di blobitettura trovano massima espressione negli anni '60 con gli Archigram, del quale Peter Cook (Southend-on-Sea, 1936) è il maggiore esponente. Proprio quest'ultimo insieme a Colin Fournier progetta nel 2003 la Kunsthhaus in Graz (Austria), un edificio a forma di bolla protetto da una pelle in lastre di plexiglas (figg.434-436).



432



433

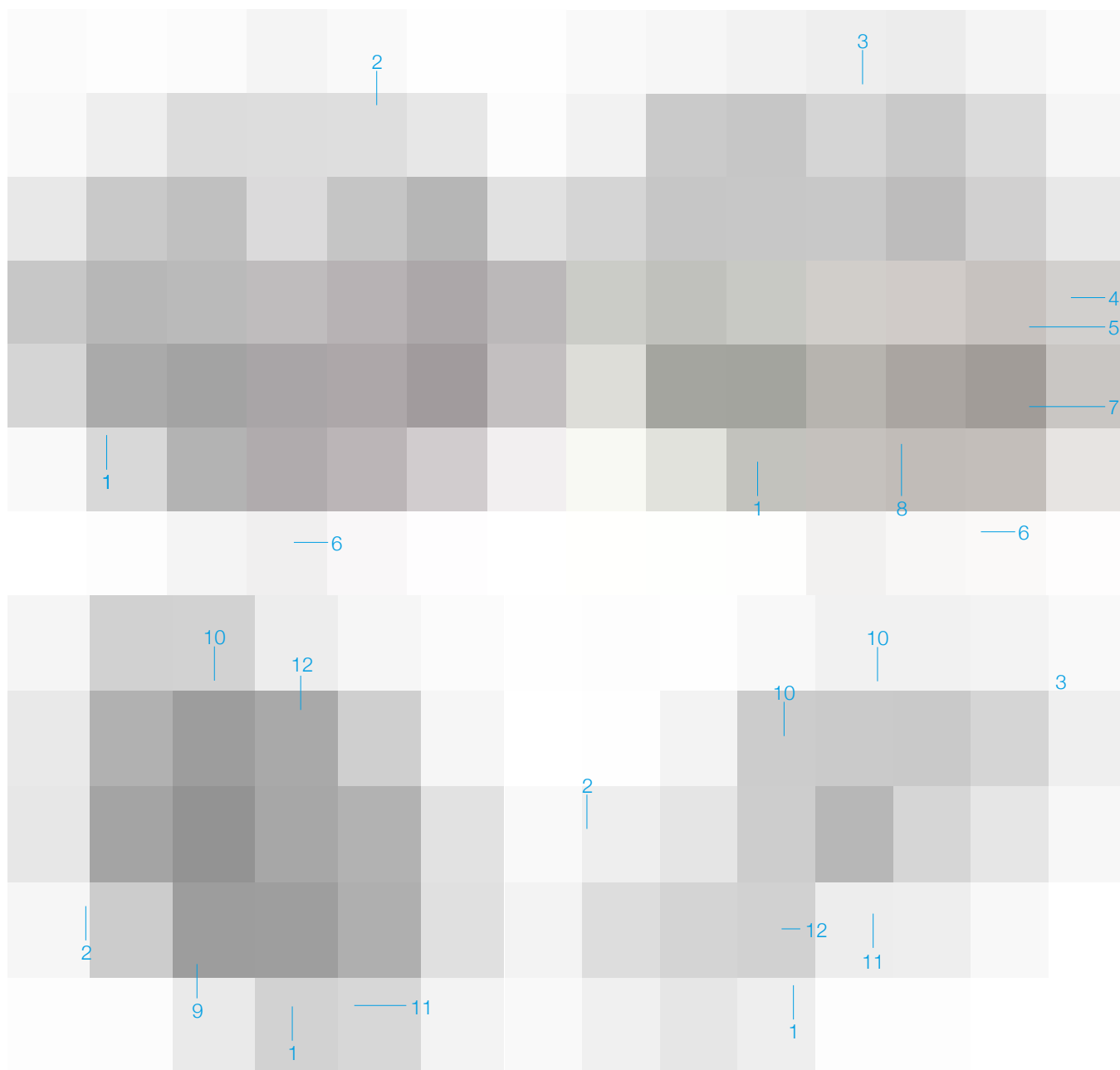


434

432. Paolo Soleri, Arcosanti 5000, 1970, © Fondazione Cosanti, Archivio Soleri.

433. Vittorio Giorgini, Casa Saldarini, Baratti, Livorno, 1962, © Associazione B.A.Co. – Archivio Vittorio Giorgini.

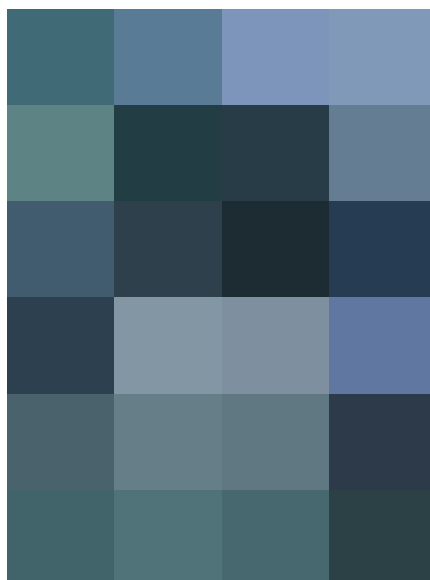
434. Peter Cook, Kunsthhaus, Graz (Austria).



435

435. Dettaglio dell'involucro del Kunsthaus.
 Legenda: 1 Sistema di illuminazione BIX e supporto puntiforme, raccordi in gomma EPDM, 2 Pannelli in polimetilmetacrilato (1,4 x 2,8 m), 3 Pannelli triangolari di tessuto in filo metallico fissati su struttura di acciaio bidirezionale, 4 pavimento e sottopavimento in calcestruzzo (10cm), 5 soletta nervata in calcestruzzo armato, 6 pilastri in acciaio, 7 travi in acciaio a doppio "T" ricoperte di vermiculite a spray, 8 barriera al vapore rigida applicata su telaio in profili di acciaio, 9 tubazioni antincendio imbullonate alla facciata, 10 doppio strato isolante in schiuma di vetro adesiva (16cm), 11 membrana impermeabilizzante sintetica, 12 cavidotto per impianto elettrico della facciata.

436. Dettaglio dell'involucro del Kunsthaus.



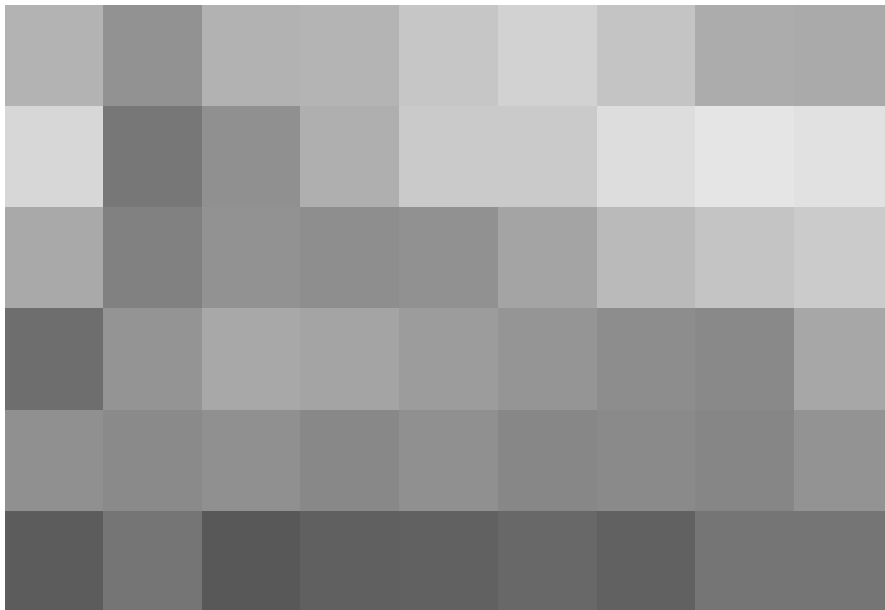
436

Evoluzione tipologica e funzionale dell'involucro nel Movimento Moderno

Come già detto, con la rivoluzione industriale il tema della casa entra in crisi. I motivi sono determinati dal repentino mutamento del contesto culturale della civiltà occidentale che si manifesta a livello urbanistico (per il mutato rapporto città-campagna), a livello tipologico (per l'introduzione di nuovi standard abitativi), a livello tecnologico (per l'adozione di nuovi materiali e sistemi costruttivi).

È storia nota che i principali artefici del Movimento Moderno furono i già citati Mies van der Rohe, Le Corbusier e Gropius.

A Mies può essere riconosciuto il contributo essenziale nell'aver introdotto - attraverso i suoi prototipi di case e grattacieli - il concetto di serialità e chiarezza tecnologica dei suoi dettagli costruttivi. A Le Corbusier, invece, può essere riconosciuto lo sviluppo del processo di industrializzazione dell'edilizia, di una nuova idea di abitare moderno e di aver promosso, attraverso numerosi congressi, i concetti novatori del Movimento Moderno. A Walter Gropius, infine, va riconosciuto l'importante contributo sul piano tecnico e funzionale delle nuove esigenze abitative, estrinsecate all'interno del Bauhaus di Weimar prima e di Dessau dopo (1925).



438

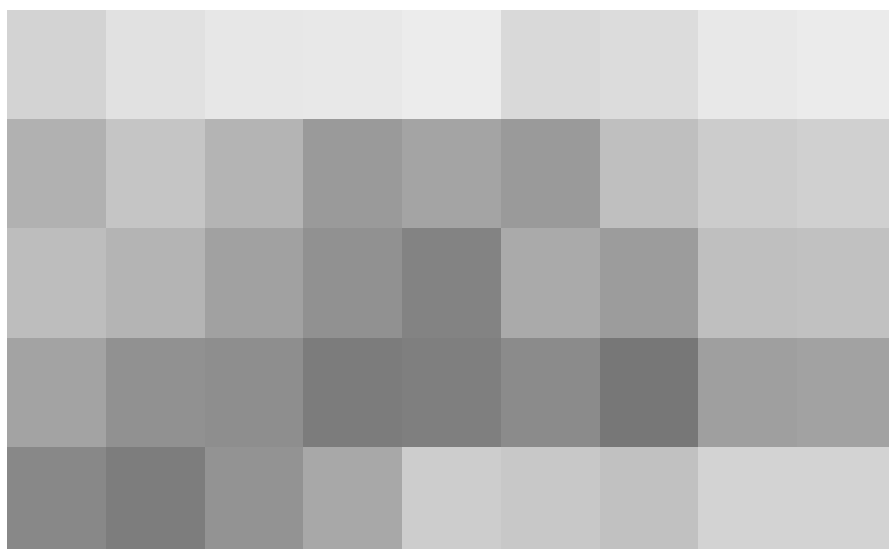
Il primo Moderno che vede influksi del linguaggio cubico-razionalista, si interessa soprattutto delle questioni di forma e di spazio della nuova architettura. In questo momento il calcestruzzo armato come materiale edile è considerato di secondaria importanza, così come le prestazioni dell'involucro sono accantonate a favore degli aspetti legati al modulo, alla distribuzione, all'igiene e alla salubrità degli ambienti.

In tal senso, Tony Garnier (Lione, 1869 - Roquefort-la-Bédoule, 1948) sviluppa tra il 1901 e il 1917 il prototipo di *Cité Industrielle*, proponendo un linguaggio formale delle abitazioni che sfrutta il potenziale costruttivo del calcestruzzo, delle finestre continue, delle pareti in ve-

tro e delle terrazze abitabili (fig.437). Nel 1914 Le Corbusier sviluppa le *Maisons Domino* costruite con elementi prefabbricati prodotti in serie ad eccezione della struttura intelaiata in calcestruzzo armato per poi declinare il suo stile nella progettazione e costruzione di ville puristiche a Garches, a Firminy-Vert o a Poissy rivestite dall'onnipresente intonaco bianco. Solo nel padiglione svizzero della *Cité Universitaire* di Parigi, egli rinuncia per la prima volta al rivestimento litico lasciando il calcestruzzo a vista privo di trattamento (figg.438-439). Nel 1909, a seguito della collaborazione con lo studio dei fratelli Perret, Le Corbusier acquisisce una conoscenza approfondita delle proprietà del conglomerato cemen-



439



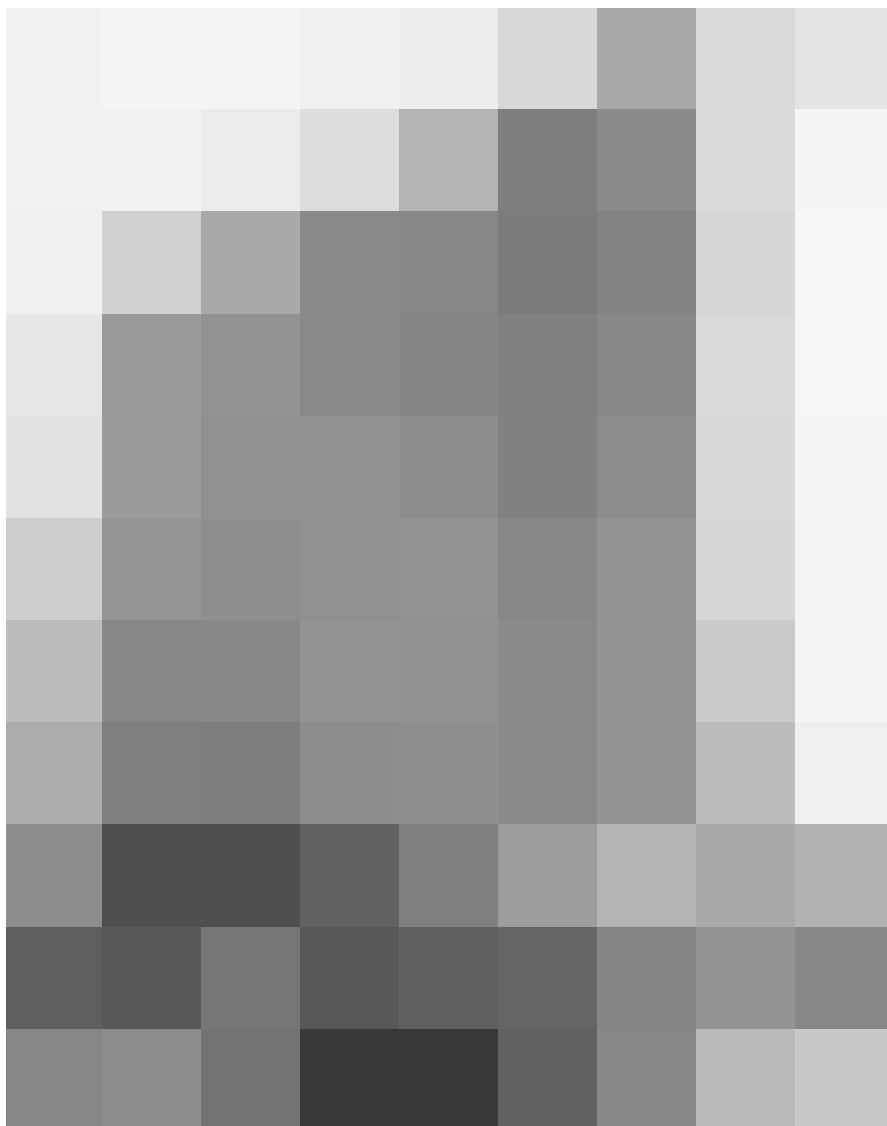
437

437. Tony Garnier, Quartiere d'abitazione della *Cité Industrielle*, 1901-17.

438. Pierre Jeanneret, Le Corbusier, Fondation Suisse della *Cité Universitaire*, Parigi, 1930-33.

439. *Ibidem*.

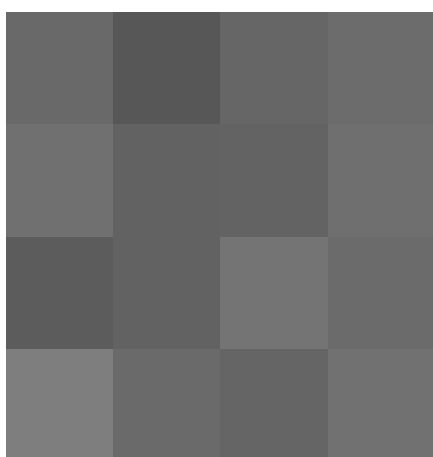
Con Le Corbusier nascono gli elementi tecnici del brise-soleil e del mur neutralisant.



Durante gli Anni 30, Le Corbusier lavorava in gran parte nei paesi caldi e l'invenzione del brise-soleil sembrava essere la risposta ai problemi. Clive Entwistle, l'architetto britannico che tradusse molti dei libri di Le Corbusier, gli scrisse nell'agosto 1946: «Colgo l'occasione a nome dei giovani qui presenti per ringraziarti per il tuo ultimo dono all'architettura: il brise-soleil; uno splendido elemento, la chiave per infinite combinazioni. Ora l'architettura è pronta a prendere il suo posto nella vita. Gli hai dato uno scheletro [struttura a telaio], i suoi organi vitali [servizi comuni], una pelle fresca e lucente [i pilotis, la facciata libera e la finestra a nastro], e ora gli hai regalato dei vestiti magnifici, adattabili a tutti i climi! Devi essere un po' orgoglioso!»²⁷³. Nel 1933 sviluppa persiane mobili orizzontali per un progetto abitativo a Barcellona e progetta un condominio ad Algeri con pareti di vetro a strapiombo sui lati nord e est e brises soleils sui prospetti sud e ovest.

Nel 1936, Le Corbusier è convocato in Brasile come consulente per la progettazione del palazzo del Ministero della Salute e dell'Istruzione a Rio de Janeiro. Il risultato è un edificio per uffici con brise soleil sul prospetto irraggiato dal sole: è la prima volta che adotta questo sistema per un edificio destinato ad uffici, forse a seguito delle sue osservazioni sulle condizioni subite dagli impiegati di New York, a causa della mancanza di protezione dalla luce solare diretta (figg.440-442).

Dopo la guerra, il lavoro di Le Corbusier cambia direzione allontanandosi dalla fede indiscussa riposta nel Mo-



tizio, sfruttando tutte le possibilità plastiche e declinandolo anche per la realizzazione di *brise-soleil*, come nel grattacielo *La Cité d'Affaires* di Algeri (1939) e nei grandi complessi abitativi (Unité d'Habitation a Marsiglia) dai cui massicci pilotis si ergono facciate scandite da schermature solari combinate a logge e parapetti in parte prefabbricati.

440

441

440. Le Corbusier, facciata con brise-soleil del palazzo del Ministero della Salute e dell'Istruzione a Rio de Janeiro, 1936.

441. Particolare del brise-soleil del palazzo del Ministero della Salute e dell'Istruzione a Rio de Janeiro, 1936.

442. Le Corbusier, schizzo dello schema solare dell'Unité d'Habitation, Marsiglia.

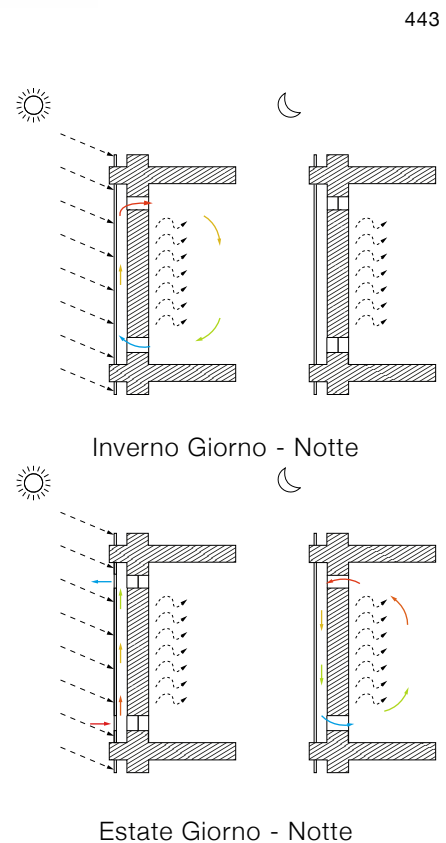
dernismo e nella nuova era della macchina, a vantaggio di un'architettura più reattiva e con più enfasi estetica. Le Corbusier mostrò un grande interesse per il controllo dell'ambiente, ma l'intento principale era quello di sopraffare l'ambiente naturale con la tecnologia meccanica (*Mur neutralisant e Respiration exacte*) (fig.443), sposandosi molto bene con la sua predisposizione per l'estetica della macchina, generatrice indiscussa della tecnologia.

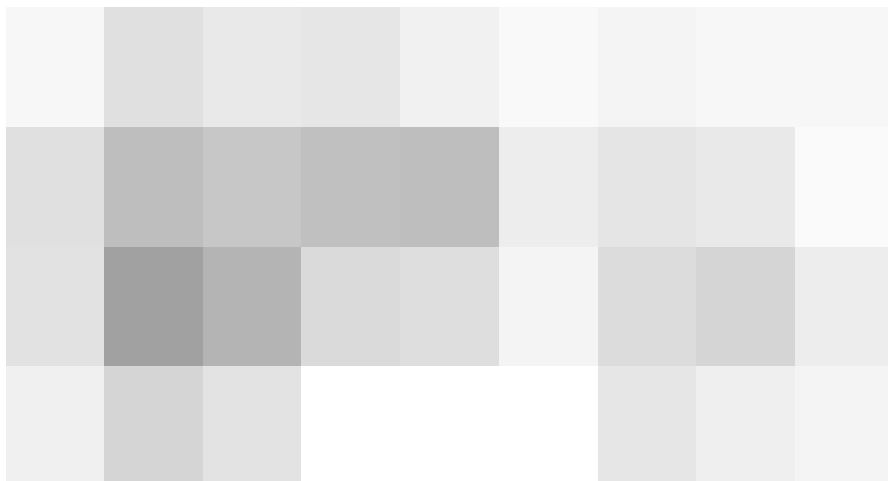
Il *muro neutralizzante* ideato da Le Corbusier (così come i radiatori a tubo di Mies disposti alla base delle grandi vetrate) viene definito nel seguente modo: «l'ingresso del freddo può togliere in vicinanza dei vetri il comfort necessario. A ostacolo tecnico, risposta tecnica: basta raddoppiare la superficie vetrata che costituisce la facciata, con una seconda vetrata situata a 5 o 10 cm dalla prima e far circolare in questa intercapedine una corrente d'aria calda non respirabile e prodotta in un piccolo impianto termico. È quello che ho chiamato "muro neutralizzante"»²⁷⁴.

Il muro neutralizzante, quindi, agiva principalmente come una barriera che impediva al calore di fluire dall'interno verso l'esterno durante l'inverno e dall'esterno verso l'interno durante l'estate. L'architetto ha trasformato un dispositivo esistente (radiatori di calore ad acqua installati tra due pareti vetrate parallele) in un'idea più ambiziosa, inserendo tubi d'aria attorno a un'intercapedine sigillata con doppi vetri, suggerendo di convogliare l'aria trattata (calda d'inverno e fredda d'estate) in modo da neutralizzare le condizioni esterne. Ciò consentirebbe al sistema definito *Respiration exacte* di mantenere una temperatura interna costante di 18°C.

L'innovazione della facciata sotto il profilo energetico apportata dall'architetto è dedotta, però, da numerosi precedenti storici - seppur differenti nella dinamica e nel funzionamento del sistema: il *muro di Trombe-Michel* ed il sistema *Aération ponctuelle*. Il primo sistema è un particolare muro ad azione passiva solare bre-

vettato nel 1881 da Edward Morse e reso famoso nel 1964 dall'ingegnere francese Félix Trombe e dall'architetto Jacques Michel. Si tratta di una parete a doppio vetro esposta a sud con una intercapedine compresa tra i 5 e i 20cm e due bocchette d'aerazione poste alla base e alla sommità dell'involucro trasparente e opaco. Durante la stagione invernale, di giorno, le bocchette (dell'involucro opaco) lasciate aperte favoriscono il flusso termico dall'intercapedine (più calda) agli ambienti interni; di notte, invece, le bocchette sono chiuse per evitare il fenomeno inverso del flusso termico. Durante la stagione estiva, invece, le bocchette d'aerazione dell'involucro opaco sono tenute chiuse di giorno affinché nell'intercapedine si generino dei moti convettivi (parete ventilata) che filtrano l'aria calda convogliandola all'esterno attraverso delle aperture praticate sulla superficie vetrata esterna (fig.444).





445

443. Nella pagina precedente: Le Corbusier, schizzo del sistema *Respiration exacte*, illustrando i due circuiti d'aria per il miglioramento del comfort termico e della ventilazione meccanica, 1930, © FLC/ADAGP, Paris e DACS, Londra, 2012.

444. Nella pagina precedente: schema di funzionamento del muro di Trombe-Michel in Inverno (giorno e notte) e in estate (giorno-notte).

445. Le Corbusier, schema di funzionamento del mur neutralisant e del sistema *Aération ponctuelle* del Centrosoyuz di Mosca, 1928, non realizzato a causa dei costi elevati.

446. Le Corbusier, Case Type A e Type B progettate nel 1923 per il complesso residenziale di Lège-Pessac.

Ma il sistema da cui molto probabilmente Le Corbusier prese esempio è il sistema *Aération ponctuelle* ideato da Gustave Lyon e adottato nella costruzione dell'involucro del Centrosoyuz a Mosca (fig.445). Nell'ottobre 1928, infatti, Le Corbusier fece il suo primo viaggio a Mosca per lavorare al concorso per la costruzione dell'Unione centrale delle cooperative di consumatori Centrosoyuz (1928-36). Dalla Russia, Le Corbusier scrisse una nota indirizzata al cugino Pierre Jeanneret con il quale condivideva la gestione del suo ufficio. La nota è succinta ma eloquente: «*Pierre, rivedi l'intero sistema di finestre. Potremmo forse usare i doppi vetri e il calore tra i vetri. Consultare G. Lyon e laboratorio. Stu-*

*diare un riscaldamento ad acqua calda per uffici; un riscaldamento ad aria calda per parete in vetrocamera per tenere fuori il freddo»²⁷⁵. La nota cita chiaramente degli elaborati dell'ingegnere Lyon e della sua invenzione brevettata appunto come *Aération ponctuelle*. Questa invenzione si basava sul movimento di una certa quantità d'aria, periodicamente purificata, temperata ad una temperatura costante di 18°C, e umidificata, mediante circuiti chiusi pompati attraverso il vetrocamera per mezzo di grandi ventilatori meccanici²⁷⁶.*

L'interesse di Le Corbusier nel mettere in relazione la tecnologia ambientale e l'architettura era stato precedentemente esplorato nei due complessi residenziali di Lège-Pessac progettati per l'industriale di Bordeaux Henri Frugès (1879-1974) tra il 1923 e il 1926, per i quali propose un sistema di riscaldamento ad aria calda combinato con stufe Robur²⁷⁷, e nelle facciate di Villa Schwöb (1916) a La Chaux-de-Fonds, Svizzera. In questa prima esperienza Le Corbusier collocò i collettori di riscaldamento alla base delle doppie pareti in calcestruzzo, sfruttando la convezione per riscaldare l'aria contenuta nell'intercapedine interna, innalzando sulla superficie delle pareti perimetrali della casa la temperatura che, per irraggiamento, riscalda a sua volta gli spazi interni (fig.446).

Tecniche simili sono state precedentemente implementate anche in altri edifici storici. La soluzione con finestre a doppio vetro alimentate da un circuito di aria calda sono presenti già nel 1893 nell'involucro del Palazzo d'Inverno a San Pietroburgo.

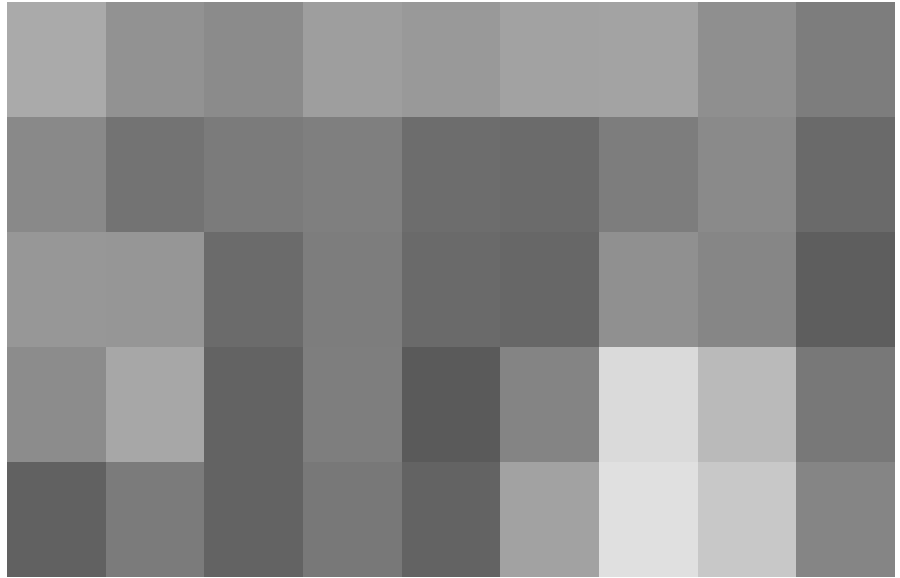
Nonostante l'assidua ricerca, il sistema involucro proposto da Le Corbusier basato sulla *Respiration exacte* non venne mai adottato, anche apportando notevoli migliorie come l'impiego di vetri smaltati prodotti dalla Saint-Gobain. Le difficoltà di fare affidamento sul controllo ambientale meccanico riscontrate nei progetti del Centrosoyuz e della Cité de Refuge a Parigi (in cui fu necessario nel 1952 la



446

riprogettazione totale della facciata sostituendo il sistema a controllo meccanico con una tipologia passiva con finestre apribili e tende parasole policrome), erano molto evidenti e il lavoro di Le Corbusier iniziò a essere maggiormente coinvolto con mezzi di controllo ambientale passivi e idee come il brise-soleil e la griglia climatica furono adottate più spesso (figg.447-449).

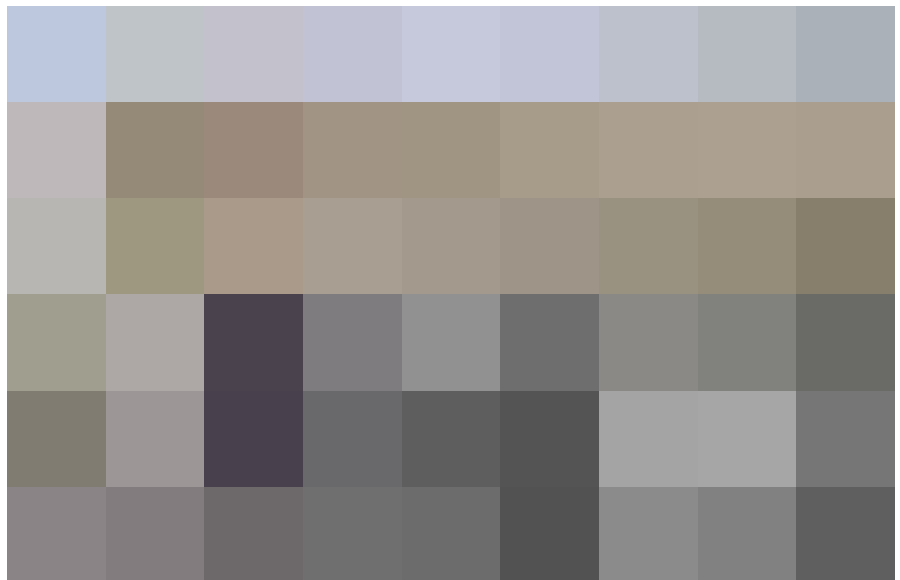
Questi sono senza dubbio obiettivi validi per gli standard odierni, ma ci sono alcune prove che suggeriscono che le idee furono spesso gravemente compromesse dalle preoccupazioni compositive di Le Corbusier.



448

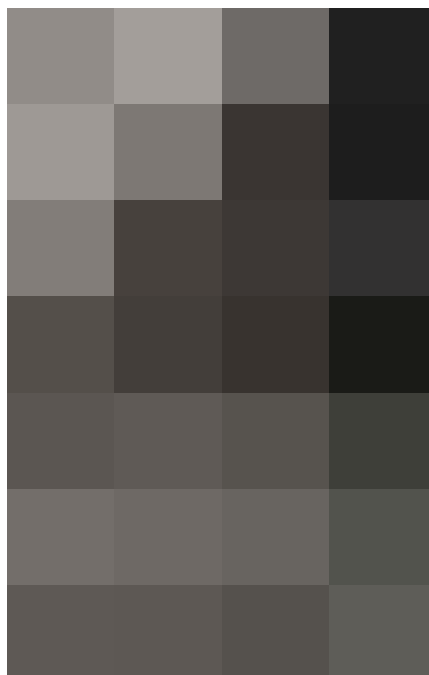


447



449

Per esempio, alcuni dei principali elementi compositivi nei progetti per l'Unité d'Habitation (Marsiglia, Nantes, Berlino) e del Mill Owners Association Building (Ahmedabad, India, 1954) (fig.450) sono stati l'invenzione dei brises soleils. Per ottenere migliori risultati Le Corbusier intuì come gli edifici dovrebbero essere orientati in modo che la facciata lunga sia rivolta a sud (o sud-est), in modo che il sole basso mattutino possa entrare nell'edificio, mentre il sole caldo di mezzogiorno possa essere occluso dalla schermatura solare. Purtroppo perseguendo logiche compositive, i blocchi principali sono orientati in entrambi i casi con le facciate principali rivolte verso est-ovest, rendendo inutile il controllo solare con i brise-soleil.



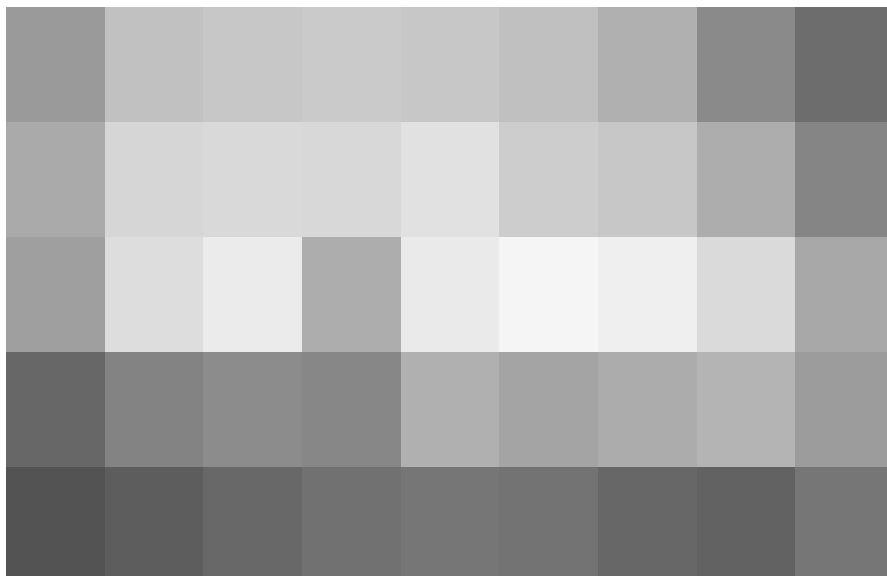
450

447. Le Corbusier, dettaglio della facciata della Cité de Refuge a Parigi realizzata nel 1952 in sostituzione della prima tipologia realizzata nel 1933, © Chatillon architectes.

448. Le Corbusier, immagine storica della prima facciata della Cité de Refuge a Parigi realizzata nel 1933, © Fondation Le Corbusier, 2017.

449. Le Corbusier, facciata della Cité de Refuge a Parigi realizzata nel 1952 in sostituzione della prima tipologia realizzata nel 1933.

450. Le Corbusier, facciata del Mill Owners Association Building, Ahmedabad, India, 1954.



451

451. Le Corbusier, tetto giardino dell'appartamento di Charles de Beistengui, Parigi, 1929, © Fondation Le Corbusier.

452. Le Corbusier, schizzo di sezione di una copertura in calcestruzzo armato con giardino pensile, 1926.

Nessun altro architetto dell'epoca moderna ha sostenuto con tanta convinzione l'adozione delle coperture orizzontali ed il loro sfruttamento quanto Le Corbusier. In merito ai giardini pensili, che rappresentano uno dei suoi cinque punti per una nuova architettura, egli non si limita a sostenere l'impiego con tematiche funzionali, estetiche ed economiche, ma introduce anche elementi tecnico-strutturali (fig.451). Consapevole del processo di degrado (fessurazioni, carbonatazione, etc) delle superfici di calcestruzzo esposte ai cicli termici ed a quelli atmosferici, dispone sulle coperture piane i giardini pensili. Nello scritto *Conversazione con un costruttore di tetti* egli afferma che, a seguito

dell'introduzione del riscaldamento centralizzato in una regione relativamente fredda, non sussiste più alcuna necessità di inclinare la copertura. «Bisogna giungere a una soluzione completamente diversa; la copertura deve essere inclinata verso l'interno, deve sopportare senza problemi il carico neve e deve convogliare l'acqua di fusione generata dall'azione termica del riscaldamento centralizzato verso un pluviale che non si trovi più all'esterno della casa, bensì all'interno, se possibile al centro, dove si ha maggiore accumulo termico. Il pluviale deve condurre dalla copertura inclinata verso l'interno al canale ai piedi della casa, dove non esiste alcun problema di congelamento e dove sfociano anche i tubi di scarico dei bagni e le restanti condutture»²⁷⁸ (fig.452). Nonostante alcuni aspetti lacunosi, le coperture orizzontali delle ville (Stein e Savoye) di Le Corbusier rappresentano esempi convincenti per l'epoca, soprattutto per quanto riguarda la ricerca di un luogo funzionale ma al tempo stesso destinato alla collettività.

Nell'epoca dominata dagli architetti classici del Movimento Moderno, quando la terrazza occupa già un posto fisso all'interno del vocabolario formale degli architetti all'avanguardia, esiste ancora una profonda spaccatura tra i desideri estetici dei progettisti da un lato e le possibilità strutturali e tecniche dall'altro. Sul mercato giungono nuovi materiali d'impermeabilizzazione e brevetti per i quali non si sono tuttavia accumulate sufficienti esperienze. Così il tetto in fibrocemento continua a dominare le scene fino all'inizio degli anni '20 per poi lasciare spazio al calcestruzzo armato. Emergono i primi problemi dal punto di vista fisico e strutturale; l'isolamento termico risulta inadeguato e non si considera ancora il fenomeno dei ponti termici. Per l'isolamento termico vengono impiegati prevalentemente pannelli isolanti in sughero catramato da 3-4cm di spessore e per evitare la formazione della condensa si crea un'intercapedine aggiuntiva all'intradosso dello strato resistente²⁷⁹.



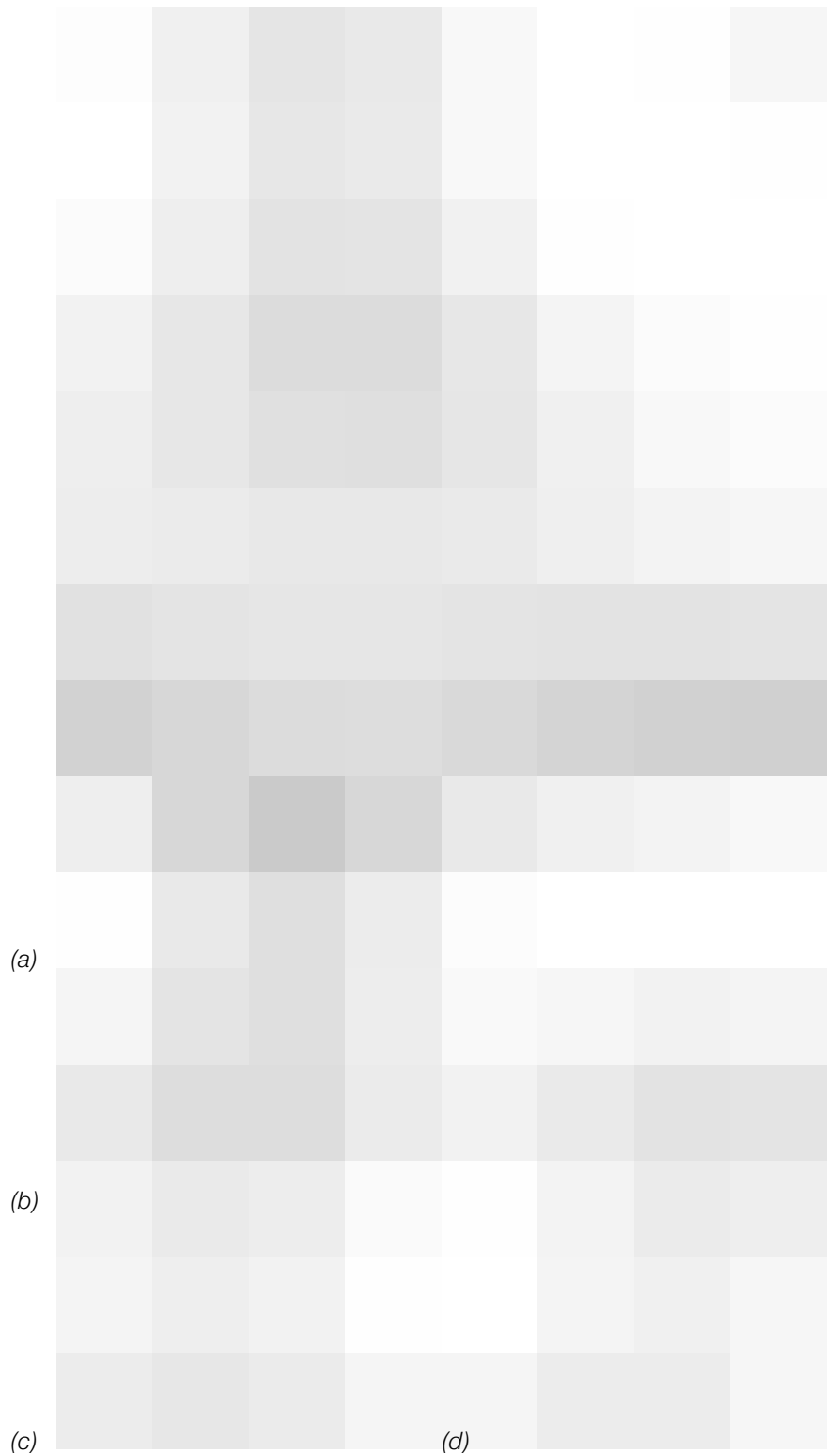
452

Per l'impermeabilizzazione vengono impiegati asfalto colato e cartone catramato²⁸⁰ protetti da fibrocemento.

Estremamente indicativa in riferimento alla situazione tecnica della copertura è un'inchiesta condotta da Walter Gropius nel 1926 presso i principali architetti internazionali per la rivista *Bauwelt*. Le dichiarazioni costituiscono una chiara dimostrazione della grande insicurezza dell'epoca per la costruzione delle coperture: Otto Haesler e Peter Behrens utilizzano sempre il fibrocemento manifestando preoccupazioni circa la durabilità della sottostruttura lignea non sufficientemente ventilata; i fratelli Taut esaltano uno speciale strato protettivo di tela imbevuta nell'asfalto da associare al cartone catramato; Richard Döcker presenta un particolare della solarium dell'ospedale di Waiblingen (1926-28) mentre Mies van der Rohe, infine, manifesta l'attenzione nel bordo della copertura ridotto al minimo, come nei celebri esempi di una casa corte, di casa Farnsworth (Illinois, 1945-50) e della Crown Hall dell'Illinois Institute of Technology (Chicago, 1952) (fig.453).

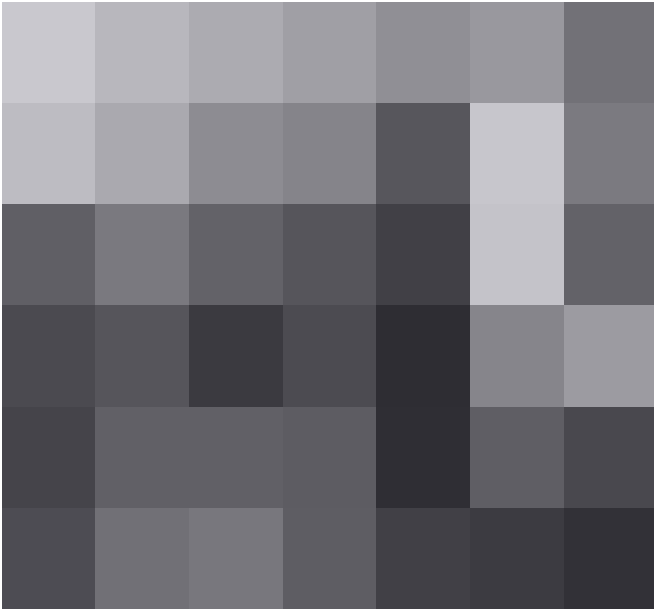
Sempre per quanto riguarda Le Corbusier, egli abbandonerà le forme geometriche ed i tetti piani con la cappella di Notre-Dame-du-Haut a Ronchamp (1950-54) ed il noviziato dei domenicani La Tourette di Eveux presso Lione (1960). Le Corbusier, infatti, si allontanerà dallo stile internazionale adottando dei volumi irregolari a libera plasticità la cui trama superficiale cementizia impressa dalla cassaforma sarà scialbata con malta liquida: una superficie ruvida definita *béton brut* (cemento a vista)²⁸¹.

Dalla rudezza del cemento a vista *béton brut* venne coniato il termine brutalismo per indicare una corrente architettonica nata a metà del Novecento in Inghilterra. A queste forme di espressione architettonica viste come superamento del Movimento Moderno si sono ispirate le figure di Alison Smithson (1928-1993) e Peter Smithson (1923-2003), James

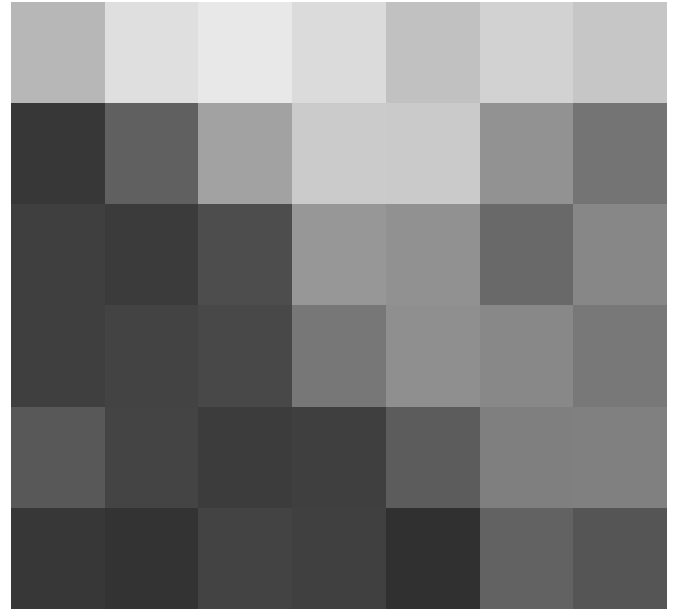


Frazer Stirling (1926-1992), l'italo-argentino Clorindo Testa (1923-2013), il gruppo giapponese Metabolism di Kenzō Tange (1913-2005), i gruppi italiani BBPR, Celli Tognon e gli architetti italiani Vittoriano Viganò (1919-1996), Francesco Berarducci (1924-1992), Piero Sartogo (1994), Leonardo Ricci (1918-1994), Giovanni Michelucci (1891-1990), etc.

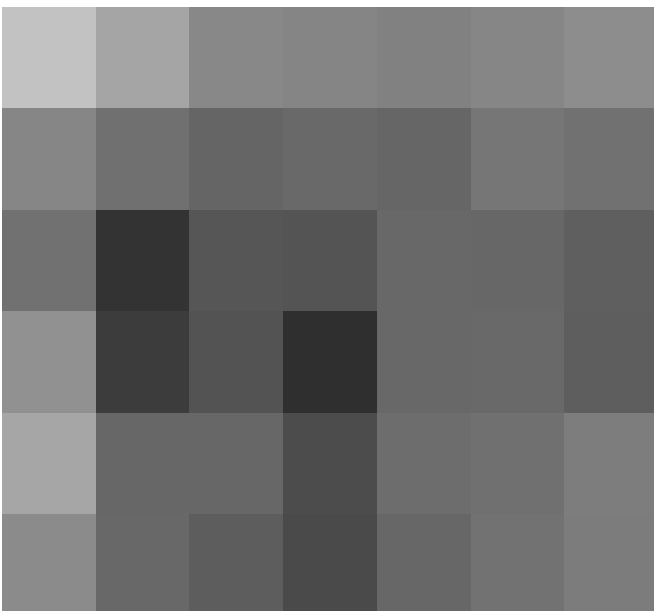
453. Particolari costruttivi di copertura piana: a) Richard Döcker, sezione isometrica di un particolare solarium dell'ospedale di Waiblingen (1926-28), b) Ludwig Mies van der Rohe, bordo del tetto di una casa a corte (1931), c) Ludwig Mies van der Rohe, bordo del tetto della casa Farnsworth, Illinois (1945-50), d) Ludwig Mies van der Rohe, bordo del tetto della Crown Hall dell'Illinois Institute of Technology, Chicago (1953).



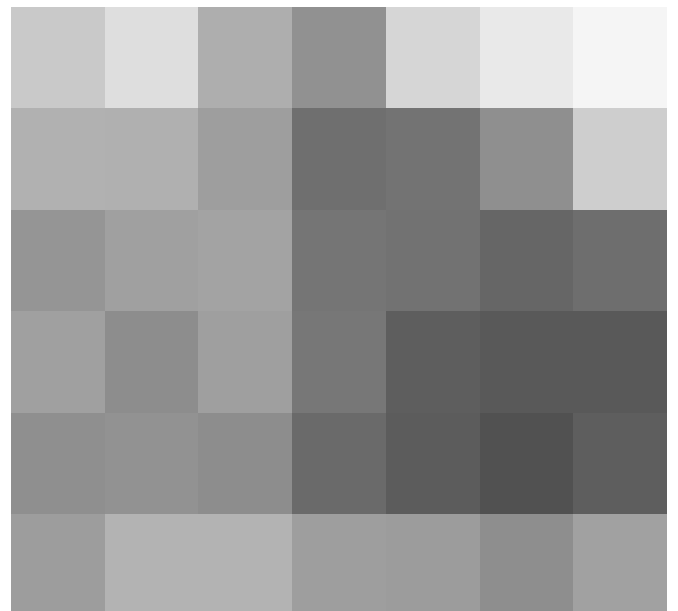
454



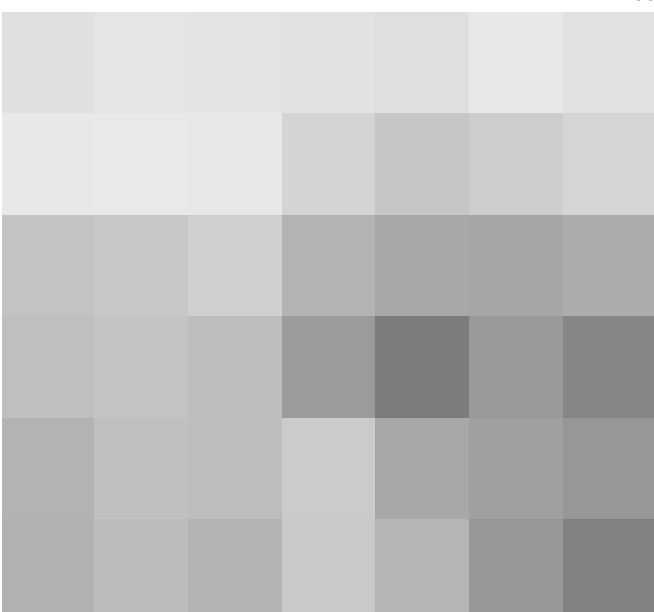
457



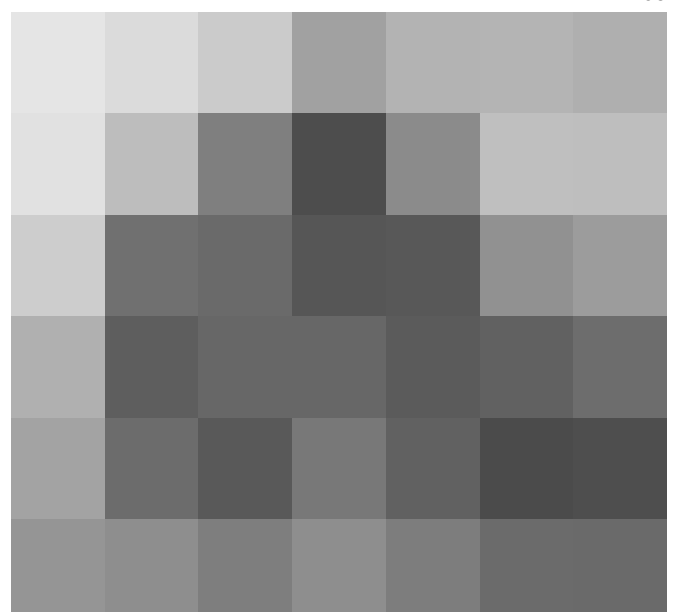
455



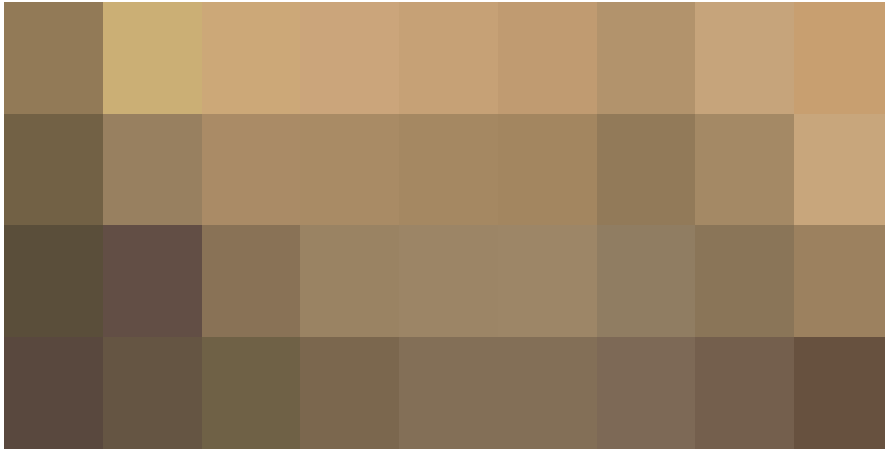
458



456



459



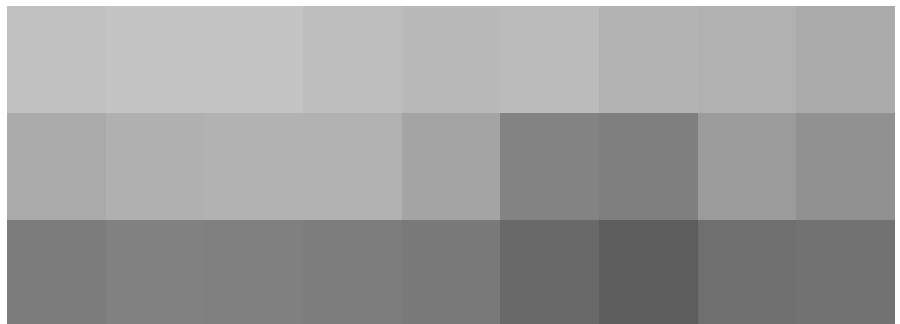
460

Tornado all'evoluzione del calcestruzzo armato nel primo Movimento Moderno, nel 1922 Mies van der Rohe adotta il sistema intelaiato in calcestruzzo armato per la costruzione dello scheletro dell'edificio per uffici a Berlino, le cui facciate sono caratterizzate da finestre continue (fig.460).

Le vedute prospettiche del progetto per una villa in campagna del 1923 di Mies persegue ancora la ricerca delle giuste proporzioni in cui si disinteressa del tipo di costruzione e del materiale. L'architetto, infatti, disegna l'impianto della villa una volta in calcestruzzo armato e una volta in muratura in mattoni di laterizio lasciando immutate le proporzioni ed il dislocamento delle aperture (figg.461-462).



461



462

Nel progetto del padiglione tedesco per l'Esposizione di Barcellona ai materiali è demandato il compito di favorire la lettura della tettonica dell'edificio, un sistema spaziale trasparente e con una copertura sospesa atettonica (fig.463).

Nel 1926, l'austriaco Rudolph Michael Schindler (Vienna, 1887 – Los Angeles, 1953) propone nei progetti della Lovell Beach House in California, nella E-How House (1925) (fig.464) e nella colonia El Pueblo Ribera (1923-25) (fig.465) un rivesti-

454. Nella pagina precedente: James Frazer Stirling, Florey Building - The Queen's College, Università di Oxford, 1972, @ Yukio Futagawa.

455. Nella pagina precedente: Clorindo Testa, Banca di Londra e Sud America, Buenos Aires, 1970, © Cemal Emden, Federico Cairoli.

456. Nella pagina precedente: Kenzō Tange, Fuji TV Headquarters, Tokyo, 1996, © Jacopo Gennari Feslikenian.

457. Nella pagina precedente: Celli Tognon, Istituto Autonomo Case Popolari (IACP), Trieste, 1982, © Leonardo Calvi.

458. Nella pagina precedente: Vittoriano Viganò, Istituto Marchiondi Spagliardi, Milano 1954-57, © Do.co,mo.mo Italia.

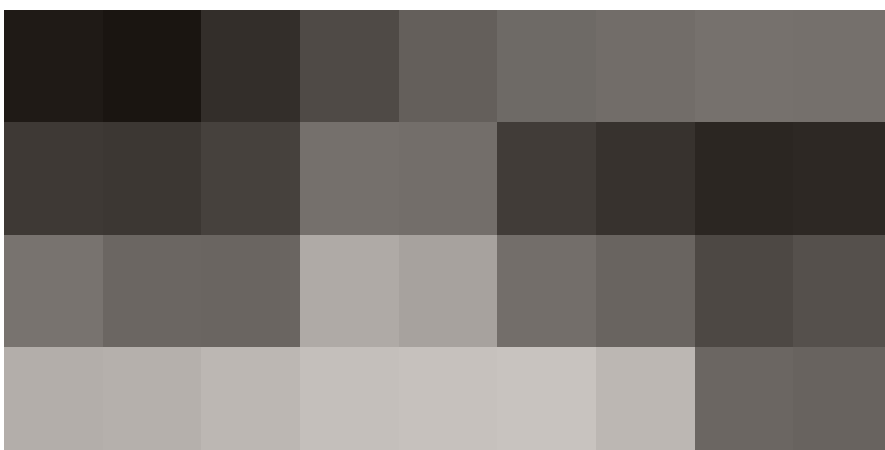
459. Nella pagina precedente: Giovanni Michelucci, Chiesa di San Giovanni Battista, Firenze, 1960-64.

460. Ludwig Mies van der Rohe, progetto di un edificio per uffici in calcestruzzo armato, 1922, © Mies van der Rohe Archive, 2021 Artists Rights Society (ARS), New York / VG Bild-Kunst, Bonn. Architecture and Design.

461. Ludwig Mies van der Rohe, progetto di una villa in campagna in calcestruzzo armato, 1923.

462. Ludwig Mies van der Rohe, progetto di una villa in campagna in mattoni di laterizio, 1923.

463. Ludwig Mies van der Rohe, Barcelona Pavilion, Barcellona, 1929, © Cemal Emden.



463



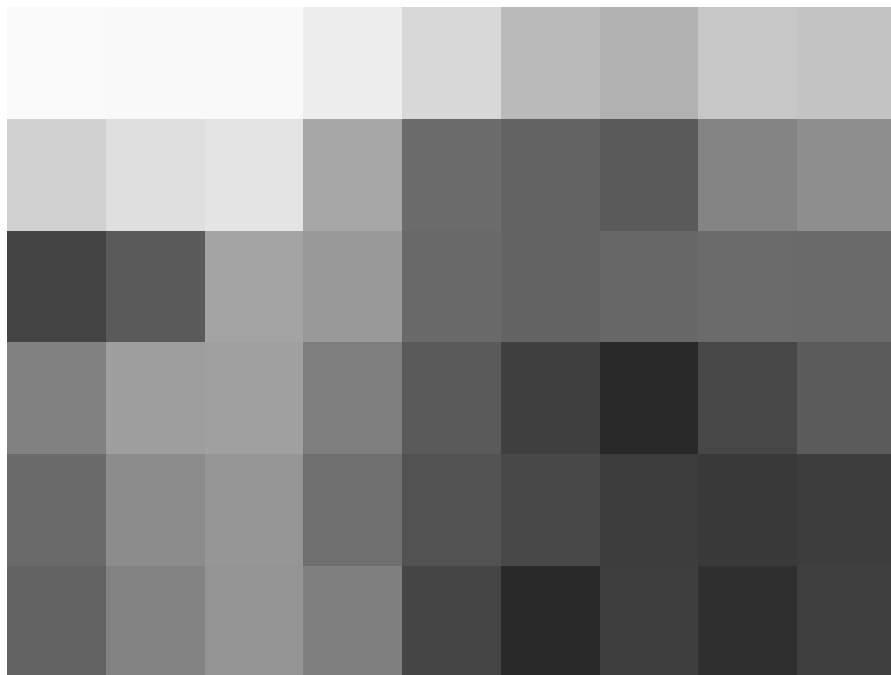
464

464. Rudolph Michael Schindler, progetto della E-How House, Los Angeles, 1925.

465. Rudolph Michael Schindler, colonie per le vacanze El Pueblo Ribera, San Diego, California, 1923-25.

466. Procedimento *slab-cast*.

467. Nella pagina successiva: Frank Lloyd Wright, Solomon R. Guggenheim Museum in costruzione (1956-1959), © Solomon R. Guggenheim Museum Archives, New York.



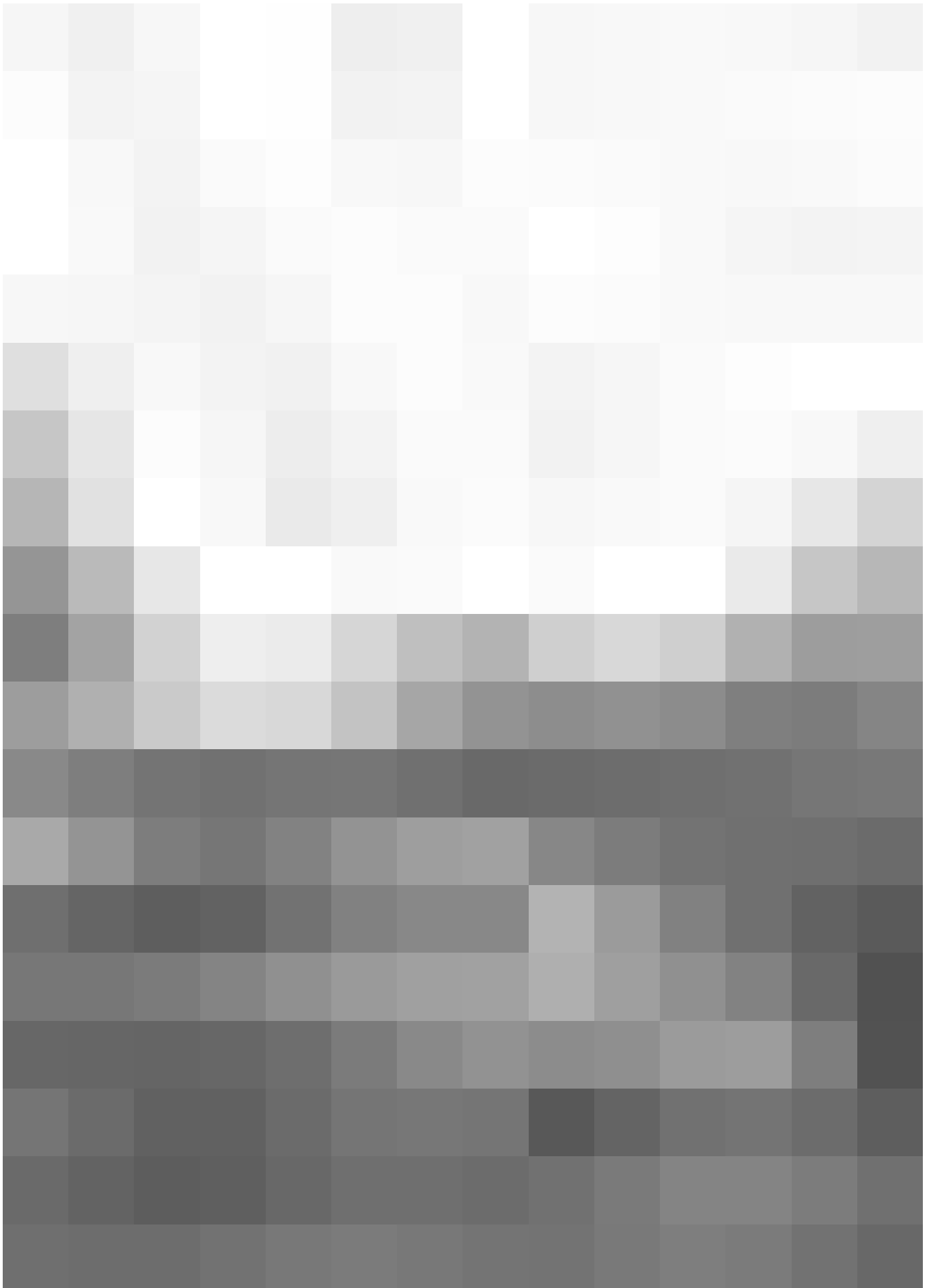
465



466

mento in calcestruzzo armato a vista, lavorato con il procedimento *slab-cast* che prevede una cassaforma composta da tavole orizzontali, rivestite all'interno con cartone catramato per evitare l'aggrappaggio della malta colata favorendo il distacco dell'elemento ligneo e lo spostamento lungo dei montanti-guida verticali. Lo spessore dei listelli orizzontali presenti sulla superficie interna permetteva la realizzazione delle scanalature orizzontali sulla superficie a vista (fig.466).

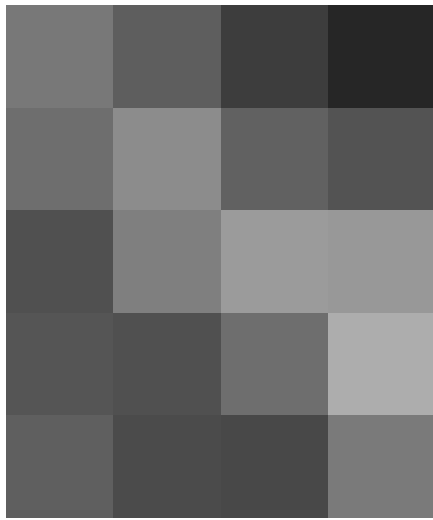
Nel 1939 la casa Kaufmann presso Mill Run in Pennsylvania, nota come "casa sulla cascata" diventa uno degli edifici in calcestruzzo più caratteristici dell'architettura moderna, grazie alle sperimentazioni condotte da Frank Lloyd Wright. Un altro tipico esempio di esasperazione del materiale cementizio armato con la sua struttura a spirale è il Solomon R. Guggenheim Museum a New York, considerato ancora oggi uno dei capolavori dell'architettura contemporanea (fig.467).



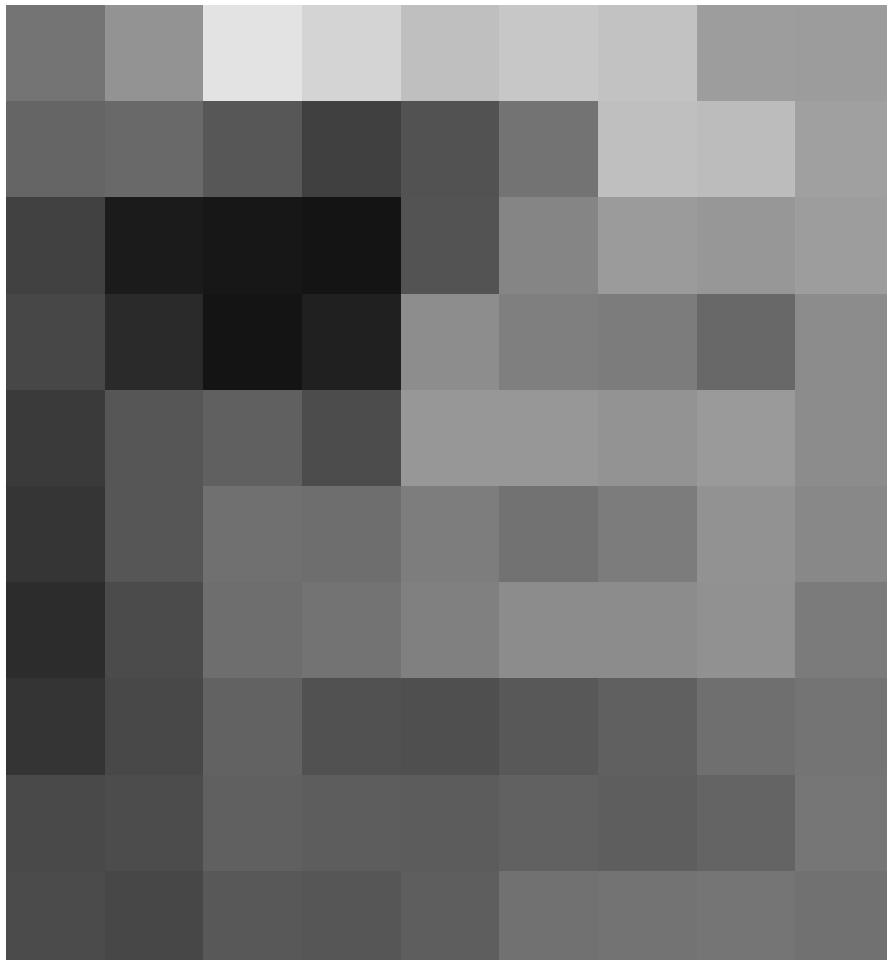
468. Pannello in vetrocemento prefabbricato della S.A. delle Manifatture di specchi e prodotti chimici di Saint Gobain Chauny & Cirey, in *Vetrocemento*, Milano, 1946.

469. Costruzione di una muratura con diffusori "Isocalor" della S.A. delle Manifatture di specchi e prodotti chimici di Saint Gobain Chauny & Cirey, © Archivio Italfoto.

470. Montaggio di lastre ondulate in Eternit per una chiusura di copertura su telaio in acciaio.



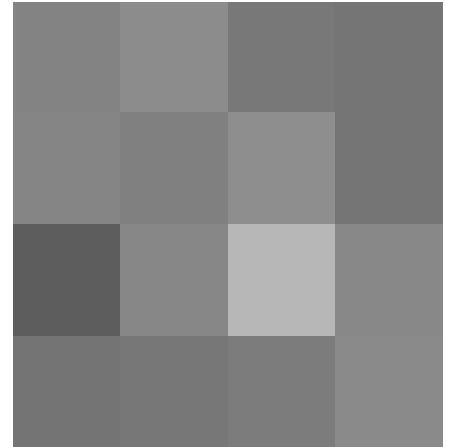
468



469

Modernità italiana nel sistema litico dell'involucro 'a secco'

Il nuovo linguaggio espressivo dell'architettura del Novecento, corroborato dall'impulso della crescente industria edilizia italiana, porta ad una rinnovata cultura costruttiva ed a nuove sperimentazioni stilistiche, di materiali innovativi ed alla codifica di tecnologie costruttive più idonee alla tendenza generale della "civiltà delle macchine", in una Italia orbata dalle Sanzioni Economiche del 1935. Nel successivo sviluppo dell'industria edilizia italiana e dalla 'rinnovata' consapevolezza di una progettazione ottimizzata alla velocità e alla economicità del processo edilizio, si diffonde l'interesse della produzione di elementi prefabbricati da poter assemblare direttamente in cantiere. La razionalizzazione dei processi costruttivi e l'impiego di nuovi materiali si manifesta soprattutto nel sistema edilizio dell'involucro 'a secco', determinando nuovi scenari e sistemi tecnologici del tutto innovativi per l'epoca di riferimento (figg.468-470).



470

Infatti, l'industrializzazione del processo edile avrebbe dovuto costituire la necessaria premessa per una fase di razionalizzazione della produzione (in termini di qualità del prodotto finito e dei modi per realizzarlo), ma soprattutto della fase di assemblaggio e posa in opera: occorre, in altre parole, modificare la fase di organizzazione del cantiere, valutando il contributo anche degli elementi già pronti per la posa in opera, sebbene ancora pochi.

Il tradizionale contesto dell'edilizia era rimasto sostanzialmente immutato pur con la introduzione di azioni di più mirata pianificazione progettuale, intesa appunto a coordinare gli elementi costruttivi dell'intero edificio e ad integrare azioni *in situ* con prodotti industriali.

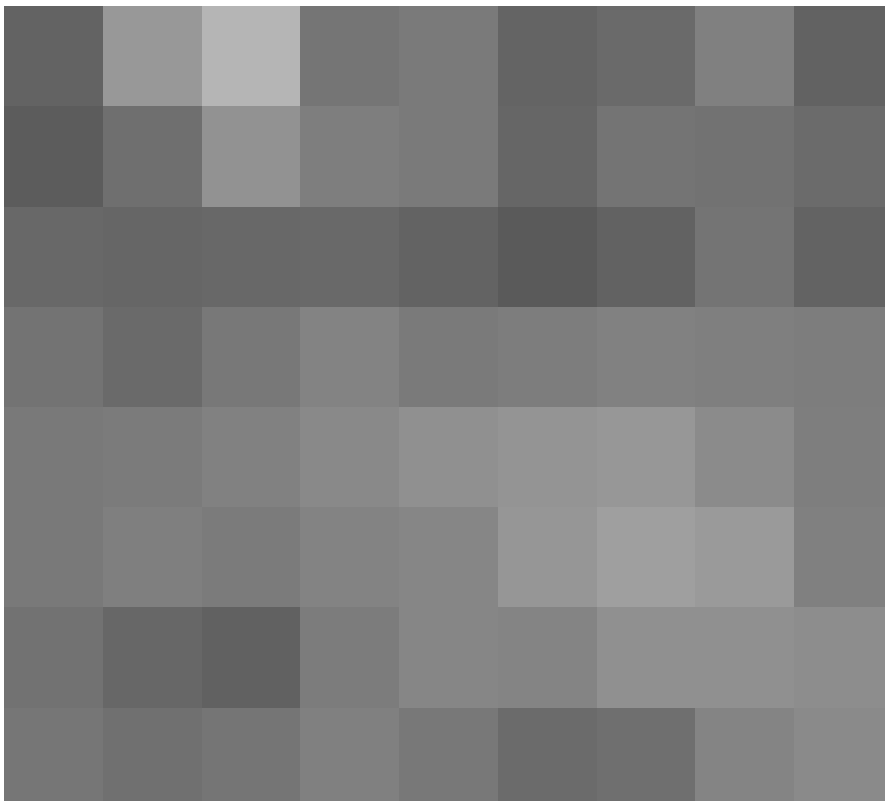
Tale considerazione nasce dalla contingenza per cui l'organismo edilizio può essere composto dall'assemblaggio di soluzioni tecniche precostituite (prefabbricazione), in cui diverse componenti del sistema edilizio vengono realizzate nelle fabbriche, pronte per essere assemblate in cantiere; tale processo, come già evidenziato, garantisce una economicità e velocità del processo di produzione diventando l'emblema di un nuovo modo di fare architettura.

Così, accanto allo sviluppo delle industrie tessili, chimiche, siderurgiche e meccaniche, vanno diffondendosi – coerentemente con l'andamento europeo – anche le industrie legate alla produzione dei materiali da costruzione, ca-

ratterizzate da proprie peculiarità, strettamente legate alla tipologia di materiale e componenti prodotti. I principali cambiamenti che la prefabbricazione introdusse nel settore delle costruzioni passano per la ottimizzazione del processo produttivo (il prodotto seriale ben si presta alla riduzione dei consumi e dei tempi a fronte dell'impiego delle omologhe risorse posate *in situ*), per un deciso miglioramento delle condizioni lavorative della manovalanza (il lavoro in stabilimento può essere più produttivo di quello in cantiere), per una migliorata compatibilità tra la fase di progettazione e quella di esecuzione dell'opera (attraverso la riduzione delle eventuali criticità ed errori derivanti dalla realizzazione in cantiere), per la riduzione degli scarti e sfridi (indagini condotte sul campo portano a ritenere una riduzione di oltre il 40% dell'uso di materiale se assemblato direttamente in stabilimento), per un controllo di qualità dell'intero processo produttivo e per una continuità lavorativa dell'indotto edile, non più solo legato alla episodicità e specificità di ciascun cantiere, ma alla continuità produttiva di componenti ed elementi delle costruzioni²⁸² (figg.471-472).



472



471

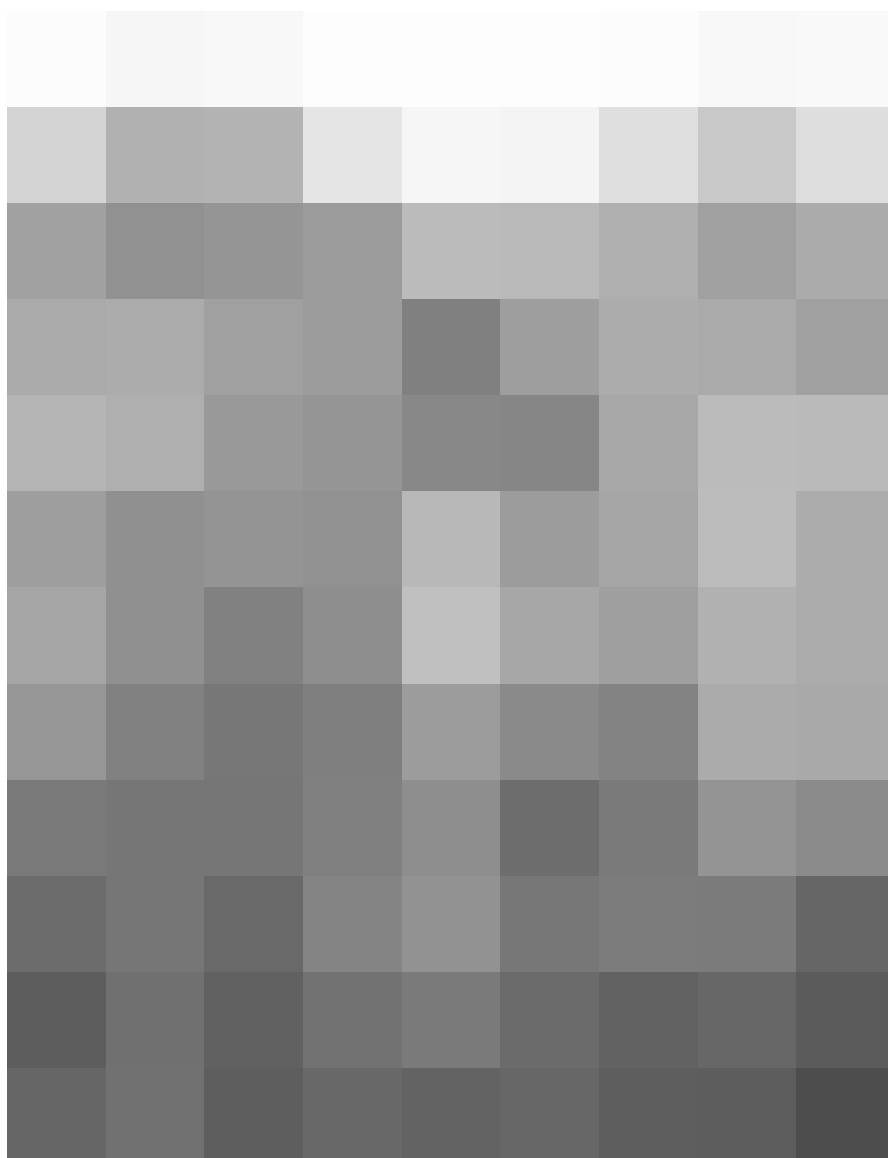
471. Cartolina storica della Fabbrica Refrattari Verzocchi di La Spezia.

472. Locandina pubblicitaria del linoleum "Prealino", in *Domus*, n.325, Dicembre 1956, pag.30.

La prefabbricazione, quindi, la si può considerare come la fase iniziale dell'industrializzazione del processo edilizio che, come detto precedentemente, pur non essendo totale, costituisce un primo definitivo passaggio verso una industrializzazione più integrale dell'involucro 'a secco' che consentirebbe di trasformare il cantiere in una mera opera di assemblaggio. Questo processo, che sarà destinato a modificare sostanzialmente l'intero processo produttivo nel settore delle costruzioni, avrà come inevitabile conseguenza non solo la modificazione delle regole e della organizzazione del cantiere, ma anche la sperimentazione di nuovi sistemi costruttivi e la sperimentazione di innovative tecniche di assemblaggio; con la standardizzazione delle componenti, infatti, il

sistema costruttivo necessitava di nuove tecniche costruttive. Tutto ciò ebbe come ulteriore conseguenza una apparente contraddizione, cioè il fatto che ciascun edificio, pur realizzato con elementi serializzati, non poteva essere considerato esso stesso un elemento standardizzato e perfettamente riproducibile. La grande quantità di variabili presenti nella fase di assemblaggio e le criticità eventualmente legate alla peculiarità formale e tipologica dell'edificio (e chiaramente le competenze e professionalità della manodopera), contribuiscono a fare dello stesso un *unicum* irripetibile pur nella sua serialità: l'organismo edilizio può essere composto dall'assemblaggio di soluzioni tecniche precostituite, ma non può essere riprodotto in modo standardizzato (fig.473).

473. Cantiere del Palazzetto dello Sport di Roma, 1956, Fondo Publifoto Roma presso il CSAC dell' Università di Parma-Sezione Fotografia.



L'industrializzazione, la prefabbricazione edilizia, la sperimentazione di nuove tecniche costruttive e materiali divennero, pertanto, il simbolo di un rinnovamento che interessò ogni settore della vita quotidiana, innescando percorsi di studio ancora inesplorati, che favorirono un lento ma incisivo passaggio da una produzione artigianale ad una serializzata ed industriale, capace di rivoluzionare non solo l'assetto costruttivo tradizionale ma, soprattutto, lo spazio architettonico ed urbano delle nuove aree sempre più espressione della Moderna industrializzazione. Un primo flebile campo d'indagine della sperimentazione dell'involucro propriamente italiano affronta il tema maggiormente dibattuto dagli autori del Movimento Moderno: lo spazio dell'abitare. Anche in Italia, la rivoluzione architettonica Moderna inizia con l'elemento tipologico della casa: l'abitazione, intesa come costruzione in cui «risiede l'essere dell'uomo»²⁸³, assume caratteri sostanzialmente diversi da quelli tradizionali, non solo dal punto di vista distributivo (in rapporto ai nuovi canoni di vita sociale e di igiene), ma anche in base alla funzionalità e all'impiego di nuovi materiali, sistemi costruttivi ed elementi tecnologici che concorrono alla sua definizione.

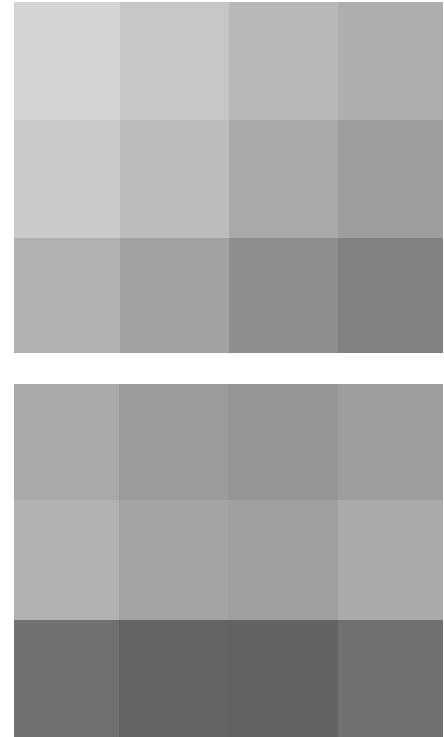
Infatti, la 'casa' non è più da considerarsi come un bene immobile (fine a sé stessa), ma come una vera e propria 'macchina dell'abitare', dinamica e versatile, capace di soddisfare ogni esigenza abitativa dell'uomo che vi risiede, poiché dotata di innumerevoli impianti altamente specializzati, realizzata in serie, componibile, riproducibile, smontabile e resiliente. Pertanto, mossi da queste considerazioni futuriste dell'abitare, gli architetti italiani iniziarono a rivedere il carattere tipologico e l'articolazione costruttiva dell'abitazione: dall'idea della "stabilitas" di vitruviana memoria, si giunse alla più moderna idea di costruzione leggera, nata dall'assemblaggio di componenti già prodotte dall'industria; elementi come travi, travetti, pannelli in calcestruzzo armato, colonne, modanature, architravi (solo per citarne alcuni) si imposero nel processo edile quali elementi simbolo della standardizzazione edilizia, capaci di sovvertire l'impostazione tradizionale dei cantieri.

Tuttavia, fra i problemi della prefabbricazione, la questione relativa alla dimensione degli elementi in cui scomporre l'edificio, divenne una delle tematiche di maggior rilievo; tema centrale del dibattito culturale ed architettonico di inizio '900 mise a dura prova i giovani architetti che furono chiamati a realizzare opere di notevole complessità. Infatti, nell'ampio panorama della ricerca sperimentale dell'edilizia industriale, le possibilità di produzione principali consentivano la realizzazione di grandi elementi (intere chiusure verticali ed orizzontali) che seguivano la modularità di un ambiente di medie dimensioni oppure la realizzazione di piccoli elementi costruttivi che, uniti fra loro, portavano alla composizione dell'organismo edilizio (fig.474). Tuttavia, sebbene più vantaggiosi (a livello di tempistica) e altamente produttivi, gli elementi di grandi dimensioni comportavano una standardizzazione non solo del processo produttivo, ma anche dell'intera abitazione che, diversamente, sarebbe diventata essa stessa serializzata, nella sua distribuzione e nell'aspet-

to estetico, privando ogni possibilità di intervento al progettista che, diversamente, non avrebbe potuto dare estro alle sue capacità architettoniche anche nella risoluzione di esigenze estetiche e funzionali legate alla singolarità dell'abitazione. Coniugando, così, istanze architettoniche ed esigenze industriali, tali architetture, pur nella loro serialità costruttiva, rappresentavano un unicum irripetibile, costituito da elementi standardizzati ma capaci di rendere libera la sensibilità del progettista, affinché l'architettura potesse ancora rappresentare una personale espressione artistica dell'architetto progettista.

Il nuovo sistema della prefabbricazione nel settore delle costruzioni interessò l'Europa e soprattutto l'Italia con l'introduzione di nuove tecniche costruttive e la sperimentazione di nuovi materiali, che si diffusero copiosamente principalmente nelle regioni maggiormente industrializzate del Nord del Paese. Tuttavia non mancarono, anche nel Mezzogiorno, occasioni in cui le nuove esigenze abitative e il fervore dell'industrializzazione mostrassero l'ingegno nella realizzazione di opere che ben presto divennero manifesto di una nuova arte del costruire e simbolo di un rinnovamento sociale, soprattutto delle aree agricole, di bonifica e di nuova fondazione. In tali circostanze gli architetti, progettisti e, soprattutto le industrie del settore edile, furono chiamate a reinterpretare la tipologia costruttiva della casa rurale in una chiave architettonica e costruttiva moderna, capace di rispondere alle nuove esigenze abitative e lavorative, coniugando economicità e brevità nei tempi di realizzazione.

La ricerca formale ed architettonica delle nuove case rurali risiedeva in una espressione architettonica aderente al contesto locale – naturale e costruito – e allo stesso tempo accordata con lo spirito ed i contenuti della civiltà contemporanea: un linguaggio moderno e pertinente, egualmente lontano da un formalismo folcloristico e da un



474

474. Fasi di montaggio delle pareti perimetrali e capriate in elementi prefabbricati in calcestruzzo armato, in Rossi, V., *Orientamenti per l'edilizia: elementi prefabbricati*, Atti della Società degli ingegneri e degli architetti - Rassegna Tecnica, n. 5, pag. 222.



475

475. Schema di montaggio e particolari dei giunti della parete a cassa vuota portante secondo il sistema S.A.C.I.S., in Rossi, V., *Orientamenti per l'edilizia: elementi prefabbricati*, Atti della Società degli ingegneri e degli architetti - Rassegna Tecnica, n. 5, pagg. 211-212.

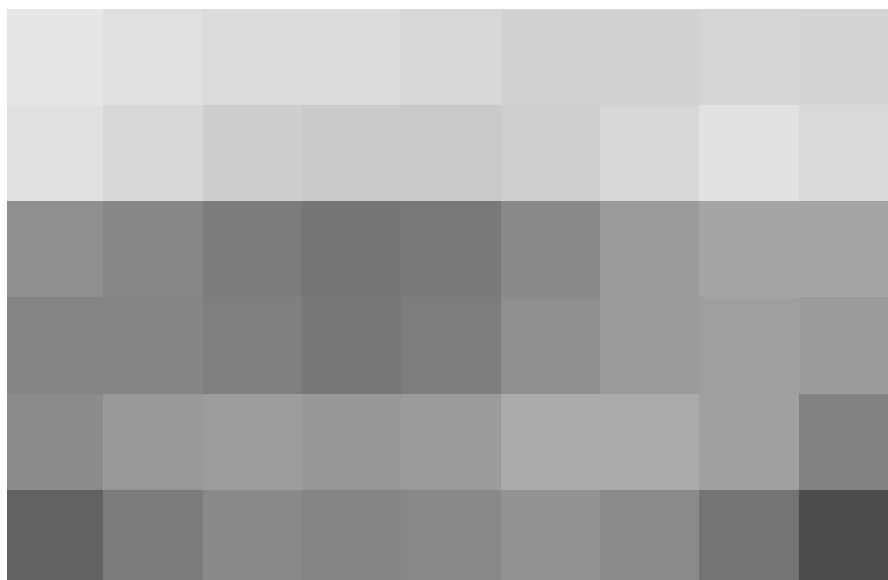
476. Capriate prefabbricate in calcestruzzo armato per luce di 8.60 ml in opera, in Rossi, V., *Orientamenti per l'edilizia: elementi prefabbricati*, Atti della Società degli ingegneri e degli architetti - Rassegna Tecnica, n. 5, pag. 213.

formalismo tecnicistico astratto. In sintesi, per far fronte all'esigenza costruttiva di realizzare le 'nuove abitazioni rurali moderne', si era proposto un sistema articolato di nuclei definiti attraverso un metodo di composizione fatto di «*cellule elementari*», estremamente semplici sia dal punto di vista costruttivo (e quindi economico) che formale²⁸⁴.

Dal punto di vista costruttivo, le case coloniche erano realizzate con sistemi prefabbricati innovativi che sancirono un definitivo abbandono dei sistemi e materiali da costruzione appartenuti all'atavica tradizione rurale. Infatti, l'organizzazione della produzione e il montaggio di queste case prefabbricate, permise di ri-

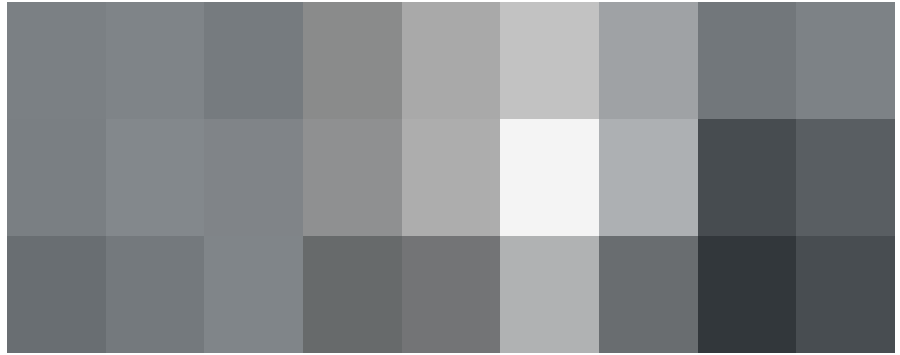
durre al minimo (o addirittura di eliminare) le maestranze specializzate nel cantiere (operai, riquadratori e carpentieri), assorbendo, così, l'esuberante massa di braccianti disoccupati, che appresero rapidamente l'uso di macchine moderne (facili al comando) nonché i semplici sistemi di montaggio²⁸⁵.

Per esempio, verso la fine del 1954, e l'impresa Gastone Guerrini di Torino, dopo un attento studio, convenne nell'adottare il procedimento costruttivo di origine francese denominato *Calad*, perfezionandolo tanto da dar luogo poi ad un altro brevetto dal nome S.A.C.I.S. Gli elementi prefabbricati delle chiusure verticali, aggiornati – come detto – secondo il nuovo brevetto S.A.C.I.S. sono a cassa vuota, costituite dall'accoppiamento di due lastre appoggiate e solidarizzate ad un cordolo di base opportunamente sagomato; le lastre sono collegate tra di loro mediante speciali giunti a coda di rondine, che sono riempiti di calcestruzzo, assolvendo alla funzione di irrigidimento della struttura (specialmente per le case multipiano) (fig.475). La copertura con tegole piane della tipologia marsigliese, invece, presenta due falde inclinate sostenute da capriate prefabbricate in calcestruzzo armato definite da due elementi simmetrici uniti in situ con giunti metallici (fig.476).

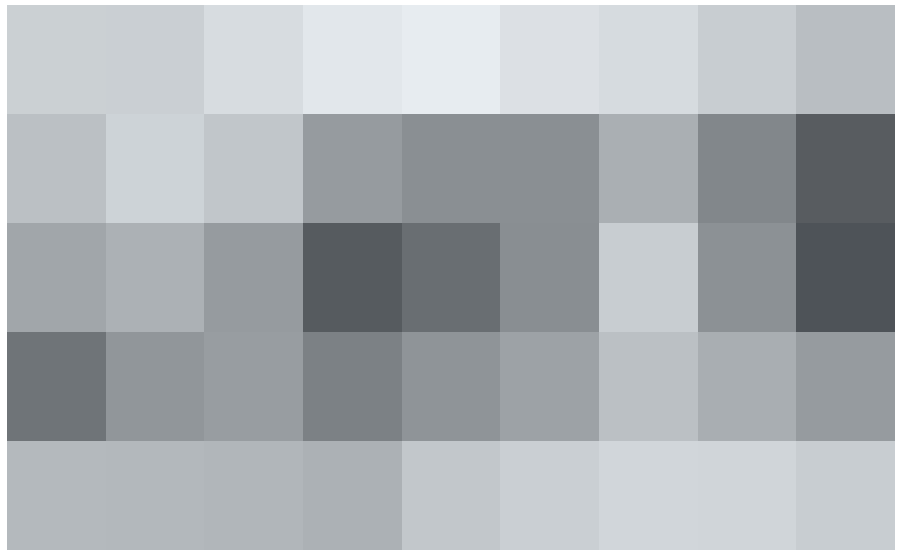


476

Sempre in merito al tema dell'abitazione moderna italiana è interessante citare l'avventura coloniale italiana, che ha condizionato fortemente la storia dei popoli e delle civiltà del Corno d'Africa, imponendo anche radicali modifiche agli spazi urbani ed architettonici. Già dal Piano Regolatore di Tripoli (1912), poi nelle varie architetture realizzate, la poetica costruttiva adottata dai colonialisti prevedeva una modernizzazione delle forme locali molto lontane dalle tipologie tradizionali. Tuttavia, durante i primi tempi di colonizzazione, gli esorbitanti costi di trasporto dalla madre patria alle colonie e i costi di produzione del calcestruzzo (nel 1936 in Italia il costo era di circa 15 lire a quintale, mentre in Etiopia arrivava a 750 lire al quintale²⁸⁶), spinsero il Governo ad adottare criteri progettuali che sfruttassero quanto più possibile le risorse architettoniche locali («[...] le strutture murarie principali saranno previste in muratura di pietrame con cordoli di conglomerato cementizio a ogni piano e copertura a tetto [...]»²⁸⁷). Ben presto, però, si intuì la potenzialità della prefabbricazione per la realizzazione di edilizia economica e “leggera”, smontabile e distribuita facilmente nelle colonie. Dalle classiche abitazioni cilindriche *tucul* con tetto di paglia, si passò a costruzioni residenziali prefabbricate nate dall'esigenza di promuovere l'architettura Moderna attraverso la ricerca di nuovi materiali e l'impiego di tecniche costruttive innovative. Inizia, così, nei primi anni Trenta, uno sforzo continuo volto a dotare le città coloniali di costruzioni degne dell'architettura italiana, attraverso l'uso di sistemi costruttivi che sanciscono il distacco dalla tradizione costruttiva locale: telai in calcestruzzo armato e acciaio, strutture miste (calcestruzzo e muratura) e nuovi brevetti diventano gli esempi della modernità architettonica nelle colonie. Iniziano processi di studio sulle nuove tipologie insediative, come, ad esempio, quelle di Luigi Piccinato, con interessanti sperimentazioni di sistemi prefabbricati in nervacciaio²⁸⁸ (fig.477) o le “abitazioni economiche” di Giuseppe Pagano ideate con si-



477

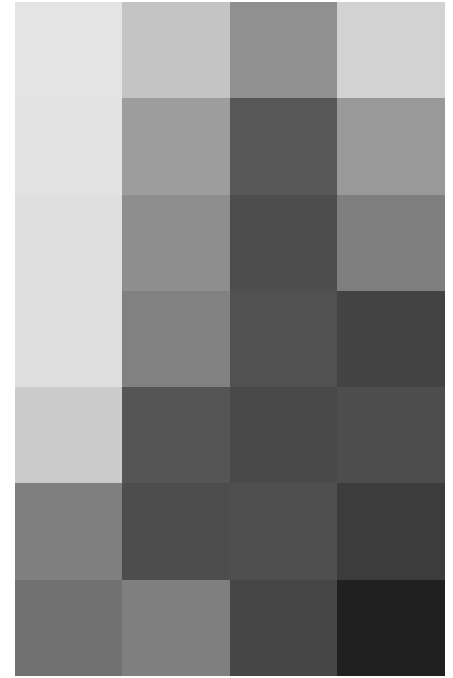
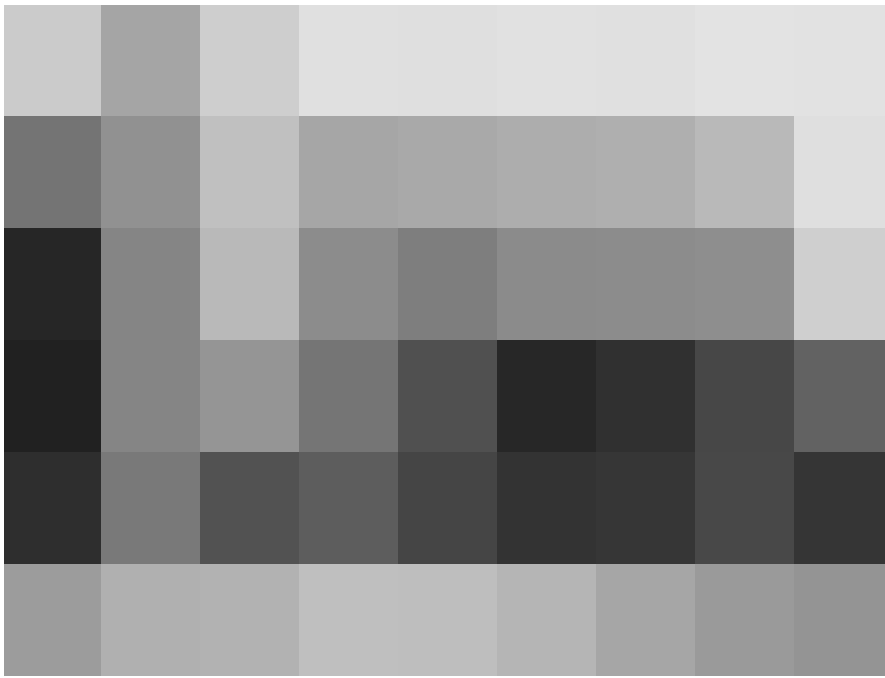


478

stemi costruttivi in pannelli di calcestruzzo da realizzarsi a piè d'opera. Fu così che le politiche coloniali (sebbene indirizzate ai paesi meno ricchi) divennero occasione di vantaggio economico e di investimento per molte imprese ed industrie italiane. Inizia lo sviluppo di brevetti di case prefabbricate e smontabili dall'alto valore tecnologico ed industriale, suffragato da una capillare e specializzata rete commerciale di distribuzione nelle colonie. Si pensi, ad esempio, al già citato brevetto “l'Invulnerabile”, dell'omonima società Bolognese (commercializzato dalla ditta F.E.R.V.E.T. di Bergamo) che, sviluppato proprio per le colonie, consentì la realizzazione di numerosi edifici sfruttando pannelli in “Eraclit” su strutture smontabili a telaio in acciaio (fig.478). Fu così che la modernità nelle abitazioni d'Oltremare, non rappresentava più «un esempio di architettura coloniale, ma un'espressione completa della nostra civiltà politica, sociale, artistica e tecnica»²⁸⁹.

477. Modello di casa coloniale a struttura in “nervacciaio tipo T3 Tropicale”, in Piccinato L., *L'architettura italiana*, Agosto, 1935,

478. Insediamenti prefabbricati con brevetto “l'Invulnerabile” e pannelli di rivestimento in Eraclit nel villaggio di Dire Dawa, Etiopia, in Zagnoni S., *Rassegna, Architettura nelle colonie italiane in Africa*, Torino, 1930, pag.25.



Nel primo Moderno non c'è traccia tangibile dell'architettura italiana nel panorama internazionale, in parte dovuto alle contingenze politiche e protezionistiche del Fascismo, in parte legato ai temi di corporativismo, espansione demografica e sviluppo del ruralismo; in parte per lo stretto legame della tradizione costruttiva con la pietra naturale ed artificiale ora in grado di rivestire i nuovi telai in calcestruzzo armato. Le costruzioni finanziate dallo Stato, infatti, dovevano favorire l'economia nazionale attraverso l'uso di materiali locali garantendo tutti i livelli occupazionali. L'adozione su larga scala del sistema della struttura in calcestruzzo armato accompagnata con materiali tradizionali soddisfece piccole e medie imprese, ma limitò le innovazioni connesse alla standardizzazione e alla produzione in serie, come l'esempio delle strutture metalliche che rimasero in gran parte allo stadio sperimentale. Così le case unifamiliari prefabbricate di Adalberto Libera, la casa in struttura in acciaio di Giuseppe Pagano e Franco Albini (con la consulenza di Renato Camus, Giancarlo Palanti, Giuseppe Mazzoleni, Giulio Minoletti) nel Parco di Milano (figg.479-480) ed il prototipo di una abitazione tipica a struttura in acciaio del Padiglione Ligure (1933) di Luigi Carlo Daneri e Luigi Vietti (fig.481) rima-

sero allo stadio di prototipi presentati alle numerose fiere nazionali.

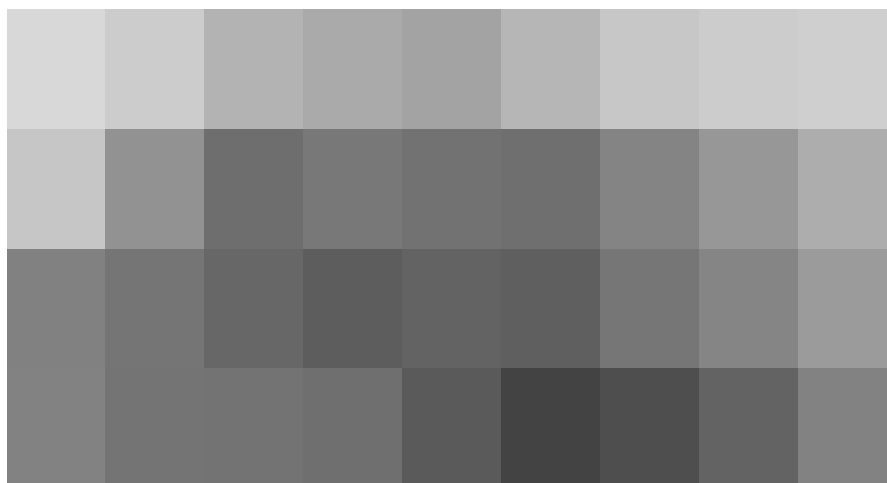
Tuttavia va specificato che il processo di industrializzazione e prefabbricazione seriale incentivò lo sviluppo di svariate tipologie di pietra artificiale (astromarmo, fulget, cromatit, theolite, etc.), conglomerati cementizi e litocementi (duralbo, porolite, aquila bianca, etc.), intonaci e stucchi (terranova, acoustical plastic, pietranova, stucconovo, etc.), materiali ceramici a matrice minerale (italkinker, litoceramica, ceramica joo, diasporo, etc.), vetri, cristalli infrangibili e diffusori per vetrocemento, ma anche rivestimenti per interni ed esterni come l'italeum (declinazione del linoleum e prodotto a base di pomodoro ossidato distribuito uniformemente su una superficie di tela di ryon), il prealino (piastrelle rigide in linoleum e legante termoplastico), le carte da parati dell'italparato, salubra e tekko, il rivestimento vetroso desegnat e numerosi altri materiali. Non manca la sperimentazione di materiali termoacustici in grado di sfruttare risorse locali a matrice animale (feltro battuto, trichopiése) ed a matrice vegetale (antivibrite, assorbite, coccoibite, maftex, solomit, etc.). Tra questi, la tipologia di termoisolante più significativa per l'analisi del sistema involucro nel Moderno in Italia è il Celotex, materiale

479. Giuseppe Pagano, Franco Albini, Renato Camus, Giancarlo Palanti, Giuseppe Mazzoleni, Giulio Minoletti, Casa a struttura d'acciaio presentata alla V Triennale di Milano - Mostra dell'abitazione, Milano, 1933, © Stabilimento Fotografico Crimella - Fondazione La Triennale di Milano.

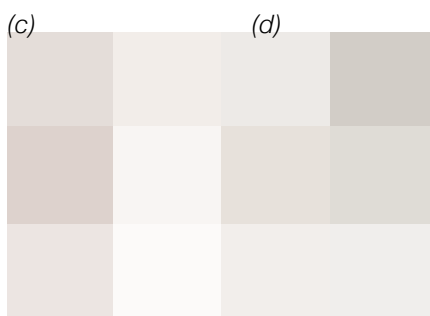
480. *Ibidem*.

481. Vista dal basso della colonna degli ascensori della abitazione tipica a struttura d'acciaio, progettata dagli architetti Luigi Vietti e Luigi Carlo Daneri, alla V Triennale di Milano - Mostra dell'abitazione, Milano, 1933, © Stabilimento Fotografico Crimella - Fondazione La Triennale di Milano.

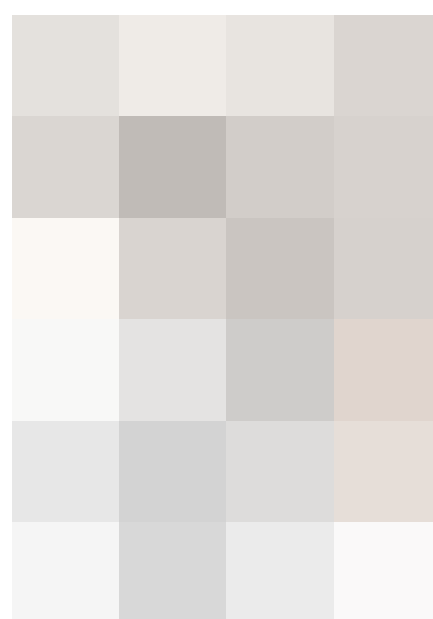
di provenienza americana (brevetto Celotex Company di Chicago, 1922) e commercializzato in Italia dalla S.A.R.S.I. di Milano a partire dal 1929. Tale materiale trova, quindi, in Italia una sua specifica declinazione legata alle particolari caratteristiche delle essenze vegetali presenti nel bacino del Mediterraneo (Italia e colonie) (fig.482). «Viene presentato in lastre costituite da fibre di canna da zucchero pressate, trattate chimicamente, hanno proprietà coibenti isolanti termoacustiche, leggere in spessori anche minimi, e come il precedente si può impiegare sotto i pavimenti o come soffittature»²⁹⁰. «Il Celotex si adopera per risanare ambienti umidi, freddi, rumorosi; per costruire una sopraelevazione leggera e poco costosa; per fare tramezzi fissi e spostabili [...], per apparecchi radio, altoparlanti, etc.»²⁹¹. Come coibente acustico, invece, si trovano in commercio delle varietà del prodotto, quali l'Acusti Celotex («presenta la caratteristica di piccole cavità cilindriche praticate su una faccia delle lastre, profonde circa 2/3 dello spessore [...] e le dimensioni di 1.22x0.46 m»²⁹²) e il Lino-base (spessore 0.6cm) indicato per sottopavimenti. Inoltre, il Celotex può essere sagomato facilmente attraverso un processo di bagnatura con acqua utilizzandolo, quindi, per l'isolamento di tubazioni ed impianti.



482



483



484

L'applicazione del Celotex su involucri a telai verticali in legno avviene mediante apposizione di pannelli sui montanti, disposti ad una distanza tale da offrire una base per la chiodatura in chiodi galvanizzati di ogni lato del pannello. I giunti tra due pannelli, invece, possono essere mascherati con fasce dello stesso materiale, con fasce di legno compensato o fibra speciale, oppure si possono lasciare aperti, senza alcun coprigiunto, con un buon effetto decorativo. L'applicazione, invece, del Celotex su murature di mattoni o calcestruzzo armato, può avvenire in diversi modi: con chiodature su fasce in legno a interasse di circa 40cm o fissando i pannelli, mediante chiodatura, su una listatura in legno incastrata nei giunti di malta della muratura o,

ancora, inserendo nella muratura elementi preformati in calcestruzzo, nei quali trovano facile presa le chiodature di fissaggio di ciascun pannello o mediante applicazione diretta del Celotex su muratura con gesso mescolato a colla²⁹³ (figg.483-484).

Nell'ambito della rinnovata cultura italiana, quindi, il sistema involucro assume una peculiare ricercatezza estetica e funzionale attraverso il disegno delle committiture e delle venature litiche, in cui il valore aggiunto del telaio in calcestruzzo armato mantiene l'unità formale del valore archetipico della muratura portante. Il florilegio delle numerose riviste storiche portano a sintetizzare il dibattito efferato sul concetto di modernità, sul rapporto con la

482. Costruzioni temporanee ed economiche con le pareti esterne rivestite in Celotex, in Griffini E., *Costruzione Razionale della Casa*, Hoepli, Milano, 1952, pag.73.

483. Elaborazione grafica delle tipologie di applicazioni del Celotex: a) Celotex applicato mediante chiodatura su fasce di legno a interasse di circa 40cm b) Celotex applicato mediante chiodatura su tavole orizzontali in legno incastrate nei giunti di malta c) Celotex applicato mediante chiodatura su file di blocchi preformati in calcestruzzo d) applicazione diretta del Celotex su muratura con gesso mescolato a colla.

484. Elaborazione grafica di un dettaglio tecnico del prototipo della "Casa delle Vacanze", progettata per la V Triennale di Milano dall'architetto E. Lancia, in *Architettura: rivista del sindacato nazionale fascista architetti*, Roma, 1933.



485

485. Adalberto Libera, Palazzo dei Congressi realizzato in occasione dell'Esposizione Universale di Roma del 1942.

tradizione e l'impiego di tecniche costruttive innovative. Questo divenne l'argomento principale della ricerca di un'Arte di Stato tra le giovani avanguardie architettoniche che promuovevano un'architettura in rottura con gli stilemi della tradizione e la vecchia cultura accademica che professava la continuità con l'antica pratica del fabbricare.

Nell'impiego della pietra trasformata industrialmente scaturisce la *pax decorum* tra le due correnti di pensiero, ovvero tra chi deliberatamente sceglieva di impiegare materiali industriali (acciaio, vetro e calcestruzzo) e chi professava un ritorno all'immagine monolitica dell'architettura romana. Mentre Peter Behrens (Germania), Hendrik Petrus Berlage (Olanda), Otto Koloman Wagner (Austria) e Auguste Perret (Francia) accompagnavano rispettivamente lo stile nazionale dalla tradizione ottocentesca ai caratteri propri della Modernità, in Italia il Futurismo promuove l'uscita dalla provinciale cultura artistica borghese per proiettarla ad una sofisticata e veloce visione industriale.

Superando la semperiana scissione tra nucleo e rivestimento, i futuristi trasformano l'architettura in un metalinguaggio attraverso nuovi valori decorativi, tecniche e materiali, temi che torneranno preponderanti con il Razionalismo Italiano che si impegnerà nella battaglia per l'architettura moderna nella definizione di un'Arte di Stato e nella ricerca - attraverso la pietra - della modernità che vedrà la sua più completa e grandiosa manifestazione con l'Esposizione Universale di Roma nel 1942 (fig.485). In particolare, nell'Italia fra le due Guerre, si forma un gruppo di architetti (conosciuti come "Gruppo 7", fondato da Carlo Enrico Rava nel 1926) che, animati dal razionalismo d'Oltralpe, giunsero a rinnovare il pensiero architettonico attraverso una ricerca formale e funzionale della nuova edilizia razionale italiana. Questo gruppo di architetti, nato all'alba della prima era fascista, cercò di dare un volto all'architettura di Regime di cui molti di loro erano forti esponenti e convinti sostenitori (ad esempio Giuseppe Terragni, Giuseppe Pagano, etc.).

Tuttavia, benché un tale sodalizio portò alla nascita del MIAR (Movimento Italiano per l'Architettura Razionale), le opere proposte erano fin troppo rivoluzionarie per poter appartenere ad un regime autoritario tanto che, dopo pochi anni, ogni movimento fu sciolto in favore di una architettura ‘eco’ della generosa tradizione classica italiana. Marcello Piacentini insieme ad altri eminenti architetti italiani (quali Cesare Bazzani, Armando Brasini, etc.) divennero i principali esponenti di una architettura che abbandona «*la ricetta del Sommaruga dalla orrenda valanga delle facciate cementizie e, per reagire contro queste [...], torna indietro e fa un grosso passo avanti nello stesso tempo. Si cominciò ad odiare il cemento come materiale da decorazione, e tutto quanto era falso e volgare*»²⁹⁴.

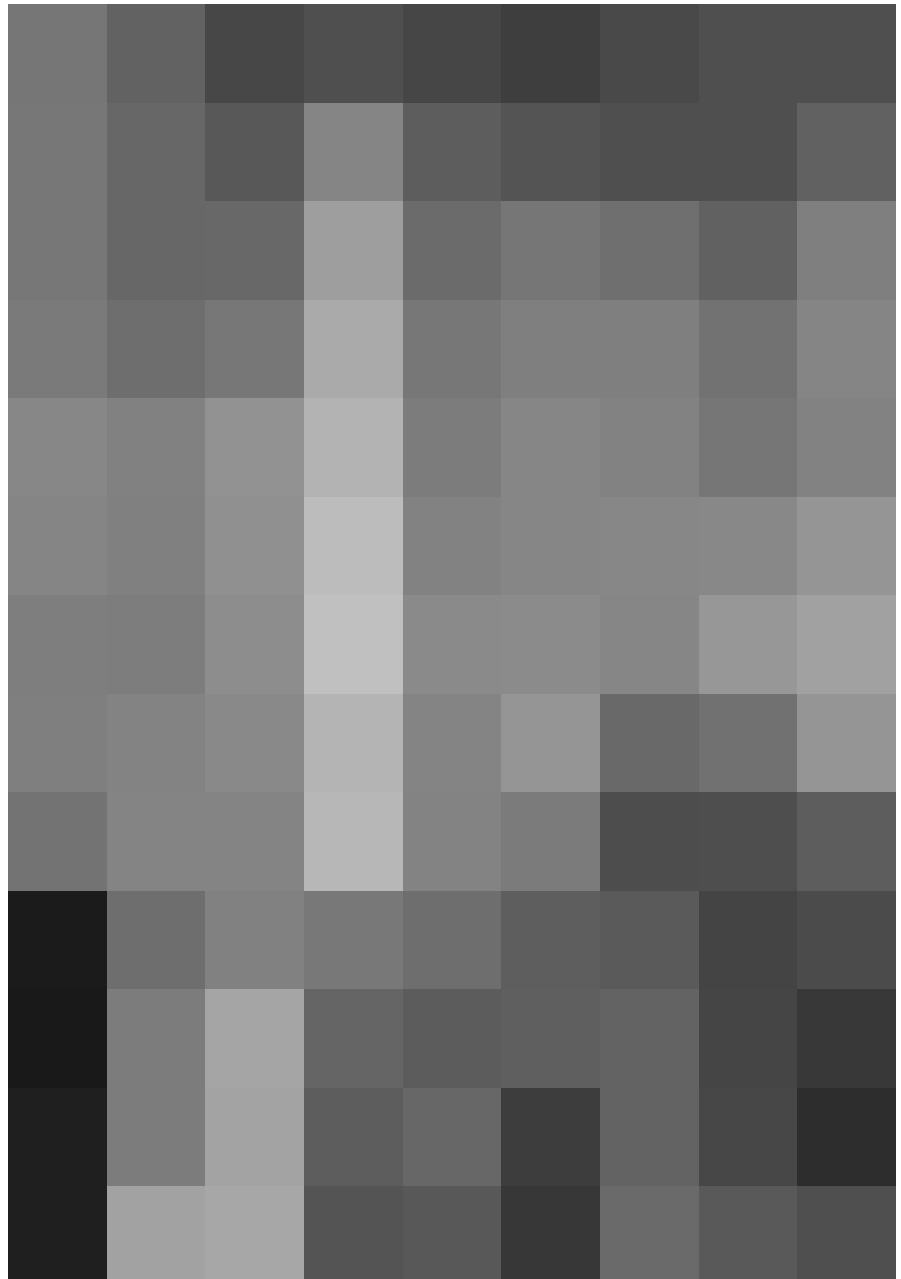
Nasce, pertanto, l'idea di una architettura “imperiale” che sia manifesto della potenza di Regime e che ricordi l'antica architettura Romana, in cui predomina il senso ampio e solenne traendo ispirazione dai ruderi imperiali e rifacendosi all'arte cinquecentesca dalle superfici dilatate e dalle ieratiche sagome (fig.486). Infatti, differentemente dagli architetti mitteleuropei, che non godono di una forte e radicata stratificazione millenaria d'arte e architettura, i progettisti italiani sono frenati da queste tendenze Moderne per il peso della tradizione e il rispetto per il passato. Si impone, così, uno stile monumentale unico, e non ripetibile, tassellato di marmi, pietre e ceramiche che diventa propaganda della potenza italiana, esaltazione dello stile nazionale fra le masse e *urbis ornamentum* delle piazze d'ogni città italiana. «*Una facciata in pietra [...] non costa molto di più di una facciata in cemento. Ed una facciata in pietra sarà sempre più bella di una in cemento! Non possiamo costruire soltanto e sempre in cemento armato, per essere moderni a tutti i costi!*»²⁹⁵. Con le ‘granitiche’ parole di Piacentini si sancisce, così, l'idea di razionalismo monumentale che divenne la principale corrente architettonica di Stato fra le Due Guerre, in cui il

“neoclassicismo semplificato” coniugava le risorse di cui l'Italia autarchica era ricca: pietre, marmi, graniti, stucchi, etc. sono, pertanto, vincoli e non limitazioni nelle mani degli architetti moderni italiani (fig.487).

Iniziano così notevoli cambiamenti nell'impostazione urbana ed architettonica della Nazione, dalle città di fondazione alla ridefinizione di importanti porzioni di città che vengono “monumentalmente ridisegnate”, demolendo brani di città storiche per dar spazio a edifici dal carattere didascalico, capaci di raccontare il passato e il presente della ‘romanità’ imperiale.

486. Emanuele Mongioli, Casa Littoria di Ravenna, 1938.

487. Nella pagina successiva: Torre Littoria di Aprilia, città di fondazione fondata il 25 Aprile 1936.



Una facciata in
pietra [...] non costa
molto di più di una
facciata in cemento.

Ed una facciata in
pietra sarà sempre
più bella di una
in cemento! Non
possiamo costruire
soltanto e sempre
in cemento armato,
per essere moderni

a tutti i costi!

- Marcello Piacentini

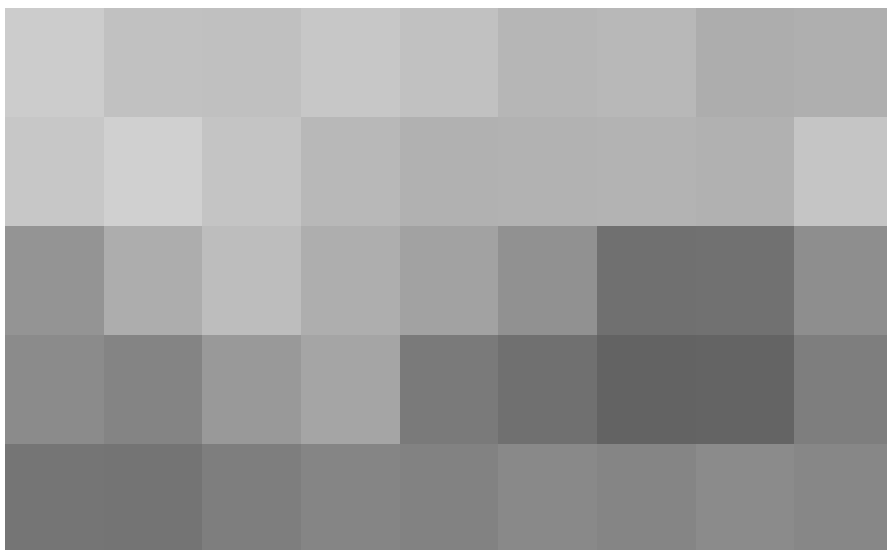
Questa ricerca vocata alla rinnovata e dicotomica continuità con i valori assoluti della tradizione si sviluppa secondo due criteri: dal punto di vista figurativo e architettonico si ha una maggiore caratterizzazione formale e plastico dell'edificio, basato sul concetto di "monumentalità" e "razionalità" (non di processo, bensì quale recupero delle tradizionali regole compositive dell'architettura classica, basate sulla simmetria e l'armonia); dal punto di vista tecnico-costruttivo, invece, ha determinato la diffusione di nuovi materiali rinvenuti dall'industria (cemento, vetro, acciaio) e la diffusione del rivestimento lapideo sottile.

sere di vetro di colorazioni diverse (avorio, grigio, celeste, verde, lilla) posato su uno strato di cemento. Il rivestimento all'intradosso è risolto con un materassino di Vetroflex alto 3 cm, realizzato con cucitura in punti distanti fra loro 20 cm, irrigidito con una rete metallica e mascherato da una tela di vetro che offre anche un certo isolamento acustico. Sulla tela vetrosa del tipo amianto TXX del peso di 0,820 kg al mq, vanno appuntati dei cordoni di tessuto di vetro del diametro di 4 cm color avorio. Alla grande tela color avorio sono applicati poi a spruzzo due strati incrociati di Keferite rivestite con delle lamelle impiallac-

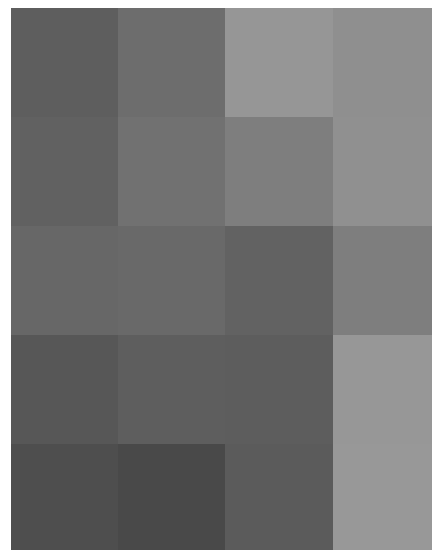
488. Adalberto Libera, Cantiere del Palazzo dei Ricevimenti e dei Congressi, 1939, © Roma sparita.

489. Dettaglio della struttura metallica di copertura, in Iori T., Poretti S., Alessandrelli E., Capurso G., Giannetti I., Martire F., Palazzi I., Storia dell'ingegneria strutturale in Italia - SIXXI 2, Gangemi Editore, Roma, 2015.

490. *Ibidem.*



488

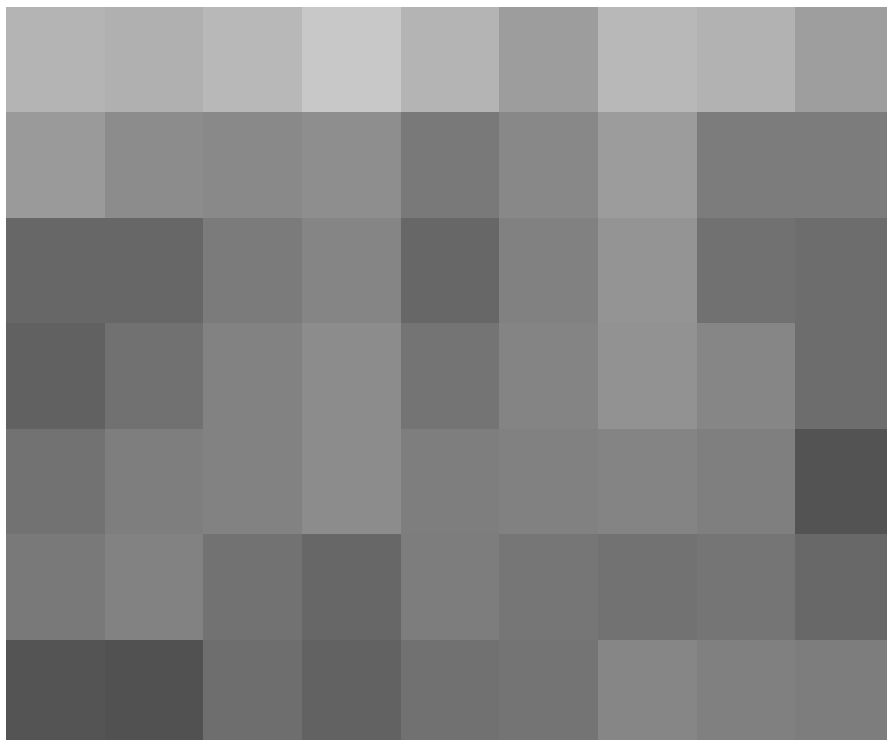


490

Per esempio nella grandiosa copertura a crociera del Palazzo dei ricevimenti e dei Congressi all'E42 progettato da Libera, nonostante il rigido regime autarchico, viene celata una imponente struttura in acciaio di 49 m di lato, costituita da due archi diagonali, quattro falcetti e l'elaborata membratura a telaio metallico secondo il sistema brevettato di Gino Covre (1892-1971) (figg.488-490). Libera fornisce anche indicazioni sulle stratigrafie: «l'estradosso è costituito da tavole Perret dello spessore di 2,5 cm, caldana di malta ed un pacchetto spesso 9 cm formato da calcestruzzo di pomice e da un triplice strato di feltri bitumati intercalati a tre strati di mastice; elementi di calcestruzzo retinato spessi 5 cm coi giunti sigillati con del mastice bituminoso; un rivestimento di tes-



489



Di grande interesse nello sviluppo esecutivo dell'involucro di copertura del Palazzo dei Congressi e che ha consentito la costruzione di grandi e piccole opere è un'altra invenzione Made in Italy: il *tubo innocenti*. Ideati negli anni '30 da Ferdinando Innocenti (1891-1966), i tubolari d'acciaio costituiscono mediante il loro assemblaggio rapido con giunti a manicotto, l'elemento portante delle strutture dei ponteggi (fig.491).

Un altro interessante esempio di grande innovazione per l'impiego di materiali quali vetrocemento, clinker e linoleum e per l'innovativa struttura portante in acciaio elettrosaldato (il primo caso in Italia) è la Torre Littoria di Torino, progettata dall'architetto Armando Melis de Villa e dall'ingegnere Giovanni Bernocco e costruita tra il 1932 ed il 1934 (fig.492).

491

491. Ponteggi in tubi Innocenti per la realizzazione della Torre piezometrica dell'Eur in occasione dei Giochi Olimpici di Roma del 1960. Sullo sfondo il Palazzo dello Sport progettato nel 1956 dall'architetto Marcello Piacentini e dall'ingegnere Pier Luigi Nervi.

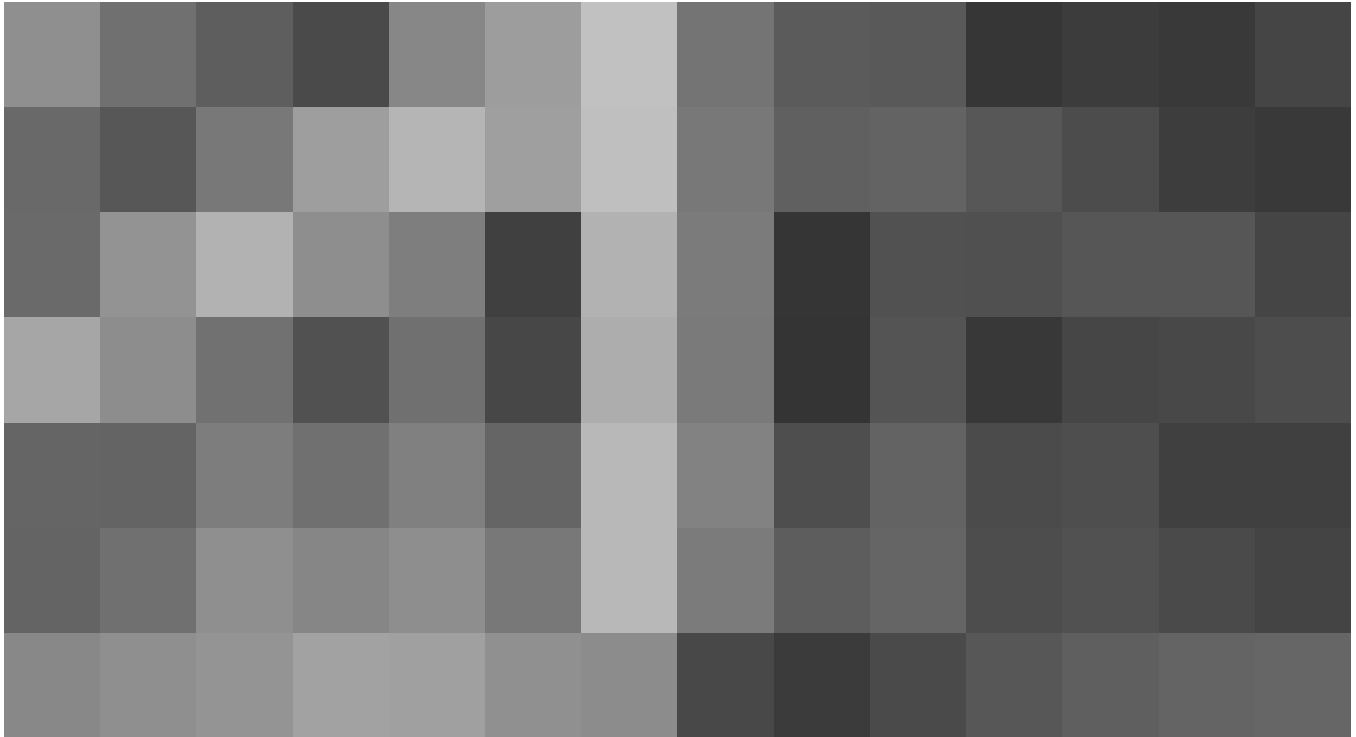
ciate e incastrate a correnti secondari sagomati a dente di sega che celano il sistema di fissaggio»²⁹⁶. L'involucro esterno è caratterizzato da pareti piene rivestite da masselli e lastre di marmo (76,5x62,5 cm) bianco Calacatta Statuario, levigate e spesse 4 cm.

Analizzando ancora le architetture di Regime, difficilmente queste si smaterializzano, liberandosi del proprio peso e dalla chiusura del volume. Anzi, questa gravosità si trasforma in vera e propria qualità formale e compositiva: per quanto i volumi siano scavati e modellati, a volte con stra-

492. Torre Littoria di Torino.



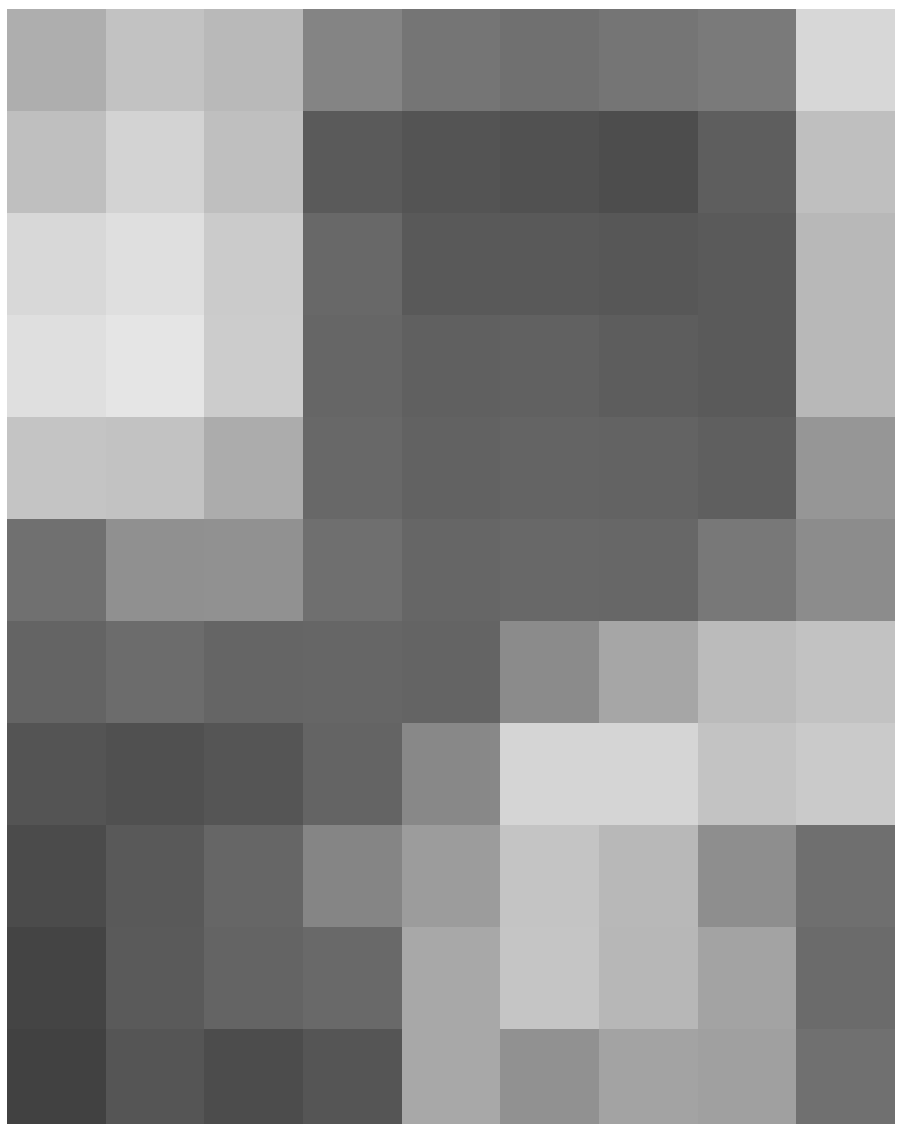
492



493

ordinaria abilità ed efferatezza, mai perdono la loro consistenza e massività in una perfetta misura geometrica e di divina armonia proporzionale. Tuttavia, sebbene nella loro veste formale queste architetture siano controcorrente rispetto ai modernismi d'Oltralpe (nostalgiche riproposizione di una "*architectura felix*"), l'apparato costruttivo e strutturale di queste opere (in particolare quelle pubbliche) tradisce molto spesso la tradizionale *ars costruendi* italiana. Infatti, molte di esse, pur mantenendo una *facies* tradizionale, celano al loro interno delle vere e proprie macchine strutturali - a volte anche complesse - fatte di pilastri e travi; pertanto è proprio in questo che si distingue chiaramente il contributo della modernità nell'architettura italiana rispetto al passato.

Per esempio il Palazzo della Civiltà Italiana progettato da Giovanni Guarini, Ernesto Lapadula e Mario Romano costruito in occasione dell'Esposizione Universale di Roma del 1942 è un ricettacolo delle migliori tecnologie offerte dall'*ars costruendi* italiana (figg.493-494). Dietro l'involucro in lastre di travertino di Tivoli arenato si cela un loggiato coperto da volte a crociera autoportanti realizzate con



494



493. Giovanni Guarini, Ernesto Lapadula, Mario Romano, Palazzo della Civiltà Italiana, Roma, 1942

494. *Ibidem*.

495. Dettaglio tecnologico del Palazzo della Civiltà Italiana. Legenda: 1 struttura intelaiata in c.a., 2 solaio laterocementizio tipo "Bidelta", 3 solaio laterocementizio tipo "Miozzo-Salerni", 4 finta volta a crociera il pianelle di laterizio, 5 pendini metallici, 6 muratura in mattoni di laterizio forato, 7 imbotte in mattoni di laterizio, 8 incasso per il passaggio degli impianti (elettrico e idrico), 9 rivestimento il lastre di travertino di tivoli areanto, 10 rivestimento interno con intonaco terranova, 11 infisso della tipologia ferro-finestra.

495

mattoni posati di piatto con malta cementizia e rinforzati con dei pendini metallici solidarizzati al solaio della tipologia Miozzo-Salerni. Il solaio è perfettamente incastrato con una trave di bordo collegante perimetralmente gli archi del portico. La struttura è tompagnata con una muratura realizzata con mattoni forati a quattordici fori. La struttura a telaio in calcestruzzo armato presenta dei pilastri sa-

gomati con un incasso per il passaggio dei pluviali (in facciata) e degli impianti (nel corpo centrale). Gli spazi interni caratterizzati da grandi luci sono coperti superiormente da solai della tipologia Bidelta, i cui caratteristici travetti presentano in corrispondenza degli appoggi un allargamento della sezione con una conformazione a 'becco d'oca', migliorando la resistenza agli sollecitazioni di taglio (fig.495).



496

Il concorso per il Palazzo delle Poste, bandito dal potente ministero delle Comunicazioni nel gennaio 1933, viene vinto dall'architetto Mario Ridolfi. La parte centrale del progetto comprendeva: l'ingresso, il salone pubblico, la sala dei portalettere al retro e la sala apparati telegrafici al primo piano. Due corpi laterali erano destinati, al piano terra, ai servizi; due scale accedevano ai due piani superiori adibiti ad uffici. Il progetto vincitore presentato nel maggio 1933 da Ridolfi rispettava le richieste del bando: suddivisione in tre parti caratterizzate da tre volumi, una facciata simmetrica verso la piazza, il volume centrale accentuato e più alto. Ma l'insieme viene sostanzialmente modificato nell'ottobre 1933 da Mario Ridolfi stesso. Il progetto finale è una struttura molto più compatta dove tutte e tre le parti vengono accorpate.

L'edificio, quindi, presenta una continuità della superficie che si interrompe solamente nelle parti centrali, sul prospetto principale e sul retro; l'involucro diventa una parete senza spigoli con una forma di doppia curvatura. Gli elementi che caratterizzano il prospetto frontale sono la scalinata centrale e la pensilina dell'ingresso; sul retro



497



496. Mario Ridolfi, Palazzo delle Poste in Piazza Bologna, Roma, 1933-35, © Archivio Ridolfi.

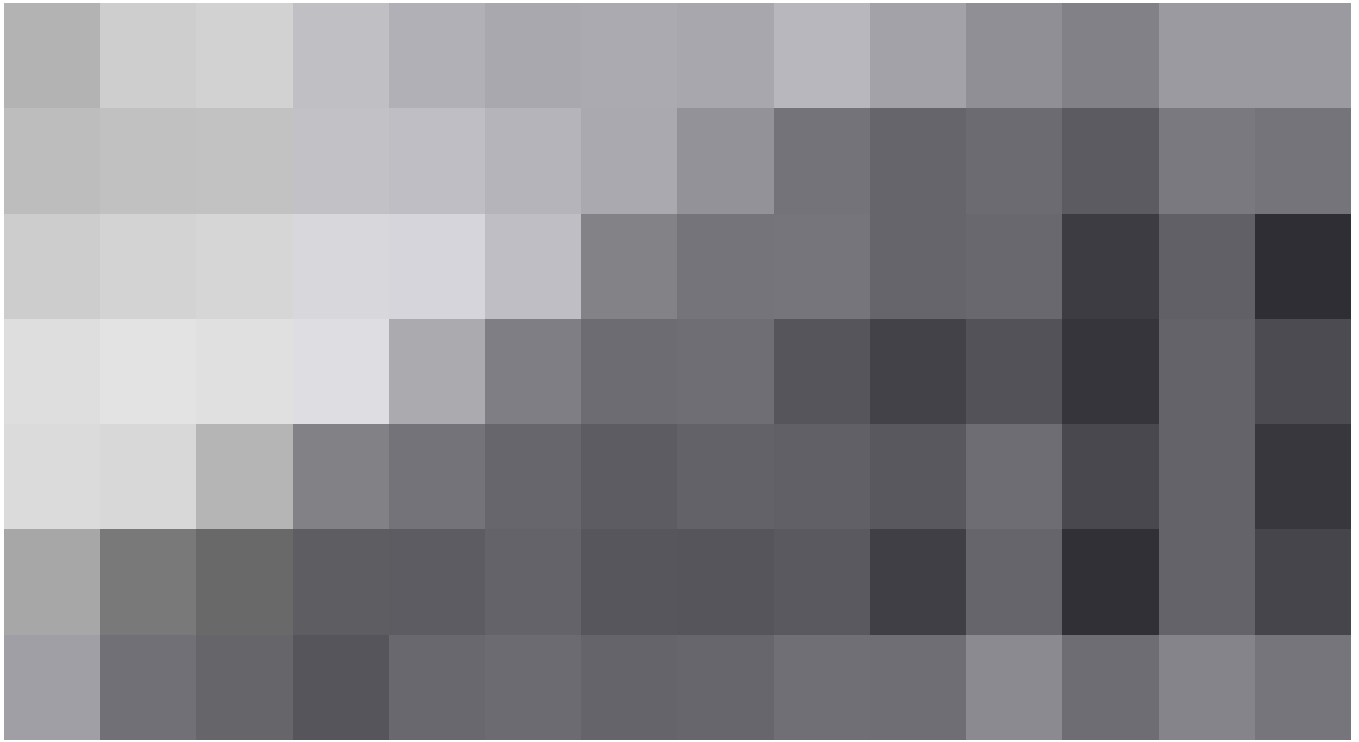
497. *Ibidem*.

498. Dettaglio tecnologico del Palazzo della Civiltà Italiana. Legenda: 1 struttura intelaiata in c.a., 2 soletta nervata a sbalzo in c.a., 3 solaio nervato in c.a. 4 muratura di tamponamento in blocchi di tufo con ricorsi "alla romana", 5 rivestimento il liste di marmo di travertino della maremma, 6 rivestimento il lastre di marmo nero del belgio, 7 infisso con profilati di acciaio "ferrofinestra" 8 controsoffitto con telaio di acciaio e vetri "termolux", 9 pavimento in lastre di granito grigio, 10 pavimento in piastrelle di grès ceramico, 11 stipite e soglia in marmo bianco di Carrara, 12 muratura in vetrocemento.

troviamo la presenza di una parete *curtainwall* e due cilindri di vetrocemento che coprono due scalinate.

Nell'adottare la soluzione di curtain wall, un elemento nuovo nell'architettura razionalista italiana in cui si scopre l'ossatura portante, vediamo come Ridolfi cerca di unire tradizione e modernità tramite la tensione dei materiali (travertino, vetro e calcestruzzo): un contrasto tra due opposti, lo scheletro portante e la tamponatura. L'ibridazione di muratura e telaio diviene il tema centrale nella sperimentazione dei giovani architetti italiani. Egli risolve il fronte

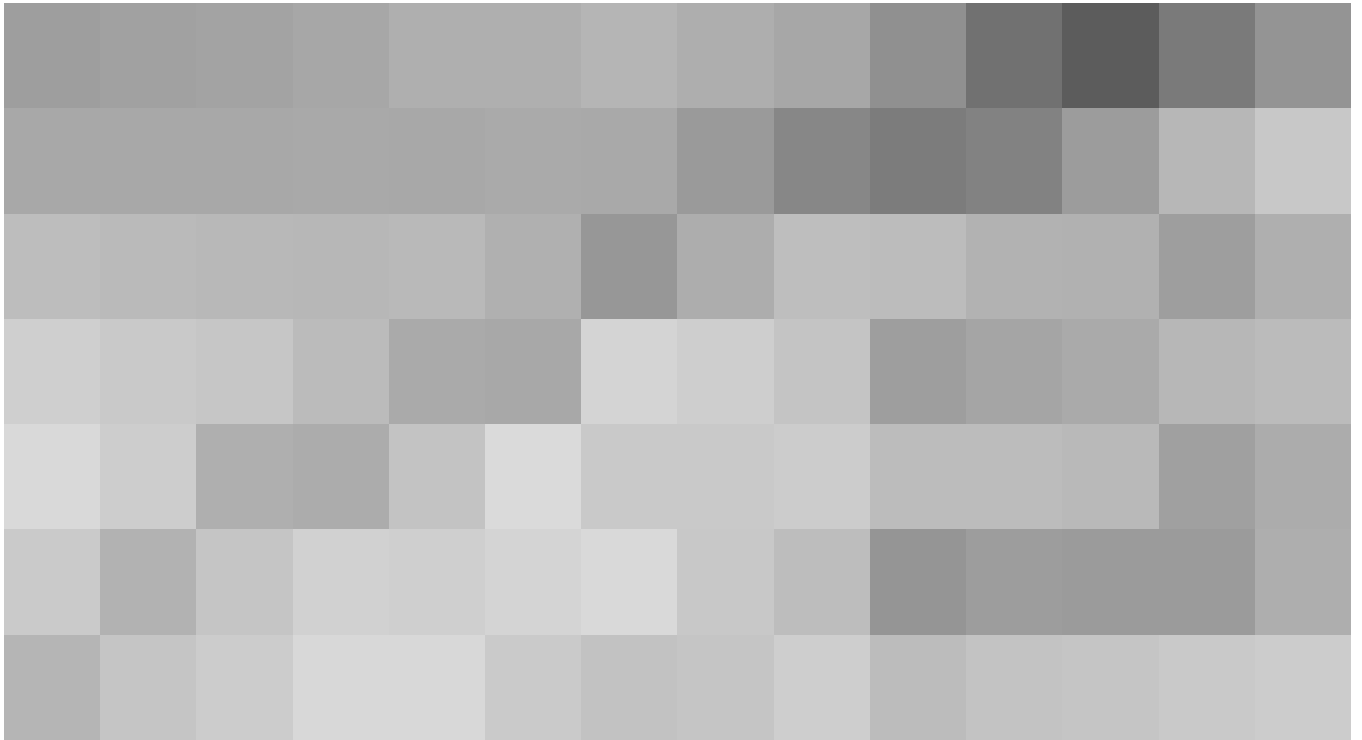
della piazza nascondendo il telaio con la muratura e modernizza il retro mettendo a nudo i pilastri in falso. La ricerca di Ridolfi di integrare volume, spazio interno ed arredi è qui potenziata, anche attraverso il rivestimento di legno degli sportelli, gli arredi della sala di lettere e altri abachi nelle scale. Le due scale a chiocciola che si trovano nelle parti laterali sono illuminate da pareti di vetrocemento. Le due scale sul retro, differenti per dimensioni e per orientamento, corrispondono in facciata a due fasce simmetriche, le pareti di vetrocemento (figg.496-498).



499



500



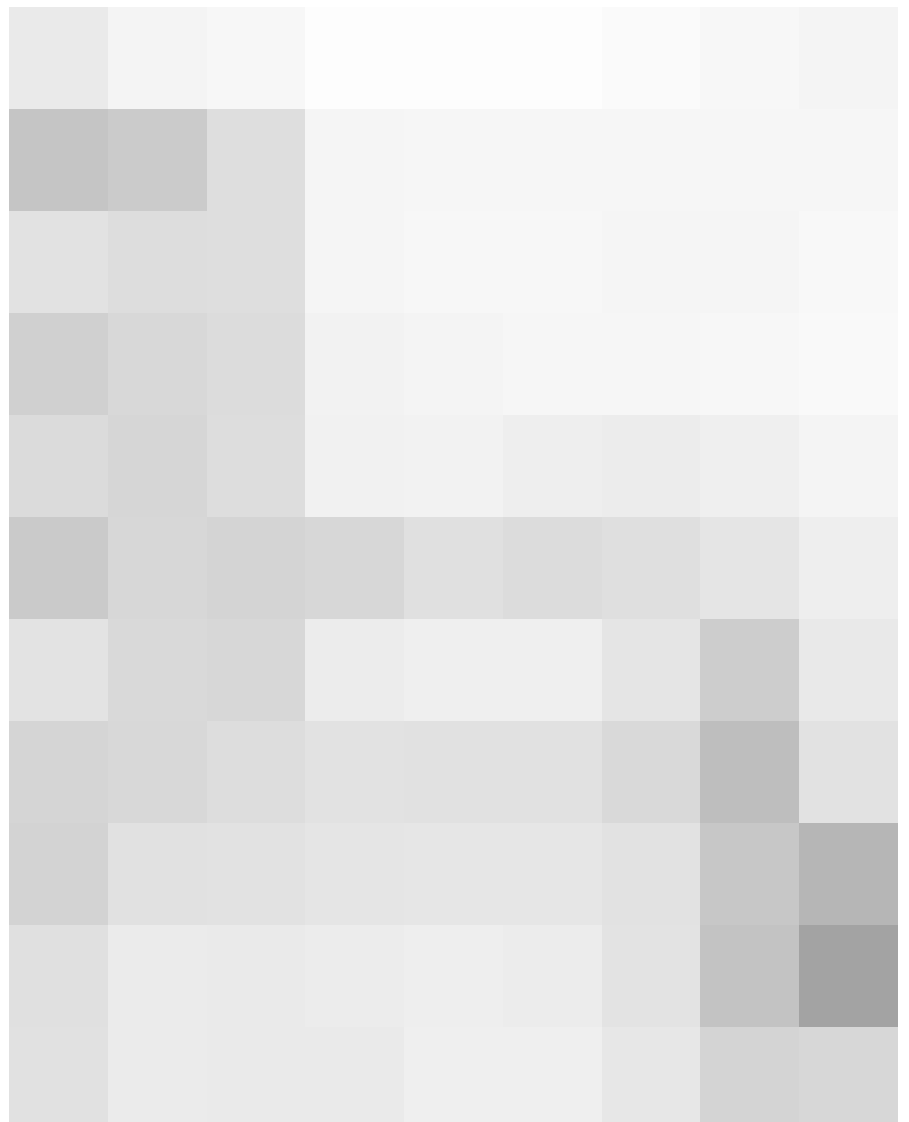
501

499. Mario Ridolfi, Palazzo delle Poste in
Piazza Bologna, Roma, 1933-35, ©
Archivio Ridolfi.

500. *Ibidem.*

501. *Ibidem.*

502. Mario Ridolfi, Progetto originale del
Palazzo delle Poste in Piazza Bologna,
Roma, 1933-35, © Archivio Ridolfi.



502

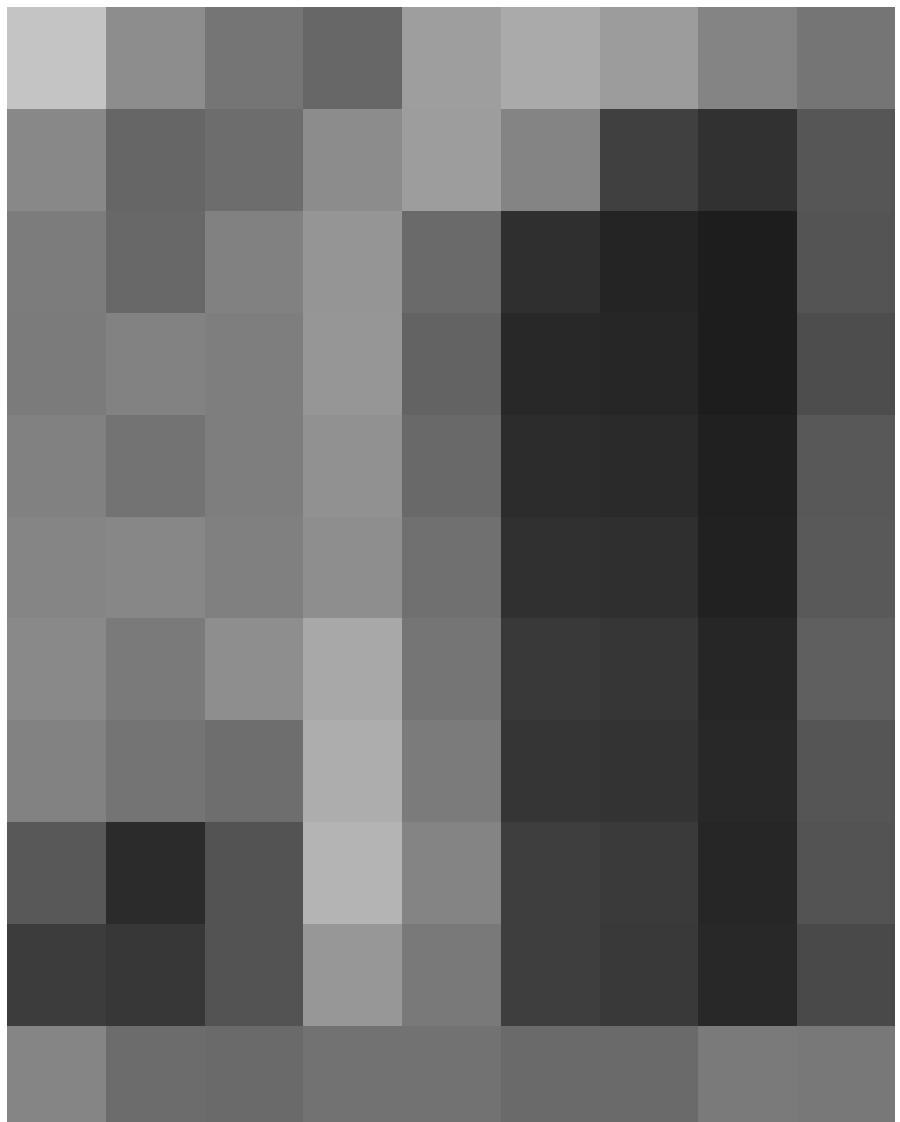


503

In questo contesto di fermenti culturali ma, soprattutto, industriali e costruttivi, emerge l'ingegno delle più interessanti e brillanti menti delle industrie del "Made in Italy", che portarono allo sviluppo di nuovi materiali e sistemi costruttivi che raccontavano un passaggio da una antica tradizione costruttiva ad una serializzata ed industriale, all'avanguardia anche rispetto alle vicine nazioni d'Oltralpe.

L'incidenza di questi sviluppi, benché potessero interessare in modo particolare le aree più industrializzate del Settentrione italiano, anche nel Mezzogiorno e nelle colonie italiane trovarono applicazione in architetture definite "minori", ma che tuttavia raccolgono, allo stesso modo di tante altre più note architetture, stilemi e caratteri costruttivi propri della 'modernità'.

Nell'ampio panorama delle più importanti figure di architetti italiani del Moderno, l'architetto Giuseppe Vaccaro (Bologna, 1896 – Roma, 1970) si distinse in particolare nelle sue diverse (spesso ardite) sperimentazioni architettoniche e per la capacità di coniugare le istanze proprie della tradizione costruttiva alle nuove avanguardie costruttive e tecnologiche di inizio Secolo.



504



505

503. Giuseppe Vaccaro e Gino Franzi, Palazzo delle Poste, Napoli, 1928-36, © Archivio Giuseppe Vaccaro.

504. *Ibidem*.

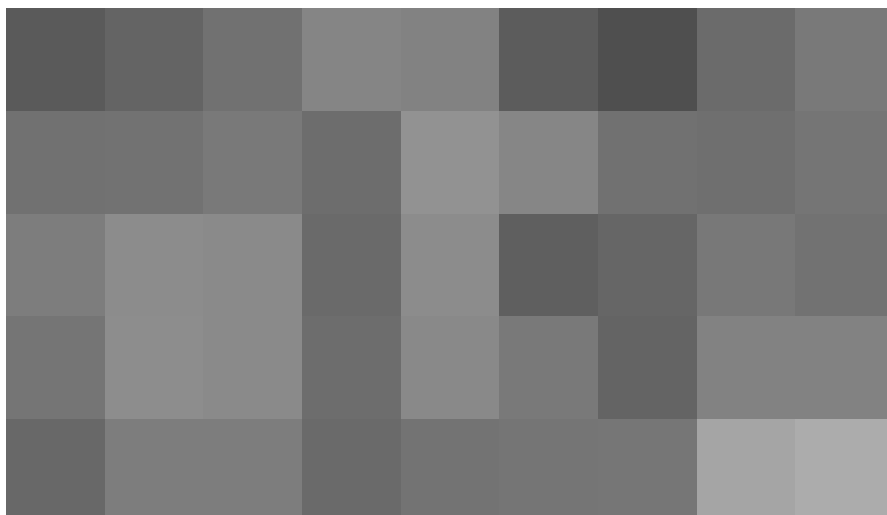
505. Cantiere del Palazzo delle Poste, 1933 © Archivio Giuseppe Vaccaro.

506. Particolare delle pareti del vestibolo d'ingresso, dell'aula centrale e della scala realizzate con il sistema costruttivo del vetrocemento armato, in Vaccaro, G., Edificio per le Poste e Telegrafi di Napoli, in *Architettura. Rivista del Sindacato Nazionale Fascista Architetti*, n.8, fascicolo VIII, Milano, 1936, pagg. 353-391.

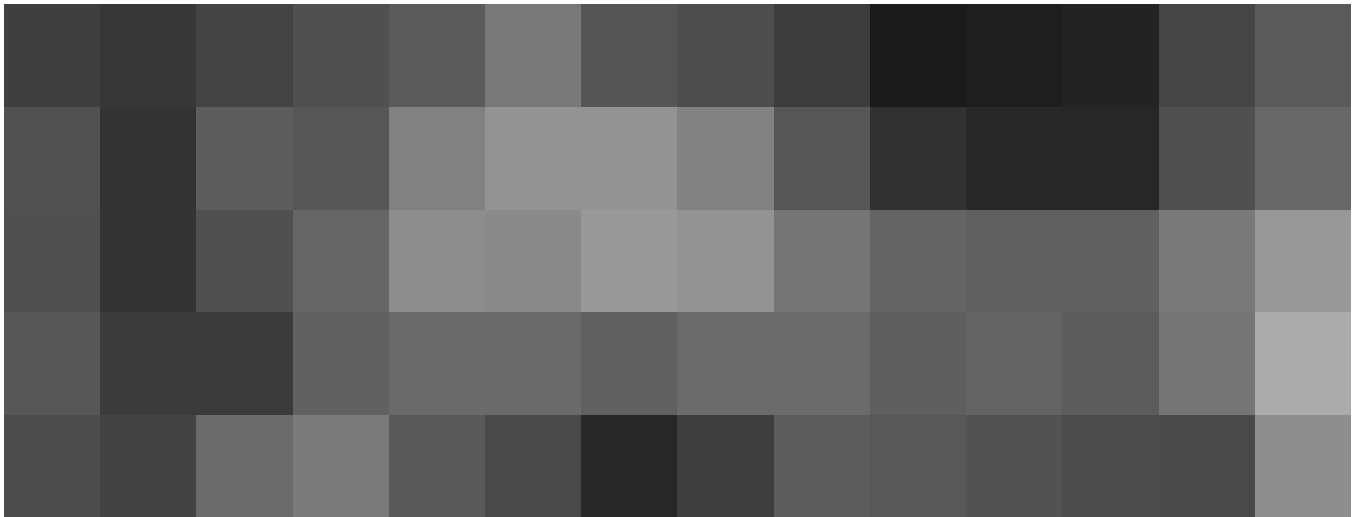
Egli fu autore, in particolare, di uno dei più importanti edifici del Moderno: il Palazzo delle Poste di Napoli (figg.503-505). L'edificio, progettato insieme a Gino Franzi tra il 1928 e il 1936, è caratterizzato dall'articolato prospetto iperbolico del fronte che diventa occasione di rinnovamento architettonico ed urbanistico della città di Napoli²⁹⁷.

La monoliticità di questa architettura e i caratteri tipologici, tecnologici, costruttivi e materici diventano uno strumento attraverso il quale l'architetto racconta una 'nuova Italia' che sperimenta innovazioni ed avanguardie di materiali e ingegni costruttivi²⁹⁸.

Il Palazzo delle Poste, infatti, raccoglie numerose istanze costruttive del Moderno come le murature curve in vetrocemento, le controsoffittature in "Graticcio Stauss", i mosaici vitrei "Desegnat" della Ditta Fontanit di Milano, il "Linoleum vari-colori", l'intonaco "Duralbo"²⁹⁹ (fig.506) e soprattutto un innovativo sistema della tessitura muraria della facciata che conta ben sette distinte versioni, più volte rivisitate a seguito della fervente critica da parte di esponenti dell'élite architettonica. Le prime tre versioni furono scartate in quanto presentavano incongruità tra le linee del prospetto e la struttura in calcestruzzo armato; la quarta venne considerata troppo tradizionale data la morfologia del paramento a giunti sfalsati e dalla presenza di cornici; la quinta presentava lastre di "diorite", una particolare roccia magmatica simile al granito, troppo massiva e pesante. Nella sesta versione la facciata assumeva il definitivo assetto, ulteriormente impreziosito nella versione finale con la rivisitazione degli architravi e stipiti stondate del portale centrale, rafforzandone la modernità della facciata. L'efferato dibattito circa la costruzione dell'opera, oltre a rispecchiare una fase cruciale dell'architettura moderna in Italia, costituisce uno dei capi-



506



507

saldi nell'ambito di un problema costruttivo, quello dei rivestimenti lapidei negli edifici in calcestruzzo armato e dello studio delle relative connessioni, gettando le basi per la sperimentazione del nuovo sistema dei rivestimenti "sottili", origine di una evoluzione tecnologica che nel dopoguerra avrebbe condotto alle attuali facciate ventilate e a nuovi sistemi di involucro 'a secco'.

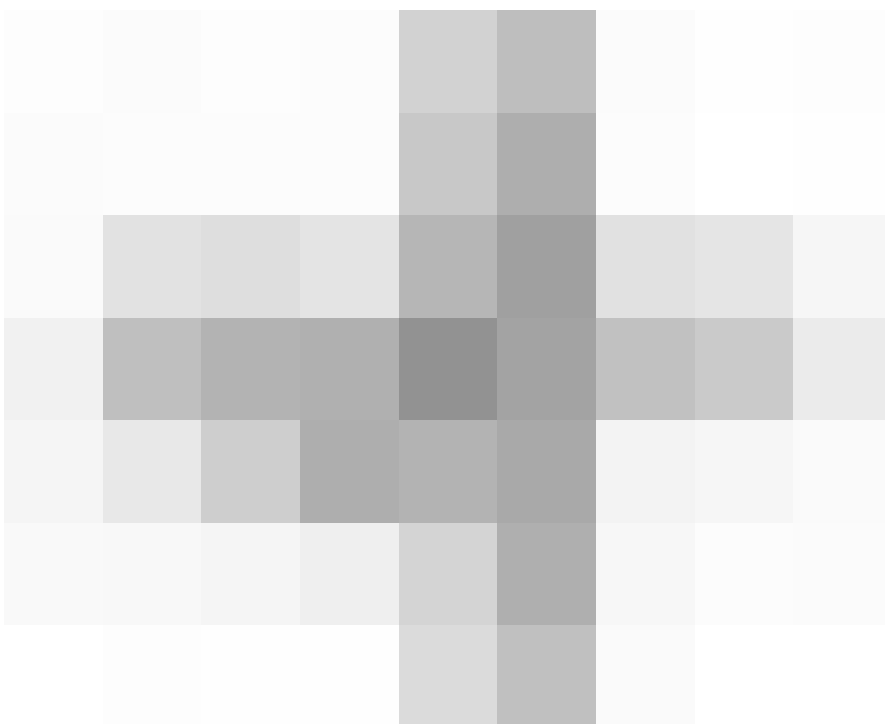
La struttura, progettata dall'ingegnere Francesco Fiacchi, è realizzata in calcestruzzo armato a "telai multipli" poggianti su una fondazione realizzata con una soletta di cemento armato (spessore 50 cm) e

travi di irrigidimento (di 1 m x 2 m di sezione). La fondazione è divisa in dieci elementi da giunti di dilatazione, sui quali gravano i pilastri della tipologia *Mannesmann*; tali pilastri erano realizzati con la tecnica del *beton frétte* che prevedeva il confinamento nel pilastro di un'armatura elicoidale, in grado di aumentare sensibilmente la resistenza a compressione del pilastro (figg.507-508).

Le murature sono realizzate in laterizio forato per le partizioni interne e in laterizio pieno per l'involucro esterno. I solai sono del tipo a soletta piena in calcestruzzo armato e del tipo misto in laterocemento.

507. Particolare della pensilina rivestita in vetro *Desagnat* (a sinistra) e dell'androne (a destra) con la superficie voltata e le colonne *Mannesmann* anch'esse rivestite in vetro *Desagnat*, in Vaccaro, G., Edificio per le Poste e Telegrafi di Napoli, in *Architettura. Rivista del Sindacato Nazionale Fascista Architetti*, n.8, fascicolo VIII, Milano, 1936, pagg. 353-391.

508. Dettaglio del pilastro della tipologia *Mannesmann*, realizzati con la tecnica del *beton frétte* che prevedeva il confinamento nel pilastro di un'armatura elicoidale, in grado di aumentare sensibilmente la resistenza a compressione del pilastro.



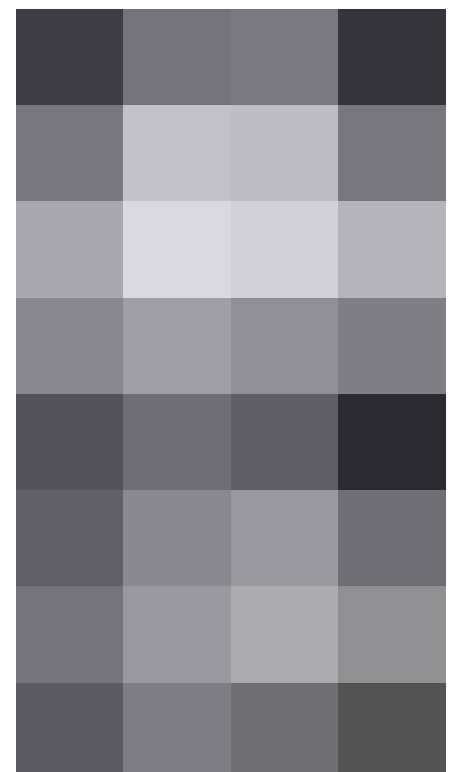
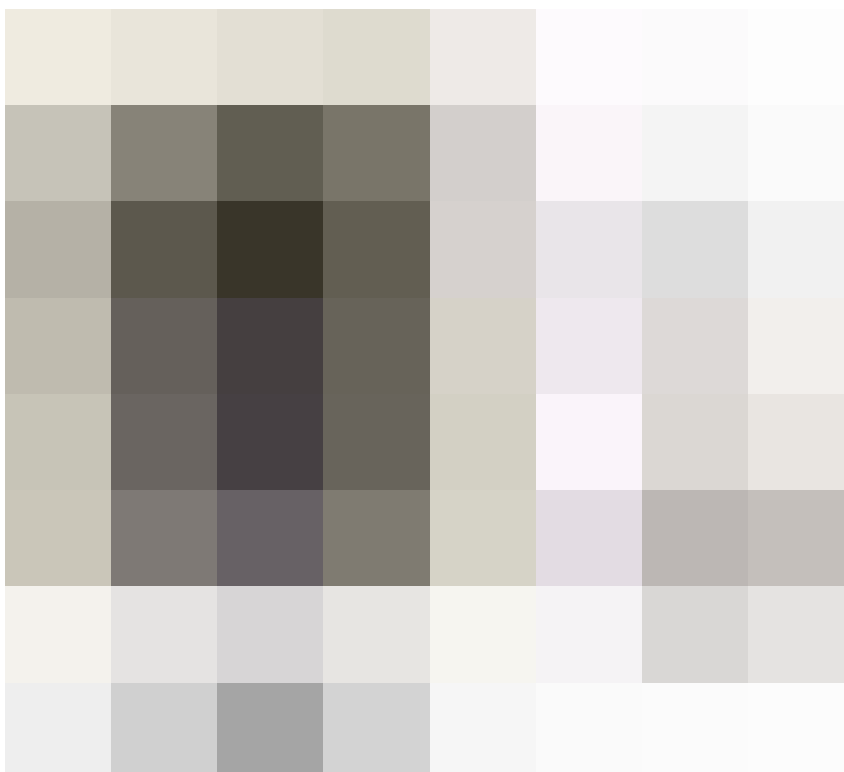
508

I controsoffitti sono realizzati con il sistema costruttivo del Graticcio Stauss, una stuoia flessibile costituito da una maglia ortogonale di 20 mm per lato realizzata con filo di ferro (diametro 1 mm) che all'incrocio presenta croci poliedriche in argilla, cotta ad alta temperatura con un procedimento speciale. La stuoia è facilmente adattabile a qualsiasi superficie geometrica piana o curva e fornisce un ottimo supporto per la successiva fase di intonacatura. La suddetta forma iconica iperbolica della facciata del Palazzo delle Poste e dei Telegrafi rappresenta una delle parti più interessanti del design dell'involucro lapideo, una delle prime sperimentazioni del sistema dei rivestimenti litici a ridotto spessore. I materiali di rivestimento sono: diorite nera del Baveno (rivestimento in lastre di spessore 5 cm) per la parte inferiore della facciata e per i pilastri centrali; marmo Vallestrona (rivestimento in lastre di 3 cm di spessore) per la restante parte della facciata. «La facciata non è intesa come superficie di delimitazione tra architettura esterna ed interna: la prima è la naturale prosecuzione della seconda»³⁰⁰. Gli infissi sono realizzati in acciaio inox (prodotto dalla Ditta Bombelli di

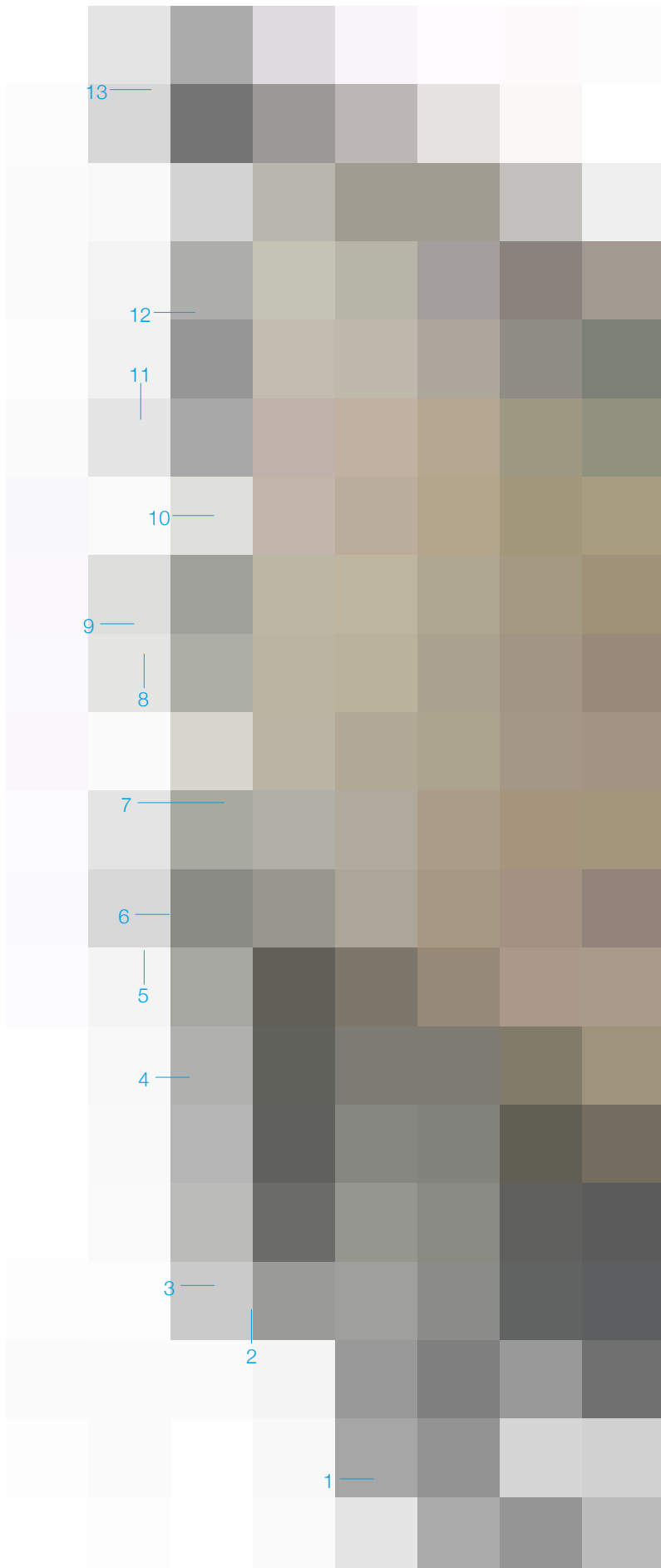
Milano e posato dalla Ditta Cassinelli & Guercini di Roma) la cui esecuzione è «di eccezionale preziosità sia nei cancelli saliscendi che caratterizzano la facciata che nelle grandi pareti vetrate, composta da 38 grandi lastre infrangibili larghe 4,50 m, alte 75 cm e spesse 1 cm, incorniciate da una struttura metallica; i montanti verticali sono invisibili perché incastonati nel marmo»³⁰¹ (fig.509).

L'interno è impreziosito da marmi come quello detto "Rosso Monte Amiata, marmo Vitulano, pietra Bellona, pietra di Trani e Verde del Brennero. I materiali lapidei, lavorati da artigiani locali, si accostano a materiali artificiali ceramici e vetrosi, provenienti dal sapiente ingegno sperimentale italiano e sinonimo di progresso costruttivo e industrializzazione dei processi produttivi. Alcuni di questi sono, come già detto precedentemente, il "Desagnat" e il "Fontanit" (entrambi prodotti dalla Società Anonima Luigi Fontana di Milano) che vengono applicati sotto forma di tessere di mosaico per rivestire grandi superfici³⁰². Il "Desagnat", in particolare, è «costituito da tessere di mosaico di vetro colorato attraversate nelle due direzioni ortogonali da inca-

509. Dettaglio della facciata trasparente d'ingresso del Palazzo delle Poste di Napoli.



vi formanti tante piccole tessere di mosaico unite ad un supporto di stuoia di tessuto altamente resistente»³⁰³ e utilizzate per impreziosire la pensilina d'ingresso. Esistono anche diverse applicazioni di sistema del vetrocemento, un sistema costruttivo molto diffuso nell'architettura razionalista italiana attraverso la commercializzazione di numerosi diffusori commercializzati dalla "Società Anonima di Saint Gobain, Chauny e Cirey". Sono numerose le tipologie di diffusori (Nevada, Novalux, Prismalith, Duralux, Clarilux, Cupolux, Discolith, Isocalor, Luxfer, Opalina, Planilux, Quadralith ecc.) utilizzate anche nel Palazzo delle Poste e Telegrafi, soprattutto nel vestibolo d'ingresso e nella parete cilindrica in vetrocemento della sala riunioni. Infine, per quanto riguarda gli architravi e gli stipiti delle finestre sono rifiniti con stucco di calcio bianco, mentre la copertura a sbalzo (con struttura in cemento armato) ha la finitura esterna con intonaco detto "Duralbo" prodotto dalla "Società Istriana dei Cementi" che rappresenta il solo cemento portland artificiale prodotto in Italia e ottenuto dal processo di "clinkerizzazione" di calolino, marne in speciali forni rotanti. L'impianto di riscaldamento è a radiatori, con parziale applicazione di convettori e impianto di riscaldamento ad aria. L'edificio è dotato di sistemi di posta pneumatica, nastri trasportatori meccanici per l'affissione (il pacco lettere arriva direttamente sui tavoli di smistamento), un sistema di nastri trasportatori e pinze nella sala delle apparecchiature telegrafiche, orologi elettrici per il comando centrale negli uffici principali. Questo insieme di sistemi, curato in ogni dettaglio, anche dal punto di vista estetico, costituisce l'idea più completa e nuova implementata nella crescente architettura Moderna (fig.510). Importante è anche l'elegante design degli interni, studiato dai progettisti nei minimi dettagli con un'attenta scelta di materiali sia tradizionali che innovativi (es. Albes, Buxus, etc.) che contribuiscono indubbiamente a conferire nobiltà ai





511

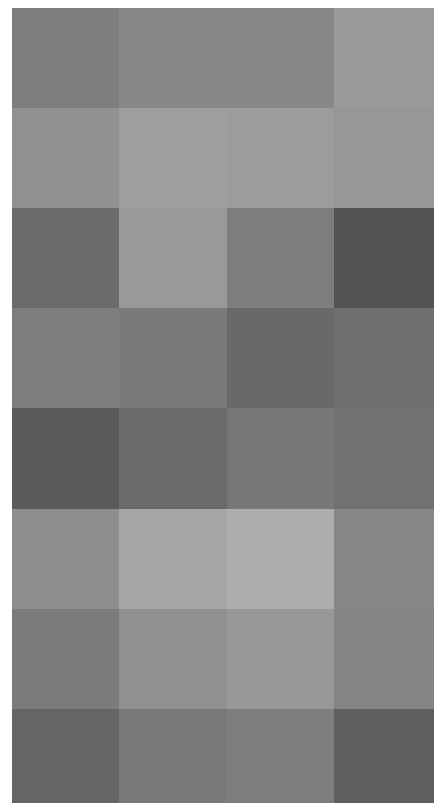
510. Nella pagina precedente: dettaglio tecnologico del Palazzo delle Poste di Napoli. Legenda: 1 fondazione a soletta piena di 50cm di spessore e travi in calcestruzzo armato (100x200cm), 2 pilastri della tipologia Mannesmann in calcestruzzo armato realizzati con la tecnica del *béton frêtté*, 3 basamento in lastre di diorite nera di Anzola (spessore 5cm), 4 vetrate infrangibili su telaio in acciaio inossidabile della Ditta Bombelli di Milano, 5 stucco bianco di calce, 6 impianto di riscaldamento ad aria ed a vapore, 7 lastre intercalate da masselli di marmo chiaro di Vallestrona lucido (spessore 3cm) ancorate meccanicamente alla muratura in mattoni pieni, 8 costroroffitto in stuoie di Graticcio Stauss, 9 soletta piena in calcestruzzo armato (spessore 30cm), 10 infissi in ferro muniti di tenda avvolgibile, 11 pavimentazione in linoleum unito color turchino, nero, rosso pompeiano, nocciola, azzurro, grigio, 12 mosaici vetrosi della tipologia *Deseignat*, 13 pensilina in calcestruzzo armato e finitura esterna con intonaco della tipologia *Duralbo*.

511. Elementi di arredo e di design del Palazzo delle Poste di Napoli, in Vaccaro, G., *Edificio per le Poste e Telegrafi di Napoli*, in *Architettura. Rivista del Sindacato Nazionale Fascista Architetti*, n.8, fascicolo VIII, Milano, 1936, pagg. 353-391

512. *Ibidem*.

semplici volumi architettonici, trasformati loro in una "espressione monumentale", dove non sono stati adottati elementi superflui e dimensioni eccessive per rendere retorica questa espressione, che invece era affidata solo alla composizione unitaria degli elementi e, quindi, delle forme, e al valore espressivo delle relazioni (figg.511-512). Come per l'edificio di Vaccaro, molte altre architetture nazionali celano sistemi costruttivi molto innovativi dietro involucri e rivestimenti in pietra naturale ed artificiale. Il Palazzo delle Poste di Napoli, con la sua struttura intelaiata in calcestruzzo armato (con le innovative colonne "Mannesmann"), l'utilizzo sperimentale del sistema di ancoraggio del rivestimento dei masselli di marmo e tutti i nuovi materiali made in Italy, rendono questo edificio un emblema dell'evoluzione costruttiva del Moderno in Italia. Tutti questi elementi hanno contribuito a trasformare il trend culturale italiano e la sua tradizionale pratica edilizia. Il Palazzo delle Poste e dei Telegrafi - come detto sopra - monumento del Razionalismo italiano,

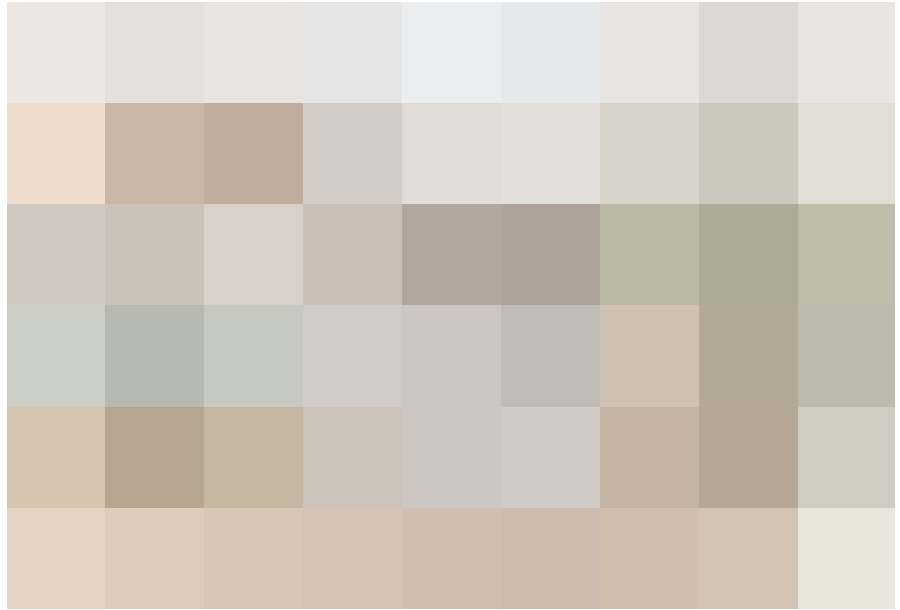
rappresenta uno «dei primi episodi significativi nell'ambito di un problema edilizio che avrebbe assunto notevole importanza nella storia dell'edilizia moderna in Italia»³⁰⁴.



512

Come già detto, lo sviluppo della tecnica del calcestruzzo armato determinò nell'architettura italiana il passaggio dalla costruzione stereotomica al rivestimento litico. Questa pratica di romana memoria, quando le possenti concrezioni di caementicium erano rivestite in spessi masselli di marmo vide a partire dalla seconda metà dell'Ottocento una razionalizzazione del sistema lapideo ed un miglioramento dei sistemi di ancoraggio. Le diverse tecniche murarie, variabili in relazione al contesto geografico confluivano tutte in una costruzione in muratura soprattutto di mattoni, la cui funzione portante poteva essere migliorata o demandata al telaio in calcestruzzo armato. Così all'indomani della struttura portante in calcestruzzo armato - anche nelle architetture considerate 'minori' - a completamento dell'edificio veniva ammorsato mediante ancoraggi metallici un rivestimento litico realizzato con masselli di marmi locali o pietre artificiali (figg.513-515).

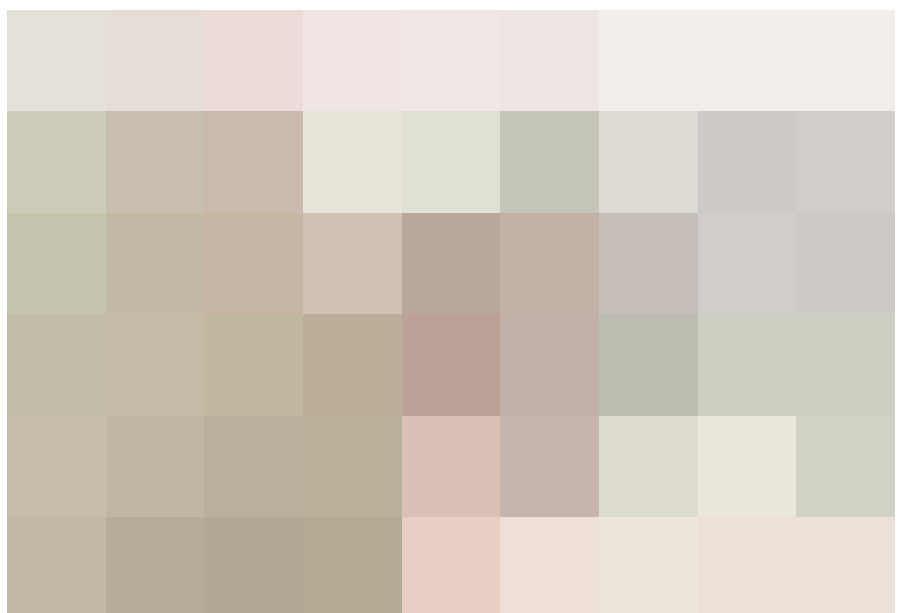
Il regime autarchico imposto all'economia italiana a partire dal 1935 determinò la fioritura dei materiali lapidei e l'adozione di soluzioni tecniche tradizionali corroborate da nuovi materiali dell'industria (isolanti termici ed acustici, pietre artificiali, intonaci e stucchi, vernici, etc.). L'introduzione del telaio in calcestruzzo armato consentì un primo scardinamento della logica tradizionale delle modanature e dell'impiego di masselli di marmo ad alto spessore ammorsati alla muratura portante come rivestimento. Quest'ultimo assunse un ruolo predominante e autonomo nello studio figurativo rispetto all'involucro moderno sancendo il declino dell'ormai obsoleta manualistica tardo ottocentesca (Carlo Formenti, *La Pratica del Fabbricare*; Daniele Donghi, *Manuale dell'Architetto*, etc.) a favore di riviste moderne in cui iniziarono ad apparire numerose rubriche tecniche sui nuovi materiali e sistemi costruttivi Made in Italy. Con i precetti del Futurismo e della metafisica le moderne facciate subirono una semplificazione formale del linguaggio, una astrazione e ricomposizione sintattica.



513



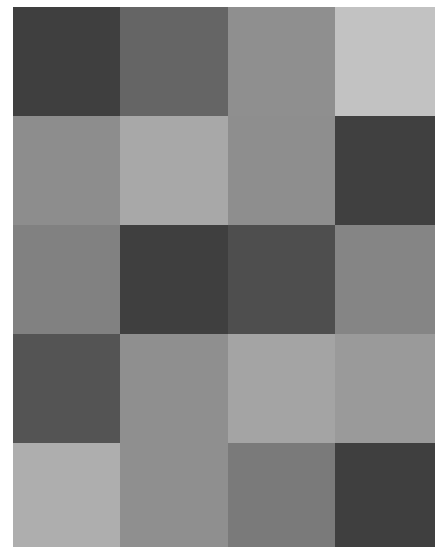
514



515



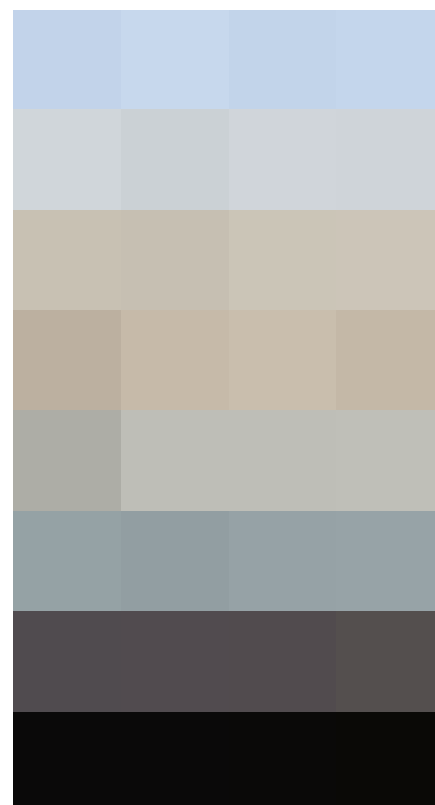
516



517

L'edificio è caratterizzato da un telaio in calcestruzzo armato che ha reso possibile il sofisticato dialogo tra le pareti murarie in travertino di Tivoli e porfido di Predazzo e la leggerezza dell'involucro trasparente in vetri infrangibili e vetromattoni (fig.517).

Il carattere del rivestimento risiede, però, nella facciata posteriore, costituita da una parete traforata da numerose piccole aperture quadrate che dimostra la capacità e caparbietà dell'artigianato italiano nella tecnica tradizionale del taglio di elementi litici (figg.518-520).



518

513. Nella pagina precedente: la posa in opera delle pietre decorative, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933, tav. XLI.

514. Nella pagina precedente: la posa in opera delle pietre decorative, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933, tav. XLII.

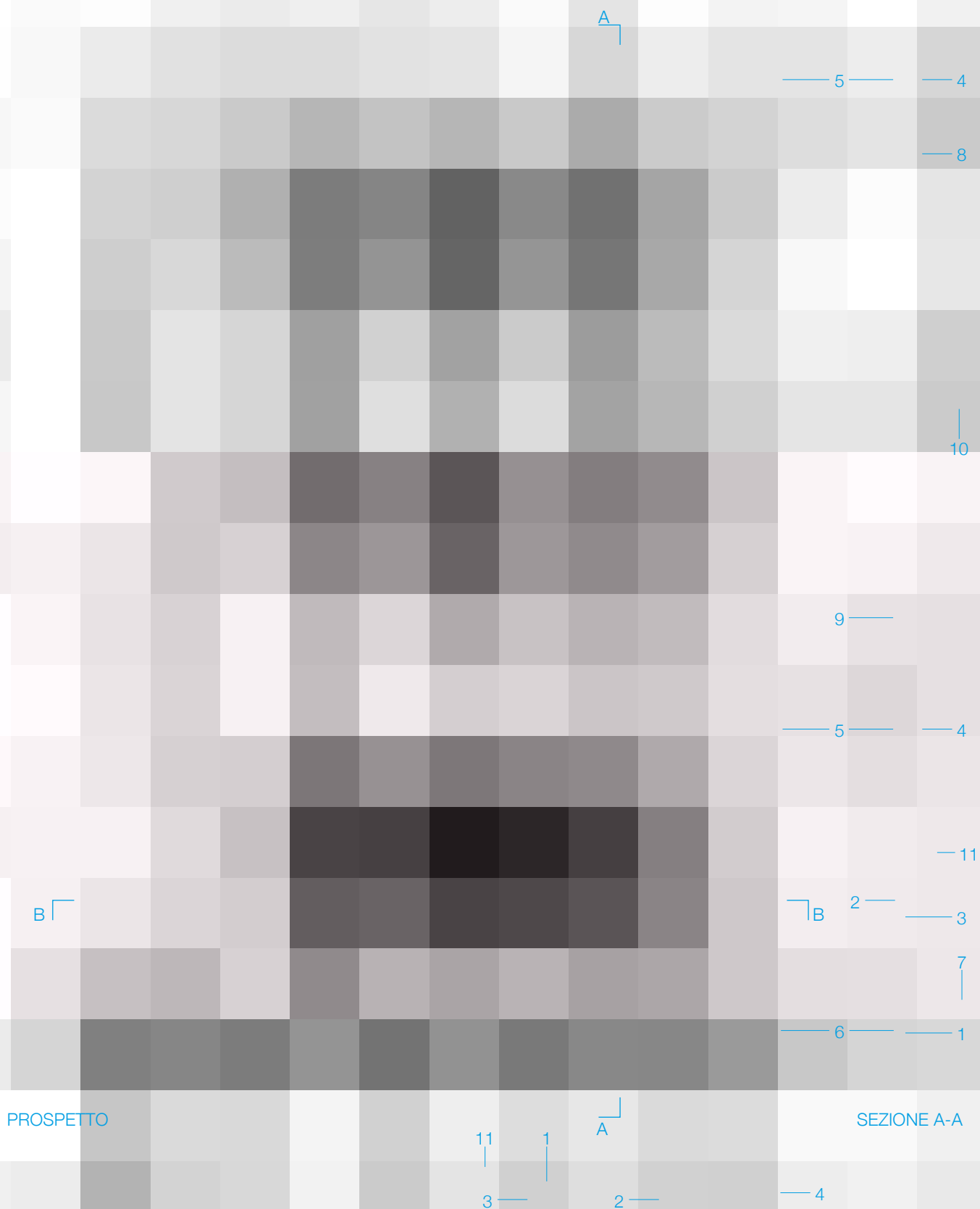
515. Nella pagina precedente: le strutture dei cornicioni di gronda ed i loro particolari, in Formenti C., Cortelletti R., *La pratica del Fabbricare*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933, tav.LV.

516. Gio Ponti, Emilio Lancia, facciata della Banca Unione, Milano, 1931.

517. Adalberto Libera, dettaglio della facciata del Palazzo delle Poste in via Marmorata, Roma, 1933-35.

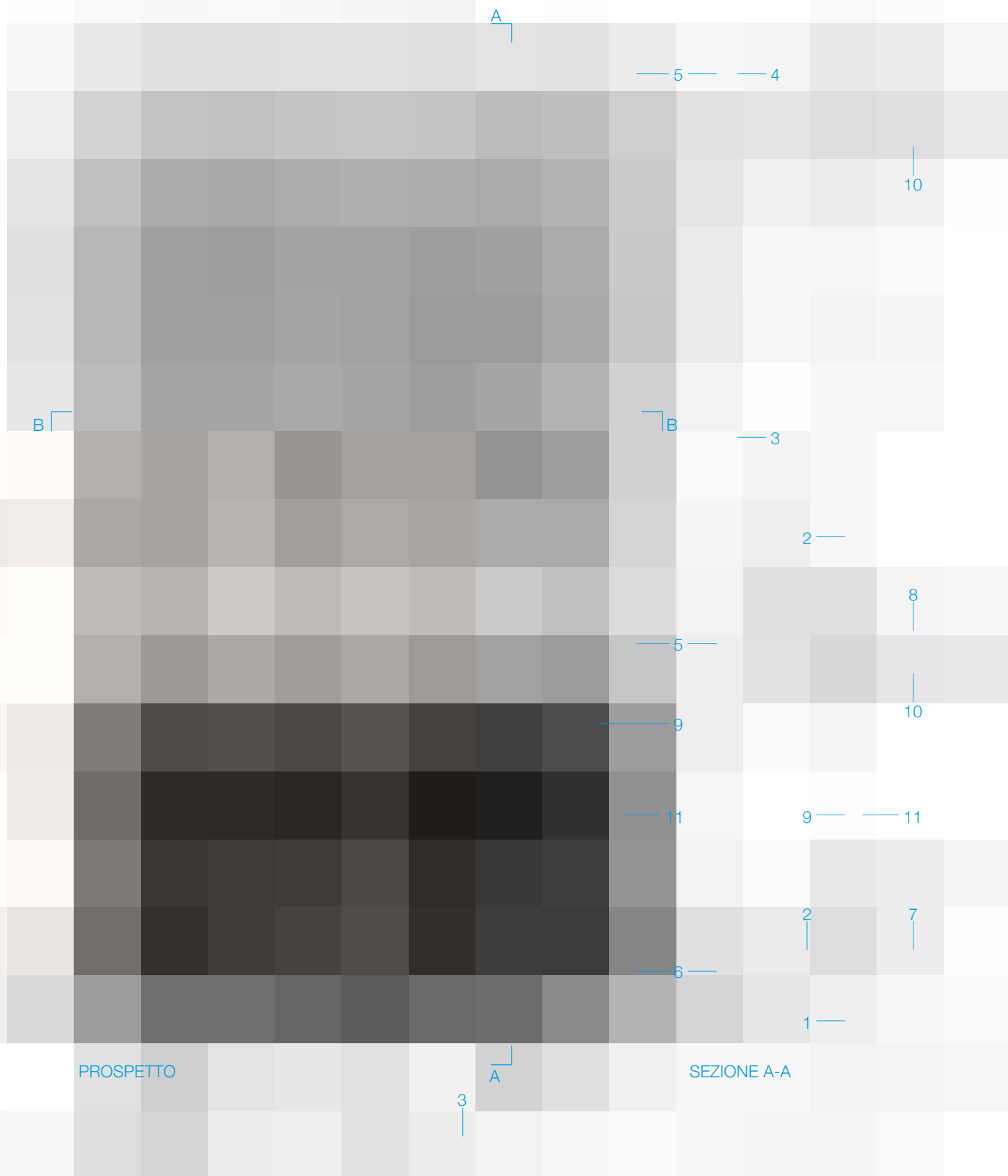
518. *Ibidem*.

Così anche architetti preminenti del futuro Modernismo italiano ed eccelsi promotori di una nuova estetica in architettura come Gio Ponti (Milano, 1891 – Milano, 1979) ed Emilio Lancia (Milano, 1890 – Besozzo, 1973), si ritrovano da giovani a realizzare opere secondo stilemi tradizionali. Un esempio è la sede della Banca Unione a Milano, realizzata nel 1930 in cui le facciate in stile neoclassico sono realizzate con lastre di pietra ancorate con il tradizionale sistema a chiavelle metalliche inglobate nella spessa muratura di tamponamento (fig.516). Con il Fascismo, la cultura della pietra, della litoceramica e dell'intonaco subisce un processo catalizzatore nel loro impiego, soprattutto per la realizzazione delle grandi opere statali. Le facciate sono portate alla stregua dell'astrazione, riducendo al minimo i giunti tra gli elementi e celando il sistema di ancoraggio sottostante. Tra i numerosi esempi, oltre ai già citati Palazzi delle Poste di Napoli di Ridolfi e Vaccaro, è l'omonimo Palazzo delle Poste su via Marmorata a Roma progettato da Adalberto Libera, pioniere di soluzioni inedite per quanto riguarda le scelte tecnologiche del rivestimento.



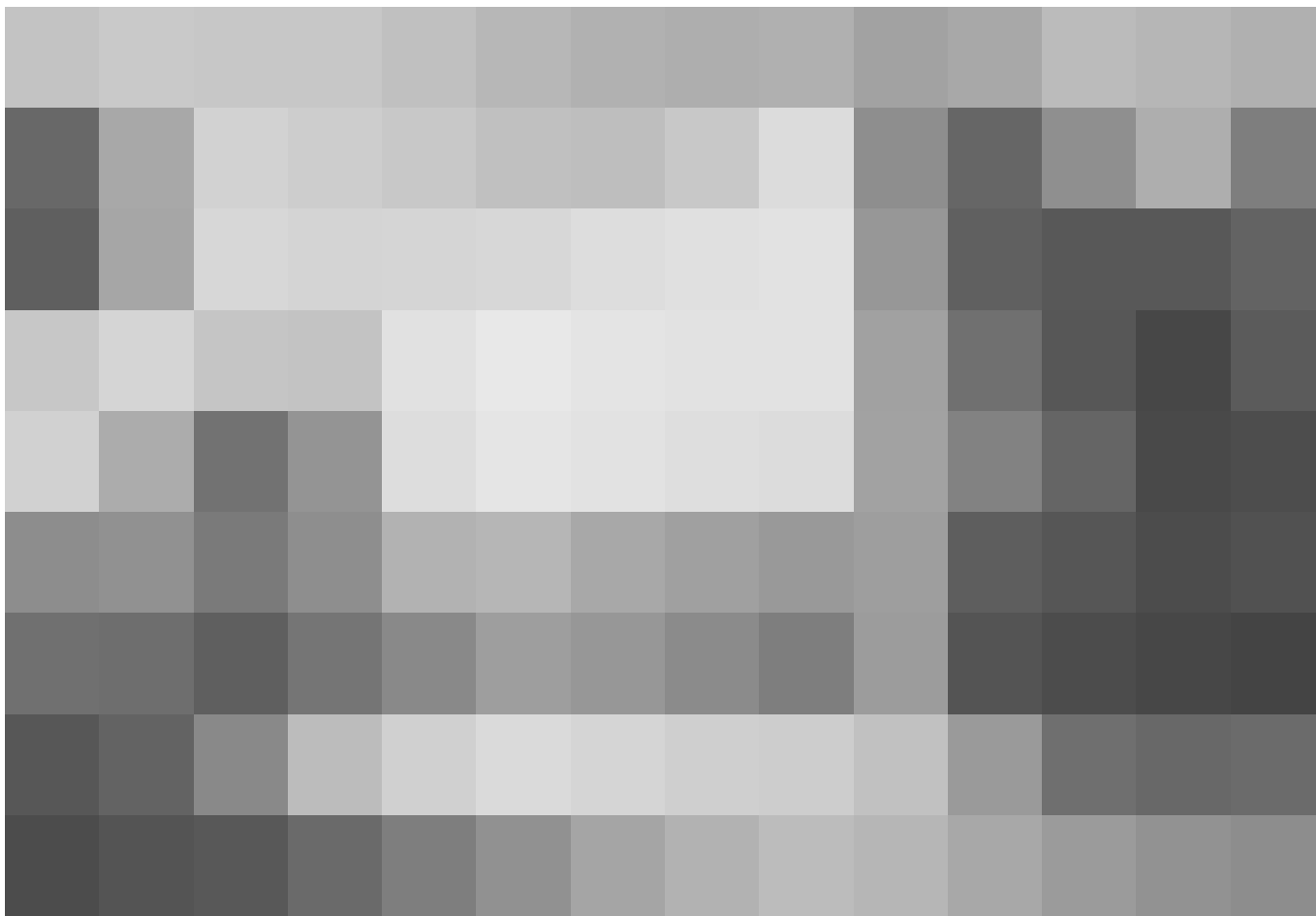
519. Dettaglio della facciata posteriore del Palazzo delle Poste in via Marmorata, Roma, 1933-35. Legenda: 1 struttura intelaiata in c.a., 2 fascia di massello di travertino, 3 rivestimento in lastre di porfido violaceo di Predazzo, 4 muratura in tufo con ricorsi di mattoni "alla romana", 5 rivestimento in lastre di travertino di Ti-

voli, 6 rivestimento e pavimento in lastre di porfido del Trentino, 7 pavimento di piastrelle di grés ceramico, 8 cassetto dell'avvolgibile di lamiera di acciaio, 9 soglia di travertino, 10 Controsoffitto in tavelline della tipologia Perret, 11 Infisso di acciaio con profilati normali e "ferrofinestra" e vetri opacizzati.



520. Dettaglio della facciata posteriore del Palazzo delle Poste in via Marmorata, Roma, 1933-35. Legenda: 1 struttura intelaiata in c.a., 2 pilastro verniciato in Durolac, 3 struttura in c.a. del graticcio di facciata, 4 muratura in tufo con ricorsi di mattoni "alla romana", 5 rivestimento in lastre di travertino di Tivoli, 6 rivesti-

mento e pavimento in lastre di porfido del Trentino, 7 pavimento di piastrelle di grés ceramico, 8 pavimento di doghe di rovere di Slavonia, 9 rivestimento del pilastro in lamiera d'acciaio, 10 Controsoffitto in tavelline della tipologia Perret, 11 Infilso di acciaio con profilati normali e "ferrofinestra" e vetri opacizzati.

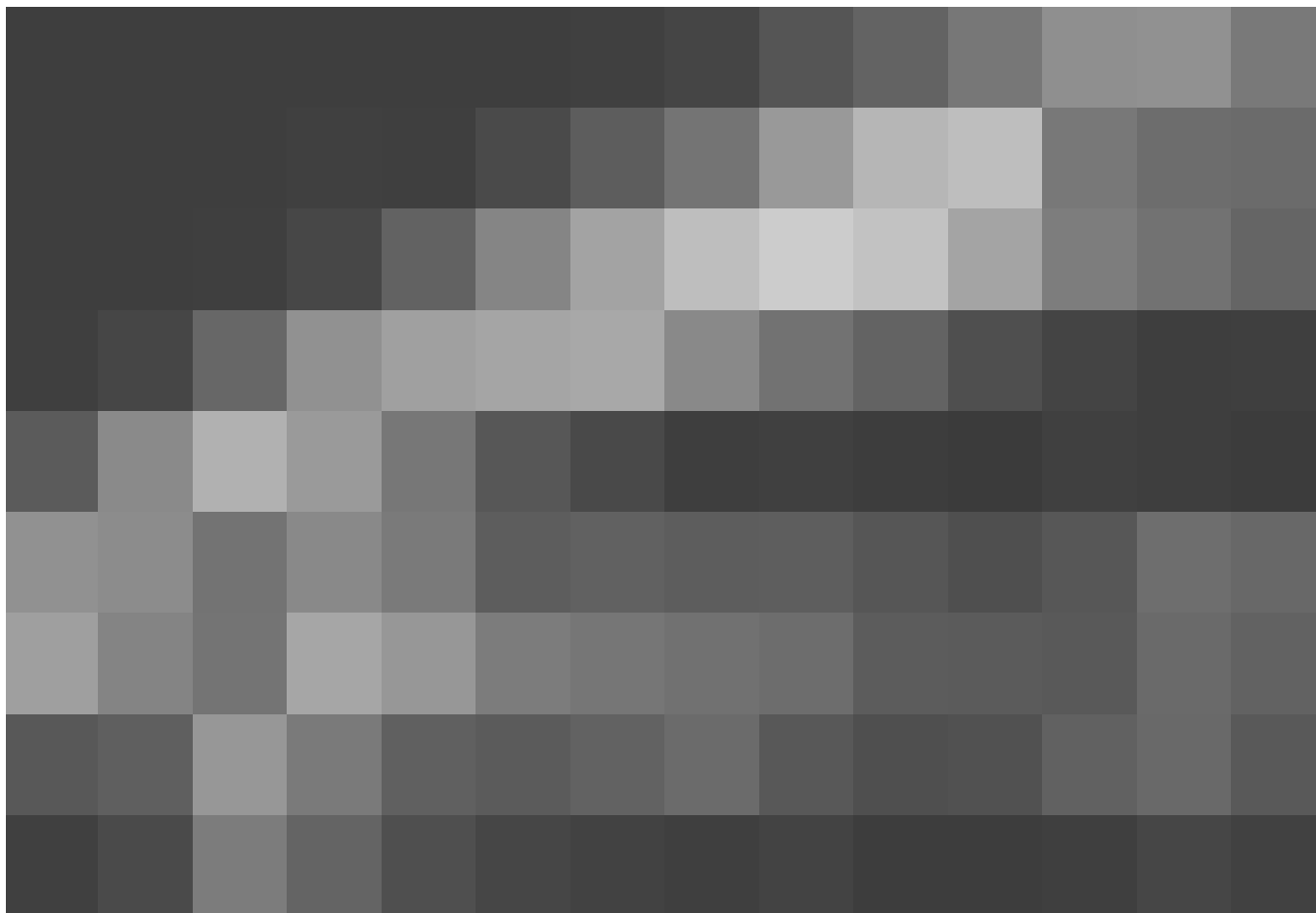


521

L'involucro della Casa delle Armi, progettata da Luigi Moretti (Roma, 1906 – 1973) tra il 1934 e il 1935 risulta ancora più spinta la ricerca di una moderna classicità. L'intento di Moretti era quello di sviluppare uno specifico disegno di rivestimento completamente in masselli in marmo statuario venato di Carrara tale per cui avrebbe dato l'impressione che l'edificio fosse stato ottenuto da un unico blocco (figg.521-523). Ma i particolari di maggiore interesse che conferiscono astrattamente all'edificio una immagine di monolite fatto «*di una materia idealmente compatta e priva di connesure*»³⁰⁵, sono i masselli curvi appositamente disegnati per tutti i nodi atipici, concavi e convessi, in modo da rendere più morbido il passaggio tra una superficie e l'altra. Nella poetica di Moretti, alquanto differente da quella espressa da Ridolfi e Libera, il rivestimento non è parte della struttura muraria, ma è un vestito che impedisce volutamente la percezione della struttura in calcestruzzo armato.



522



523

521. Luigi Moretti, Casa delle Armi, Roma, 1933, © Giampiero Germino.

522. *Ibidem.*

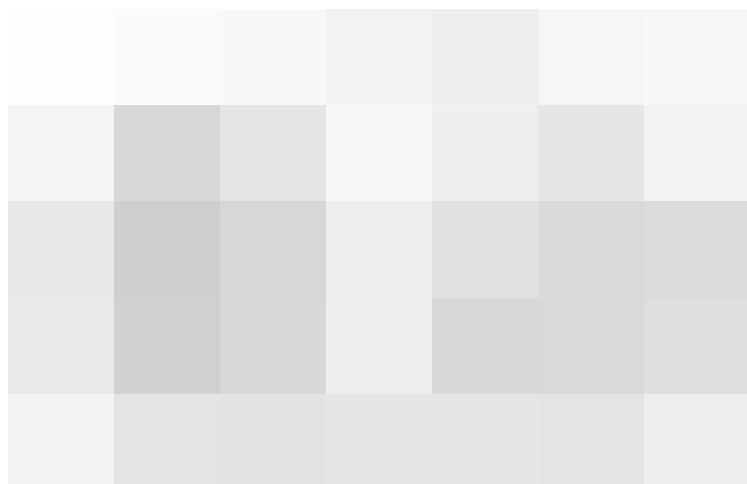
523. *Ibidem.*

524. Schematizzazione del distacco degli elementi lapidei di rivestimento, in rivista *Colonna. Architettura e Scultura*, n.3, 1943.

Tutti gli edifici esaminati sono caratterizzati da ardite soluzioni tecniche e sperimentali frutto della grande abilità degli artigiani che del processo industriale. Queste opere, così come molte altre, manifestarono molto presto una serie di problemi legati al distacco delle lastre dal supporto a telaio che alimentarono una vivace diatriba tra i tecnici, tale da mettere in dubbio non solo la validità del rivestimento lapideo sot-

tile ma in generale l'impiego della pietra nella costruzione moderna. La discussione, quindi, si spostò sugli aspetti costruttivi dei rivestimenti litici a tal punto che nel 1936 la Commissione del Sindacato degli Ingegneri della Lombardia stilò una serie di raccomandazioni per la posa dei rivestimenti lapidei. Veniva consigliato di mantenere lo spessore dell'elemento lapideo di almeno 3cm e di anteporre almeno quattro chivelle in metallo inossidabile per lastra interponendo, inoltre, un letto di malta di calce o cemento (evitando il gesso) per garantire una maggiore aderenza.

Non essendo sufficiente a risolvere il problema, nel 1938 l'ingegnere Antonio Consiglio enunciava ulteriori postulati al problema: il primo era il processo di degrado troppo accelerato degli ancoraggi ferrosi rispetto a quelli inossidabili; in seconda fase il problema del distacco imputabile ai diversi coefficienti di dilatazione termica tra cemento, malta ed elemento lapideo (figg.524-525).



524





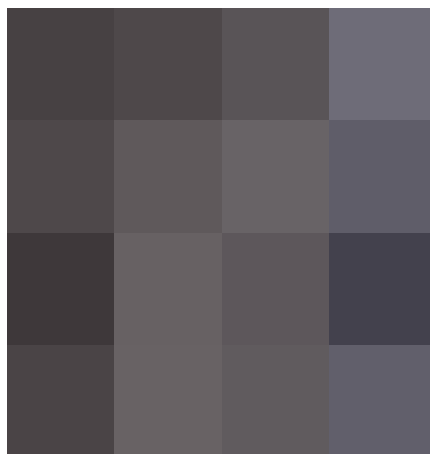
526

525. Schematizzazione del distacco degli elementi lapidei di rivestimento, in rivista *Colonna. Architettura e Scultura*, n.3, 1943.

526. Gio Ponti, Palazzi Montecatini, Milano, 1936-37, © Montecatini - Edison.

527. Dettaglio dell'angolo tra le due facciate del rivestimento in lastre di marmo cipollino apuano e sigillature in mastice elastico igas grigio verde.

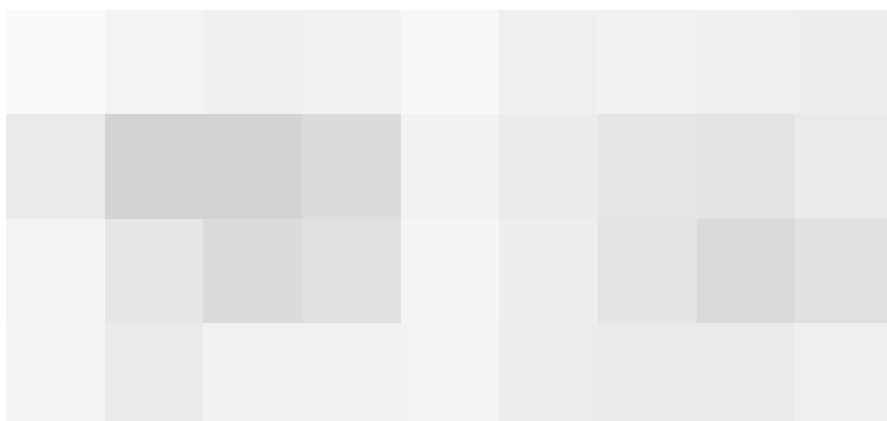
528. Dettaglio costruttivo della sezione del giunto verticale su un pilastro (a sinistra) e particolare assonometrico del sistema di ancoraggio delle lastre in marmo.



527

L'emanazione del R.D. 2232 riguardante le Norme per l'accettazione delle pietre naturali da costruzione, fissò successivamente altri importanti criteri per la determinazione delle proprietà fisiche e meccaniche richieste agli elementi lapidei³⁰⁶.

Da queste osservazioni di carattere tecnico, tra il 1936 ed il 1937 venne realizzato il primo esempio di rivestimento sottile in pietra, ovvero quello progettato dall'ingegnere Pier Giulio Bosisio e l'architetto Gio Ponti (1891-1979) per la nuova sede Montecatini a Milano. Infatti, le lastre della facciata in Cipollino Apuano sono spesse 4cm, presentano gli spigoli smussati e sono distaccate tra loro in modo da assecondare eventuali micro cinematismi della struttura e sigillati con il mastice elastico *igas* prodotto dalla Sika. Le lastre, inoltre, sono solidarizzate alla struttura sottostante con 8-10 zanche in ottone ricotto fissate a loro volta ad un'asta inglobata nei pilastri (figg.526-528).



528



529

Dal Postmodernismo alla facciata mediatica contemporanea

Gli anni compresi nella prima metà del Novecento sono stati anni chiave per l'architettura e per il sistema involucro, testimoni di una profonda modificazione dei sistemi costruttivi e tecniche e prodotti prima inesistenti. Se da un lato il recupero della tradizione muraria ha portato alla messa a punto di nuovi prodotti standardizzati dall'altro ha spinto i progettisti a sperimentare nuovi sistemi costruttivi che ripensino il modo di impiegare non solo la pietra, anche il laterizio, il cemento, il legno. Negli anni cinquanta e sessanta lo Stile Internazionale si diffonde ovunque diventando espressione dell'architettura per antonomasia. Architettura e funzionalismo, costruzione e forma diventano termini praticamente sinonimo, eccetto alcuni architetti prediletti fuori da una concezione stereotipata dell'architettura.

L'architetto italiano Carlo Scarpa (Venezia, 1906 – Sendai, 1978) è un individualista e le sue opere si collocano al di fuori di ogni linguaggio artistico, ignorando deliberatamente il sobrio funzionalismo a favore di un rinvigorito espressionismo ric-

co di fantasia e contenuti simbolici. Gli involucri delle sue più celebri opere presentano il calcestruzzo tra i materiali più frequentemente utilizzati. Una delle sue opere più intense è il cimitero della famiglia Brion a San Vito d'Altivole (Treviso, 1968) alla cui eterea struttura a cinque elementi (portico, cappella, chiostro, monumento funebre, padiglione per la meditazione situato in un bacino d'acqua) l'involucro presenta superfici in calcestruzzo con le tracce a vista lasciate dalle casseforme (fig.529).

Nelle opere del suo allievo Mario Botta, sono frequenti i richiami a elementi formali tipici di questa architettura in calcestruzzo. Tra il 1972 e il 1977 realizza la scuola di Morbio inferiore (fig.530) e numerose case unifamiliari realizzate tra il 1966 ed il 1984.

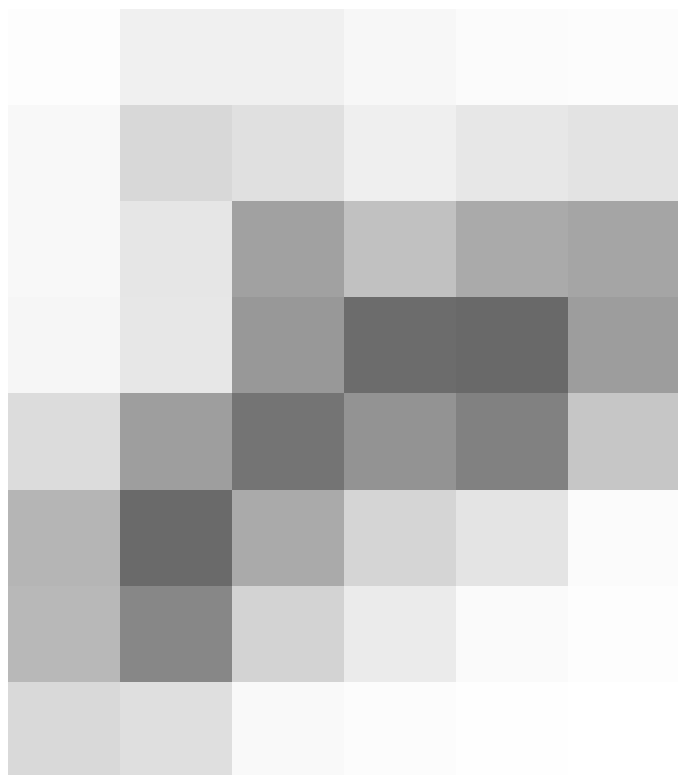
Luigi Snozzi scriverà a proposito: «*il calcestruzzo a vista assume una funzione dialettica nei confronti dell'architettura già esistente ed allo stretto tempo un materiale che unisce e supera i muri di cinta dell'impianto. Il materiale nuovo consente il dialogo con le vecchie pareti e con gli intonachi slavati senza tuttavia interpretare forme e materiali originali in maniera nostalgica*»³⁰⁷.

529. Carlo Scarpa, Tomba Brion, San Vito d'Altivole (Treviso), 1968, © Alessio Guarino.

530. Mario Botta, Scuola di Morbio inferiore (Svizzera), 1972.

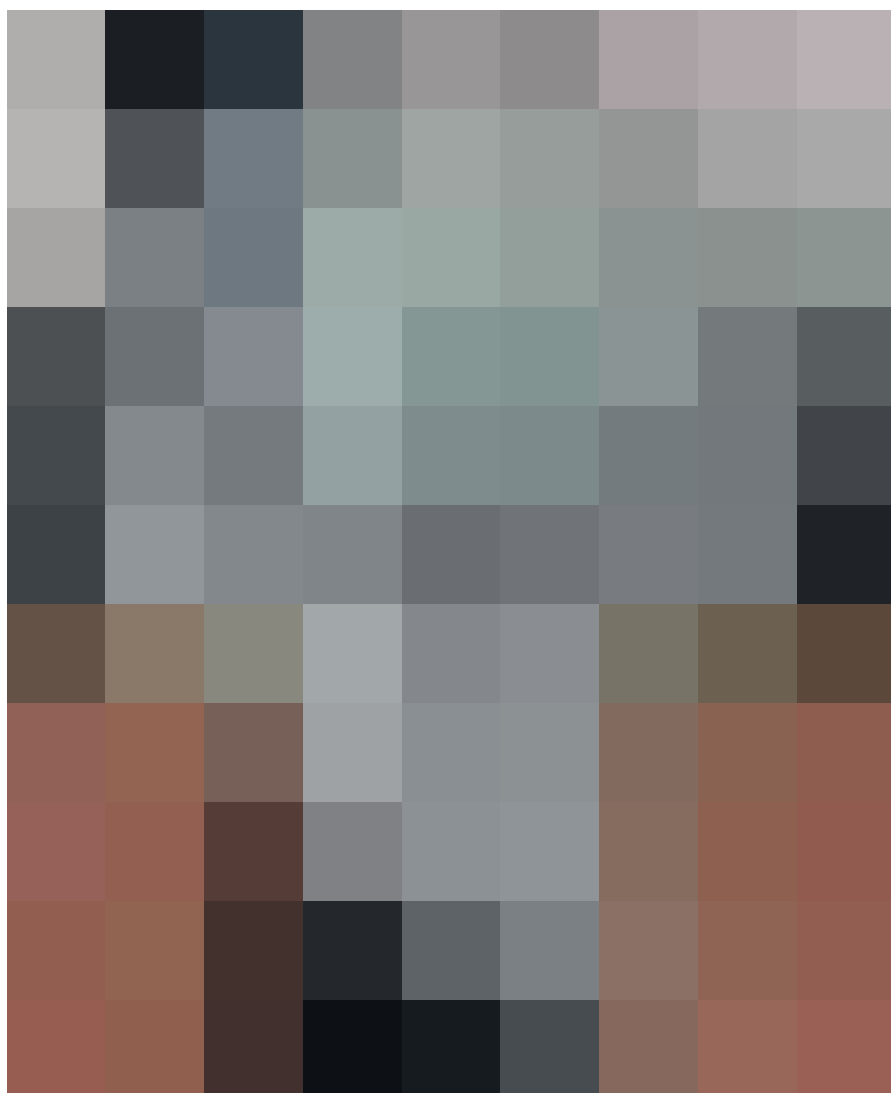
531. Mario Botta, San Francisco Museum of Modern Art, 1990-1994

532. Renzo Piano, dettaglio della facciata ventilata dell' IRCAM, Parigi, 1987-1990.

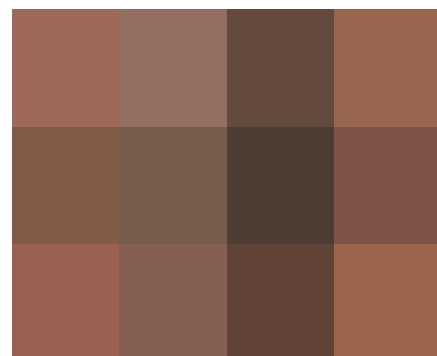
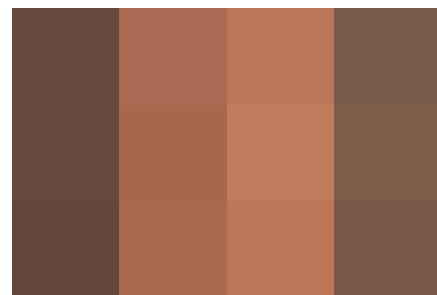


L'architetto ticinese sarà tra le prime figure a sperimentare sistemi costruttivi che ripensino il modo di impiegare i materiali della tradizione; ad esempio tra il 1990 e il 1994 realizza le chiusure perimetrali faccia a vista del San Francisco Museum of Modern Art, con pannelli prefabbricati in calcestruzzo finiti superficialmente da una cortina di elementi di laterizio (fig.531). Questo aprirà una nuova stagione nel panorama italiano e internazionale sulla sperimentazione costruttiva che ricorra all'impiego di strutture prefabbricate in calcestruzzo con pannelli di tamponamento finiti sulla faccia esterna con elementi di laterizio. Nota è l'esperienza dell'architetto genovese Renzo Piano (Genova, 1938) che partendo dall'edificio IRCAM di Parigi (1987-1990) ha contribuito in modo rilevante alla messa a punto di facciate ventilate con schermo di laterizio (fig.532). L'applicazione di questo nuovo sistema, ormai correntemente impiegato nell'architettura e nell'edilizia convenzionale, sviluppa un nuovo approccio alla progettazione ed esecuzione dell'involucro, in cui la cooperazione tra progettista e impresa esecutrice diviene assoluta per la definizione architettonica degli elementi nodali e più sensibili nella progettazione dell'involucro (terminazioni, angoli, aperture, etc.).

530



531



532



533

Le facciate o pareti ventilate sono dei sistemi di involucro sottile assemblato 'a secco', composti da un telaio metallico solidarizzato allo strato resistente della chiusura verticale. L'intercapedine che si genera tra la chiusura verticale e lo schermo di protezione presenta alcuni strati complementari con lo scopo di migliorare la prestazionale globale dell'edificio, come lo strato di isolamento termico (la cui ventilazione naturale lo protegge dall'azione igroscopica attraverso il fenomeno del lavaggio termico), l'intercapedine di ventilazione naturale e gli impianti³⁰⁸ (fig.533).

Il panorama architettonico italiano ed internazionale mostra numerosi esempi realizzati con il sistema della parete ventilata con schermi in materiali di derivazione naturale (pietra, legno, terracotta, fibrocemento, laminati metallici, vetro, etc.) o materiali di natura sintetica o composita rifinita in varie geometrie, dimensioni, trattamenti superficiali, etc., morfologicamente conformati per garantire l'assemblaggio meccanico 'a secco' alla struttura della facciata (fig.534). Il sistema di fissaggio (a tasselli, *clips* a molla, squadrette metalliche, profili continui, montanti e trasversi, etc) deve essere tale da assicurare

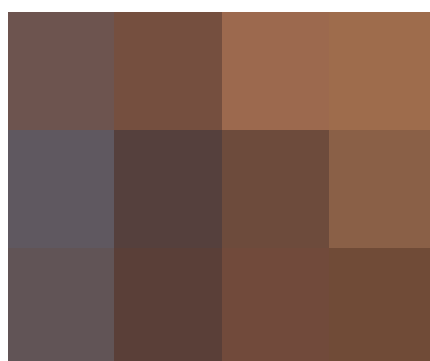
533. Realizzazione di una facciata in laminato metallico, © Alpewa.

534. Tipologie di pareti ventilate: a) in lastre litiche, b) in elementi in cotto, c) in listelli di legno, d) in elementi in fibrocemento, e) in laminati metallici, f) in pannelli sintetici (acrilico, policarbonato, pvc, etc.).

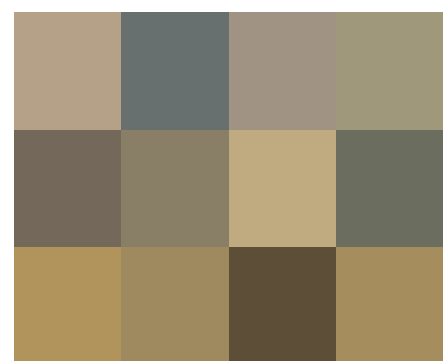
Dalla facciata ventilata al Mur-rideau



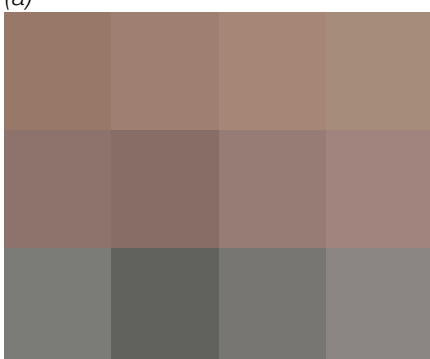
(a)



(c)



(e)



(b)

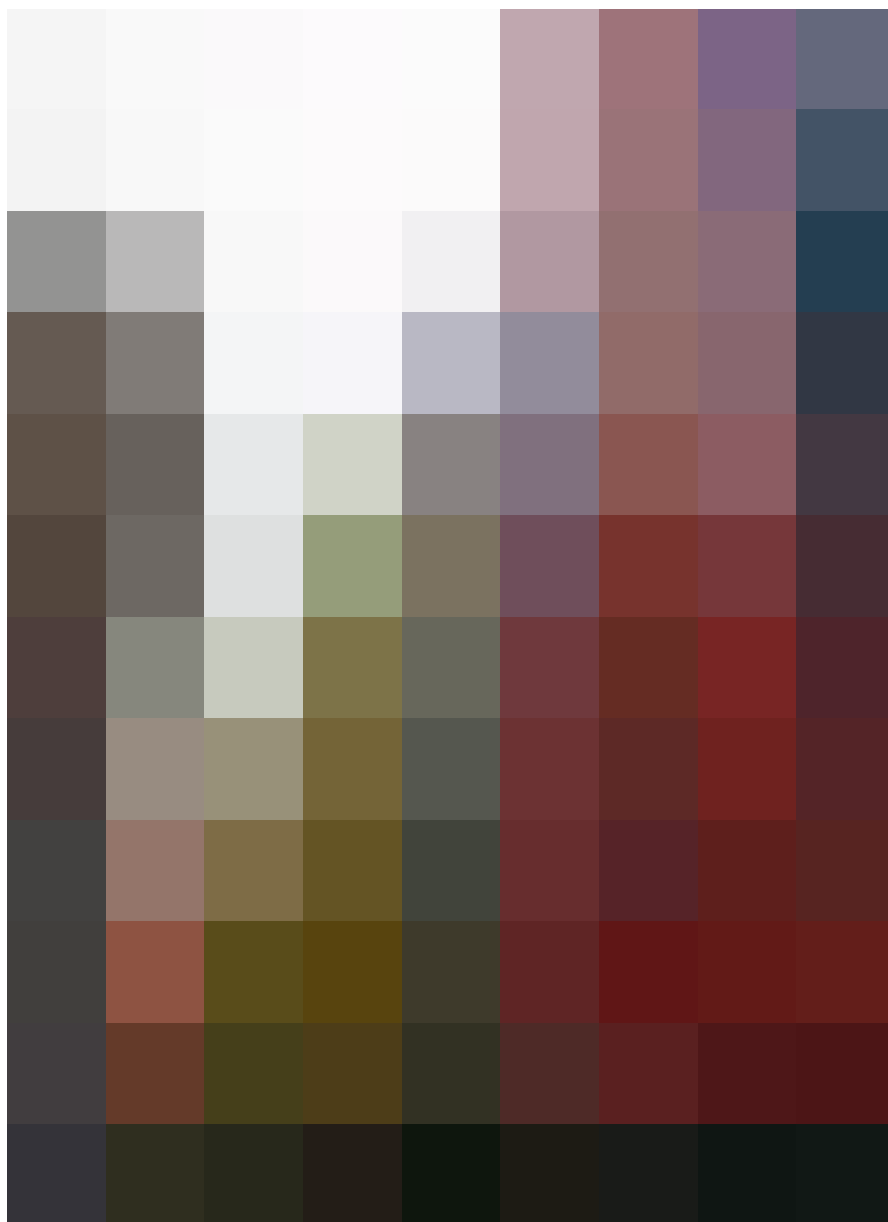


(d)

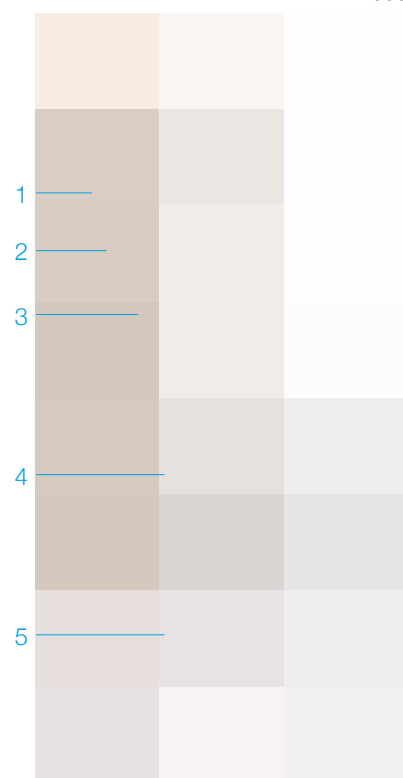


(f)

534



536



537

535. Renzo Piano Building Workshop, Central St. Giles Court, Londra, 2002-2010.

536. Dettaglio della facciata ventilata del Central St. Giles Court realizzato con elementi in ceramica smaltata estrusa.

537. Particolare tecnologico della facciata ventilata del Central St. Giles Court. Legenda: 1 elementi in ceramica smaltata estrusa, 2 staffa di fissaggio in ceramica, 3 struttura della facciata in profili di alluminio, 4 isolante termico, 5 infisso con doppio vetro

una adeguata sicurezza in uso e da evitare la trasmissione delle sollecitazioni strutturali dell'edificio sullo schermo stesso, onde evitare rotture o fessurazioni degli elementi.

Le murature di mattoni e in pietra da taglio, che per secoli erano state utilizzate per la facilità d'impiego dovuto alla modularità dell'elemento verranno utilizzate con minore frequenza, per l'esigenza di realizzare strutture di dimensioni maggiori e a costi inferiori, pura garantendo la solidità statica. Dalla modularità dei blocchi di pietra - sistema tipico dell'architettura italiana della prima metà del Novecento - si passerà allo sviluppo di sistemi strutturali che prevedono

l'impiego di materiali leggeri e resistenti, facilmente trasportabili e dalla rapidità dei processi di montaggio e smontaggio (a favore del concetto di manutenzione) (figg.535-537).

La resistenza e la stabilità dell'elemento facciata non è più affidata al peso o alla massa dei materiali, ma alla forma e alla geometria degli elementi strutturali. Le opere si basano sulla prefabbricazione leggera proveniente dall'industria, come l'invenzione del *mur-rideau* (o *facciata continua*), la parete-tenda sospesa costituita da elementi modulari assemblata e producibile industrialmente, isolata e predisposta per alloggiare gli impianti. È un sistema facciata che garantisce la

chiusura dell'involucro edilizio senza partecipare alla sua stabilità (i carichi vengono trasferiti alla fondazione principale tramite collegamenti ai piani o alle colonne dell'edificio). I pannelli sono quindi supportati, piano per piano, su uno scheletro fisso. La struttura portata delle facciate continue è costituita principalmente da telai in alluminio estruso, sebbene le prime facciate continue fossero in acciaio (come la sera messicana del Jardin des Plantes, opera di Charles Rohault de Fleury, costruita dal 1834 al 1836).

A partire dagli anni '70 la facciata continua ha assunto morfologie diverse, animate da *curtain wall*, *brise-soleil* metallici, diaframmi fotosensibili, dispositivi di connessione puntiformi, superfici continue o strutture costruite, aspetti che confluiranno nei primi esempi di architettura *high-tech*, termine che indicava edifici caratterizzati da strutture portanti leggere e fortemente denunciate e per l'impiego di materiali dalle prestazioni elevate, quali le leghe ad alta resistenza e materiali compositi. Con l'architettura *high-tech* le facciate in acciaio inossidabile, alluminio anodizzato, zinco, rame, ottone, titanio e vetro esprimono attraverso la loro espressiva lucentezza una volontà di impedirne l'invecchiamento e di conservare l'immagine nel tempo.

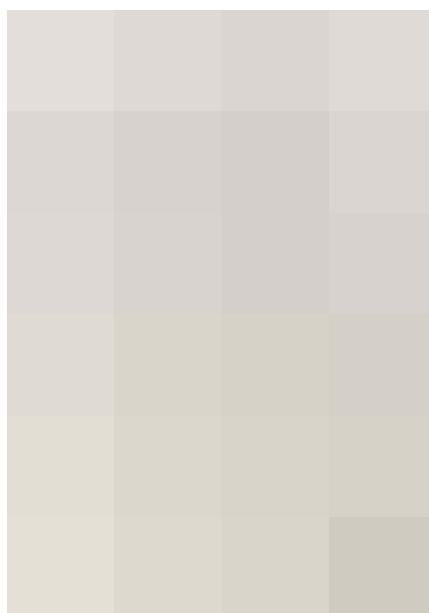
L'architettura *high-tech* si afferma in un primo momento in Inghilterra per volontà degli architetti Nicholas Grimshaw (1939), Michael Hopkins (1935) e in modo particolare con Richard Rogers (1933) e Norman Foster (1935)ri. Il Willis Faber & Dumas building realizzato a Ipswich (figg.538-540) tra il 1970 e il 1975 e il Sainsbury Centre for Visual Arts di Norwich (1974-1978) (figg.541-543) progettati da Foster, rappresentano i primi esempi di architettura radicale *high-tech*, il cui involucro tecnologico esalta uno dei principi cardine dell'avanguardia: il rapporto tra interno ed esterno. Con l'Hong Kong & Shanghai Bank di Hong Kong (1979-1986) (fig.544), la Foster's House a Hampstead (1979) (fig.545) e il Centro di distri-



538



541



544

538. Foster + Partners, sezione assonometrica del Willis Faber & Dumas Headquarters, Ipswich, 1970-75, © Norman Foster Foundation Archive.

539. Foster + Partners, sezione assonometrica della facciata del Willis Faber & Dumas Headquarters, Ipswich, 1970-75, © Norman Foster Foundation Archive.

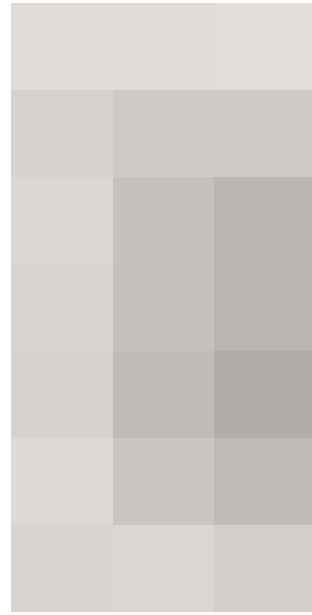
540. Foster + Partners, sezione assonometrica della facciata del Willis Faber & Dumas Headquarters, Ipswich, 1970-75, © Norman Foster Foundation Archive.

541. Foster + Partners, sezione assonometrica del Sainsbury Centre for Visual Arts, Norwich, 1974-78, © Norman Foster Foundation Archive.

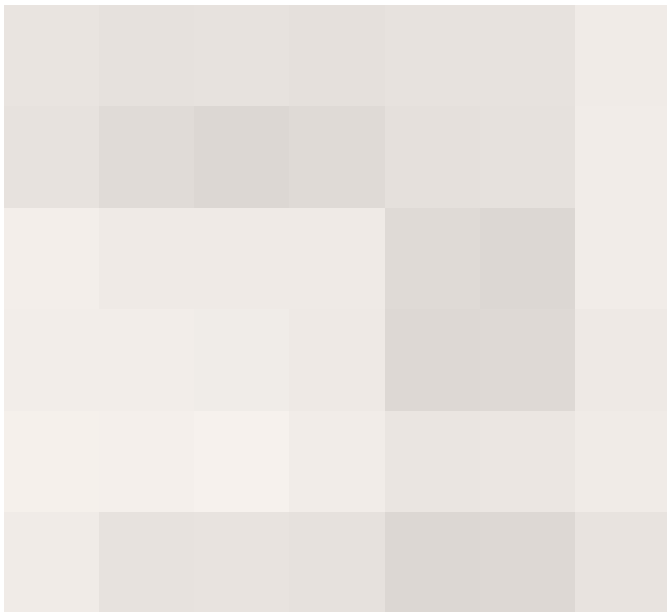
542. Foster + Partners, sezione del Sainsbury Centre for Visual Arts, Norwich, © Norman Foster Foundation Archive.



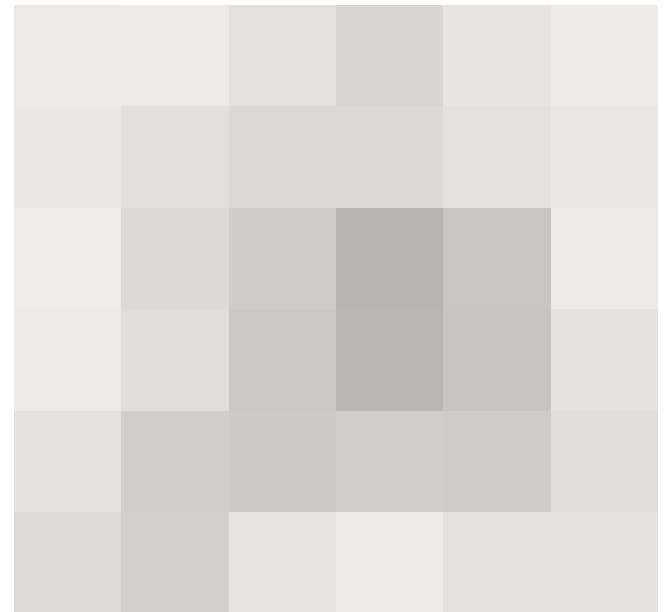
539



540



542



543

543. Foster + Partners, dettaglio del sistema facciata del Sainsbury Centre for Visual Arts, Norwich, 1974-78, © Norman Foster Foundation Archive.

544. Foster + Partners, assonometria della facciata dell'Hong Kong & Shanghai Bank, Hong Kong, 1979-86, © Norman Foster Foundation Archive.

545. Foster + Partners, sezione assonometrica della struttura dell'involucro della Foster's House, Hampstead, 1979, © Norman Foster Foundation Archive.



545





547

546. Nella pagina precedente: Foster + Partners, struttura del Centro Renault, Swindon, 1982-83, © Norman Foster Foundation Archive.

547. Foster + Partners, Le Carré d'Art, 1992. Nîmes.

548. Foster + Partners, dettaglio della Swiss Re Tower, Londra, 1997-2004, © Norman Foster Foundation Archive.

549. Foster + Partners, dettaglio del Samuel Beckett Theatre, Londra, 1971, © Norman Foster Foundation Archive.

buzione Renault di Swindon (1982-1983) (fig.546), Foster raggiunge il massimo grado di espressività con l'adozione di un sistema costruttivo ibrido della tensostruttura. Dagli anni '90 Foster si orienta verso una semplificazione formale dell'involucro, ora in dialogo con il contesto, come nel caso del museo Le Carré d'Art costruito a Nîmes nel 1992; un tempio moderno con un pronao in vetro, acciaio e cemento in dialogo con il prospiciente tempio romano della Maison Carrée (fig.547).

Infine con l'avvento del nuovo millennio, le sue opere testimoniano un rinnovato interesse per l'architettura organica, come nel caso della Swiss Re Tower di Londra (1997-2004) con il suo doppio involucro trasparente e una struttura a solette rombo-elicoi-dali per evitare l'ingombro dei pilastri. La sua forma aerodinamica cerca di risolvere la problematica dell'azione del vento dei grattacieli. Così prendendo spunto dalla biomimetica ed in modo particolare nella particolare morfologia superficiale della spugna marina "cestello di Venere", propone una conformazione a cono bombato con una struttura in acciaio vetrata a spirale, consentendo un miglior flusso dinamico del vento (fig.548).



548

Nel 1971 lo studio di architettura ebbe l'occasione di lavorare insieme a Buckminster Fuller. Tra i numerosi progetti, rimasti su carta, i più interessanti sono Climatoffice, un luogo di lavoro rivoluzionario all'interno in un involucro geodetico, la International Energy Expo' 82, Knoxville e la Autonomous House, Los Angeles.

Sempre con Fuller progettano il Samuel Beckett Theatre, a St. Peter's College, Oxford, un teatro sotterraneo che rievoca a distanza di secoli, il concetto di architettura vernacolare (fig.549).

Un edificio, in particolare, riesce a concentrare l'interesse della critica sul fenomeno dell'architettura high-tech: il Centre Pompidou di Parigi, realizzato tra il 1971 e il 1977 da Renzo Piano e Richard Rogers, con la collaborazione di Gianfranco Franchini (1938-2009), vincito-

549

ri di un concorso internazionale. Nel progetto del trio italo-inglese la spettacolarizzazione delle interiora tecniche raggiunge la sua espressione più compiuta. D'altra parte, è pur vero che il Centre Pompidou adotta e porta alle estreme conseguenze almeno due delle soluzioni più comunemente associate all'high-tech. Il centro d'arte contemporanea è concepito come un open space, i cui interni sono piattaforme liberate e disponibili ad infinite forme di appropriazione. Parallelamente, tutti gli elementi impiantistici e strutturali sono trasferiti sulle facciate e lascia-

ti interamente a vista (fig.550). Così, sull'involucro dell'edificio si struttura un linguaggio architettonico i cui vocaboli sono travi e controventi, *gerberette*³⁰⁹, tensione e compressione, tubature e camini, scale mobili e ascensori (figg.551-554). Piano, Rogers e Franchini attingono a piene mani dall'immaginario e dalle soluzioni proposte dalle neo avanguardie degli anni '60. Archigram, Archizoom e Superstudio, Richard Buckminster Fuller e Cedric Price, Frei Otto e Günther Behnisch, tra gli altri, sono i riferimenti che gli autori del Centre Pompidou condividono con gli altri protagonisti della corrente high-tech.

550. Renzo Piano e Richard Rogers, Centre Georges-Pompidou, Parigi, 1971-77, © Michel Denancé.

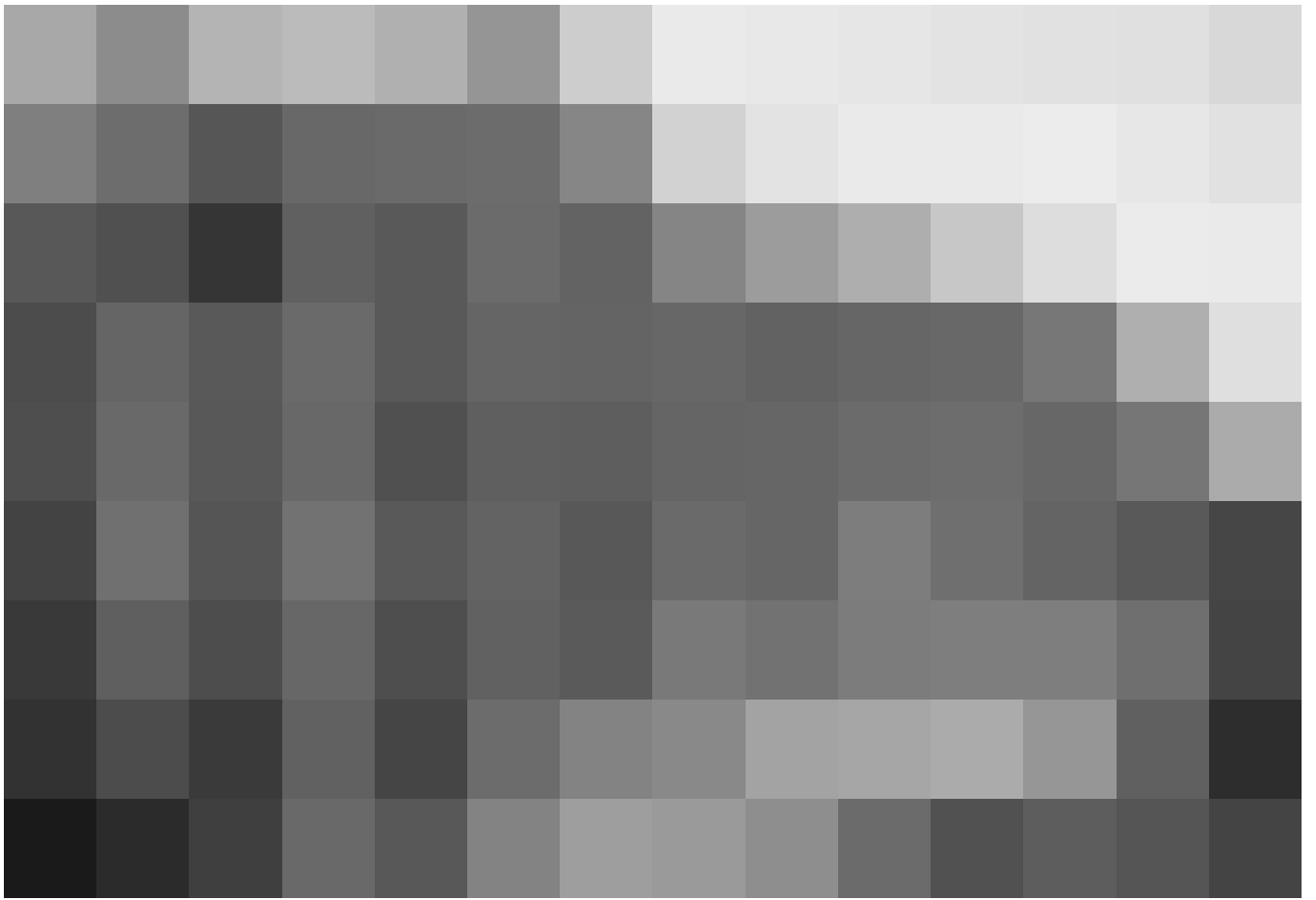
551. Facciata in costruzione del Centre Georges-Pompidou, Parigi, 1971-77.

552. Dettaglio del sistema strutturale gerberette per la costruzione dell'involucro della facciata del Centre Georges-Pompidou, Parigi, 1971-77.

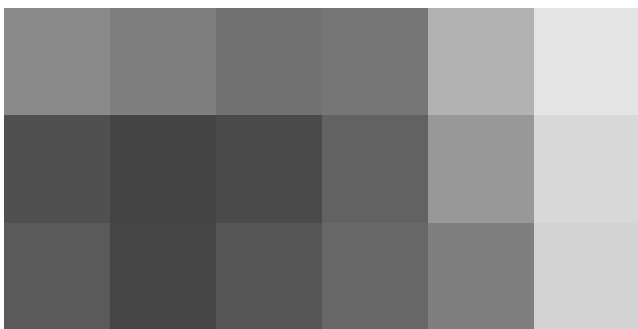
553. Schema del sistema strutturale gerberette per la costruzione dell'involucro della facciata del Centre Georges-Pompidou, Parigi, 1971-77.

554. Dettaglio del sistema strutturale gerberette per la costruzione dell'involucro della facciata del Centre Georges-Pompidou, Parigi, 1971-77, © Bernard Vincent, Studio Piano & Rogers.





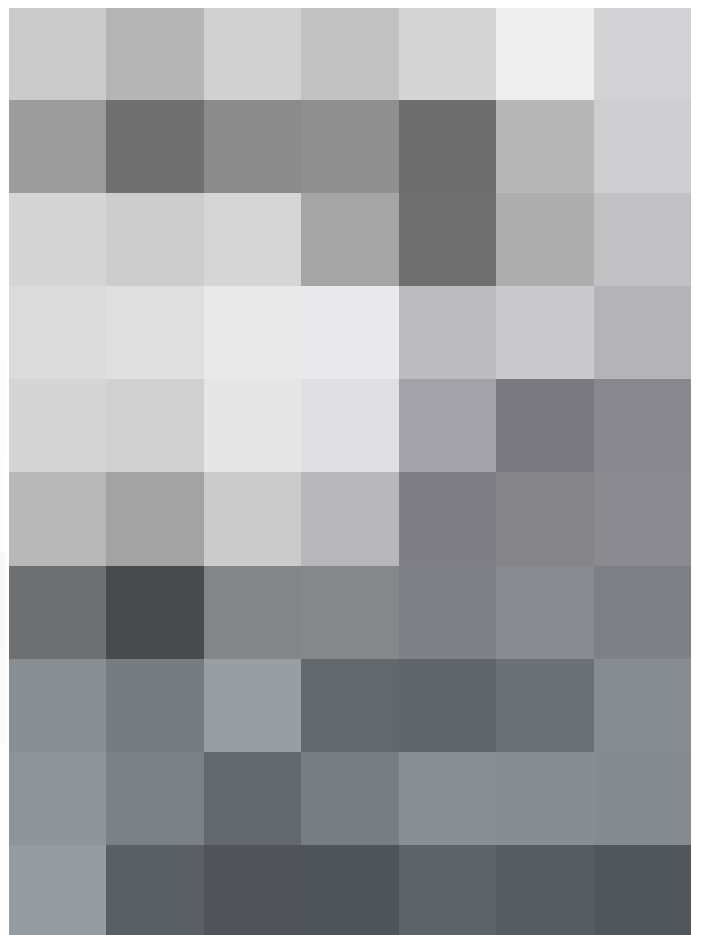
551



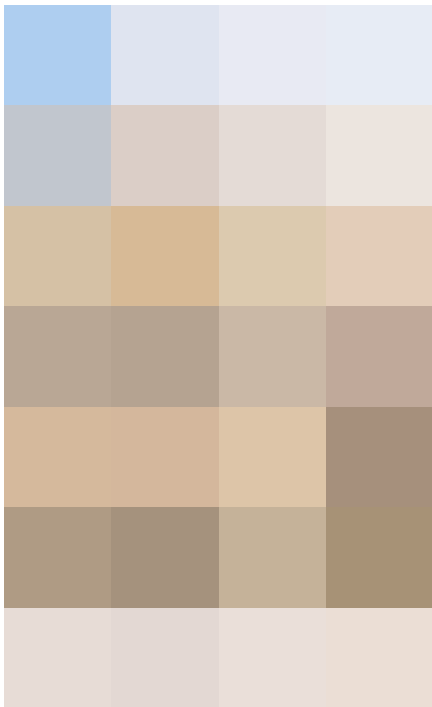
552



553



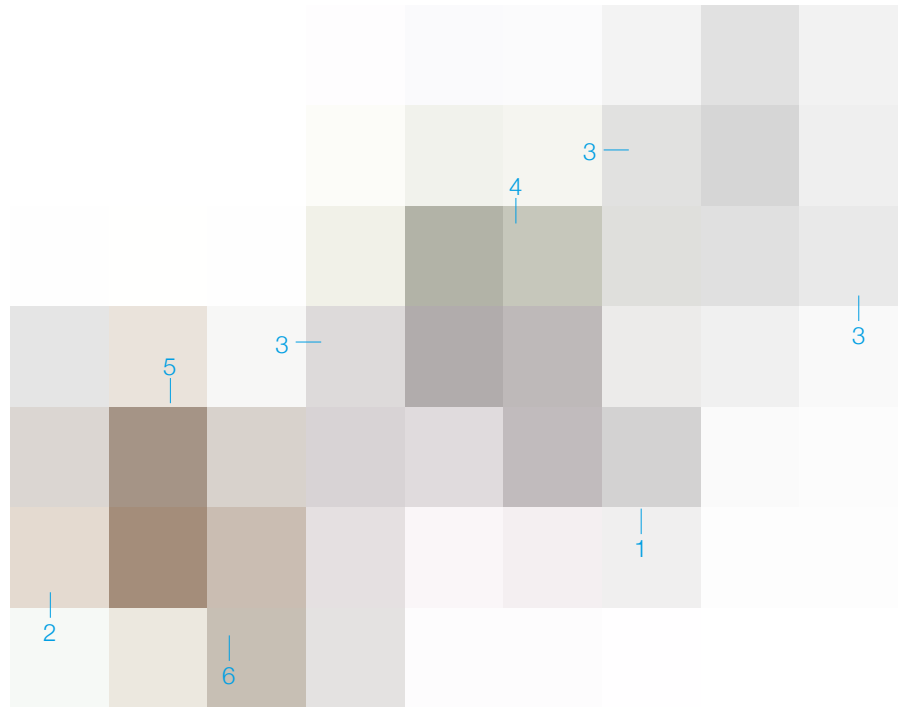
554



555

La maggior parte delle architetture tra il 1970 e l'avvento del nuovo millennio sono caratterizzate da un senso di leggerezza e trasparenza, ottenute tramite il ricorso a materiali che consentono di ottenere una immagine di smaterializzazione dell'involucro. La conquista di una completa autonomia dell'involucro architettonico dalla struttura portante ha una importante conseguenza pratica: l'aprirsi di una gamma di inedite possibilità espressive. Passare dalla continuità alla discontinuità degli involucri di rivestimento, alla omogeneità della parete intonacata al rivestimento per elementi discreti, tra loro commessi e saturati, l'obsolescenza della parete muraria monomaterica e la prevalenza della pluralità degli strati conduce a una scelta di gamme espressive molto diversificata, in cui il ruolo della componente tecnico-estetica è molto più sbilanciato, caricato di responsabilità espressive, meno "necessario. Questa componente, infatti, è condizionata dalle tecniche, dai formati, dalle necessità produttive dei materiali, dai livelli prestazionali e dalle loro ricadute estetiche e funzionali.

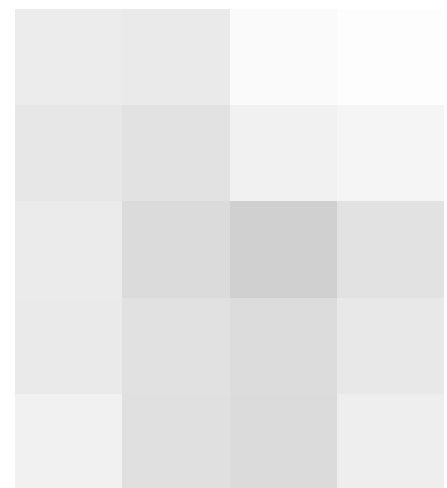
Questa scissione del sistema parete in più strati è già presente negli schemi elaborati da Louis Isidore Kahn (Kuressaare, 1901 – New York,



556

1974) per la progettazione della Meeting House presso il Salk Institute for Biological Studies a La Jolla (California) nel 1959 (fig.555). In un aforisma figurato, Kahn «considera l'interno e l'esterno della parete come due lembi separati, con un carattere architettonico differente. Le due facciate possono scorrere affiancate finché di tratti di pareti opache, per quanto distinte. Nel momento in cui una delle due assume la consistenza di parete vetrata, è necessario staccarla. Poiché ci si trova nella faccia interna dell'edificio, l'indoor, è necessario anche proteggerla dall'abbagliamento»³¹⁰ (figg.556-557). Con questo ragionamento l'architetto precorre un principio cardine della nascente architettura bioclimatica, ovvero il tema della separazione degli strati e l'individuazione di uno strato "neutro" in cui può scorrere liberamente l'aria e, con opportune aperture, dare risoluzione al problema della ventilazione naturale.

L'involucro, quindi, da elemento di separazione assume il ruolo di diaframma, capace di regolare il passaggio di energia a seconda delle condizioni atmosferiche e dell'incidenza dei raggi solari. Un esempio è il tema della luce proposto da Jean Nouvel (Fumel, 1945) nella facciata dell'Institut du Mond Arabe, costi-



557

555. Louis Isidore Kahn, facciata della Meeting House presso il Salk Institute for Biological Studies a La Jolla, California, 1959, © Jason R. Woods.

556. Particolare tecnologico della facciata della Meeting House presso il Salk Institute for Biological Studies. Legenda: 1 struttura intelaiata in calcestruzzo armato, 2 muratura in calcestruzzo prefabbricato, 3 pannello prefabbricato in cemento amianto, 4 telaio in acciaio, 5 rivestimento in teak, 6 davanzale inclinato in teak.

557. Louis Isidore Kahn, diagramma esplicativo dello sviluppo del sistema parete per la progettazione della Meeting House presso il Salk Institute for Biological Studies a La Jolla, California, 1959.



558

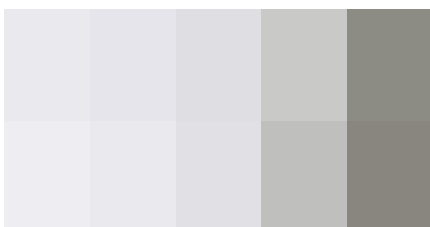
558. Diaframmi dinamici in grado di regolare l'afflusso della luce all'interno dell'Institut du Monde Arabe, progettato da Jean Nouvel a Parigi nel 1987.

559. Alcune tipologie di vetro impiegate in architettura : a) satinato, b) stampato, c) retinato, d) colorato, d) vetrocamera, e) colorato, f) serigrafato.

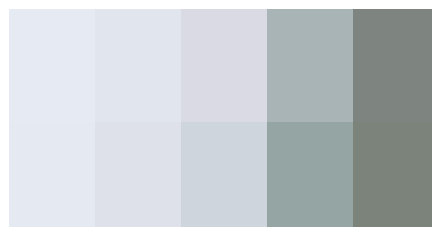
tuita da dei diaframmi fotografici in grado di variare l'afflusso della luce all'interno stabilendo una mutazione dello spazio interno (fig.558). La conquista dell'indipendenza dell'involucro dalla struttura è il punto di partenza per instaurare un rapporto mutevole tra trasparenza e opacità, diventato nella contemporaneità il tema dominante di molte sperimentazioni. Il superamento delle superfici massive a favore di superfici chiudenti sottili si è tramutato in un vocabolario variegato di numerose tipologie di facciate trasparenti. Le moderne tecnologie hanno permesso la messa a punto di numerosi processi di trattamento delle superfici e del sistema parete-vetro: smaltatura, satinatura, sabbiatura, incisione, laminazione, acidatura, molatura, vetro serigrafato, vetro stratificato, vetro retinato, vetro trattato con tempra chimica, vetro indurito, vetrocamera, vetro basso emissivo, vetro colorato o rivestito,

vetro stampato, vetro diffondente, vetro antincendio, etc (fig.559). Tali processi oltre ad un aspetto funzionale hanno ampliato enormemente la gamma espressiva dei materiali che in passato erano subordinati a ricoprire un ruolo essenzialmente tecnico. Oggi, invece, questi processi sono in grado di fornire a questi materiali un'inedita iconicità che amplia in architettura la gamma delle percezioni di tipo tattile, visivo e uditivo. Questo nuovo scenario trasferisce il sistema involucro su un piano più complesso e ambiguo di "superficie" che diventa il nuovo campo sperimentale delle qualità dei materiali.

«La produzione di inedite iconicità si scontra con la "debolezza espressiva" dei nuovi materiali. Questi sono caratterizzati da una congenita limitatezza espressiva. Essendo costituiti da spessori sottili, elementi piani, lamine micrometriche, la loro rappresentazione architettonica sconta sempre elementi di imprecisione, diventa ambigua e impalpabile. L'espressività di questo tipo di facciate è mediata attraverso tecniche costruttive, tecnologie, sistemi, programmi informatici e modi della comunicazione difficilmente controllabili con gli strumenti tradizionali dell'architettura. Una complessa "messa in opera" dell'architettura, in cui il ruolo dell'involucro è diventato centrale. Ciò obbliga a ripensare gli strumenti di controllo dell'espressività architettonica attraverso tecniche specifiche, che agevolino tale controllo in quei territori che oltrepassano la costruzione tradizionale.



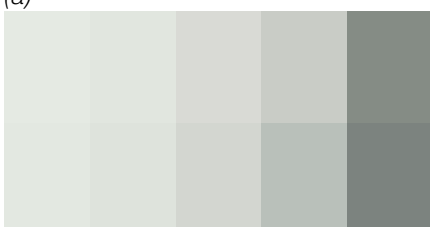
(a)



(c)



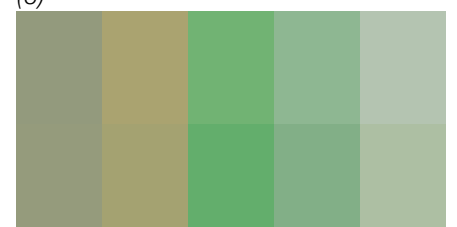
(e)



(b)



(d)



(f)

559

Quando gli elementi non sono a spessore, per così dire, quando non si utilizzano i materiali "naturalmente" espressivi come la pietra, il laterizio, gli intonaci, è necessario conferire spessori e livelli diversi di espressività, senza rischiare la discesa nel banale, ma mettendo in campo strategie espressive più complesse. Queste adottano i procedimenti della stratificazione, del trattamento del materiale e della sua superficie, la sua collocazione nel contesto costruttivo e nell'apparecchiatura di facciata, se è il caso, l'attribuzione di un carattere figurativo, l'inversione luminosa notturna-diurna, il ruolo delle strategie comunicative e di pubblicità. La natura dell'involucro rimette in questione il ruolo della facciata come frontiera esterna, come nuovo luogo dell'architettura nell'edificio contemporaneo. La facciata è il luogo progettuale dove si condensa l'aspetto della novità; il luogo di una accumulazione funzionale, esigenziale, espressiva dove si concentra l'aggiornamento dei materiali, le loro caratteristiche prestazionali, le tecniche costruttive e bioclimatiche, le soluzioni tecnico-strutturali e di dettaglio. I nuovi luoghi dell'edificio contemporaneo, l'atrio, la facciata e le sue partizioni, la wall section sono i luoghi di addensamento degli aspetti costruttivi, tecnologici, del valore di superficie - qualità tattili, visive e di materiale - di rappresentazione dell'architettura.

Il rapporto tra interno ed esterno si arricchisce di una accresciuta facoltà comunicativa dell'edificio, nella rinnovata condizione di alterazione delle caratteristiche di trasparenza, e nell'alternanza delle condizioni percettive giorno-notte. L'edificio funziona come lanterna urbana, e trae significato dalla sua funzione di segnale urbano, iconico, comunicativo e pubblicitario, rievocando la sua radice espressionistica e funzionalista (figg.560-561). L'involucro non solo è "disegnato", o stampato, ma ha una nuova "attività": in essa predominano gli aspetti dell'engineering, del suo funzionamento come macchina energetica che scambia, assorbe e produce energia.



560

Il portato di queste complesse fenomenologie caratterizza la natura delle tipologie contemporanee come un dato fortemente evolutivo. Nella tipologia dell'edificio per uffici, nella mediateca, nell'auditorium contemporaneo, questo principio di separazione e di differenziazione delle componenti si radicalizza e obbliga a stabilire una nuova relazione tra tipo, forma e struttura, tra contenuto e involucro.»³¹¹.

Il gruppo composto da Jacques Herzog (Basilea, 1950) e Pierre de Meuron (Basilea, 1950) opera una trasformazione sempre più complessa del concetto di trasparenza, espressione di una connotata "autorialità" dell'architettura.

560. L'installazione dell'artista Camille Walala realizzata sulla facciata di un edificio storico di New York, 2018.



561

561. Museum Garage, il parcheggio multipia-
no realizzato a Miami da Jurgen Mayer
H, Workac, Clavel Arquitectos, Nicolas
Buffe and K/R, 2018

562. Jacques Herzog e Pierre de Meuron, Ri-
cola-Europe SA, Production and Storage
Building, Mulhouse-Brunstatt, 1992-93,
© Margherita Spiluttini.

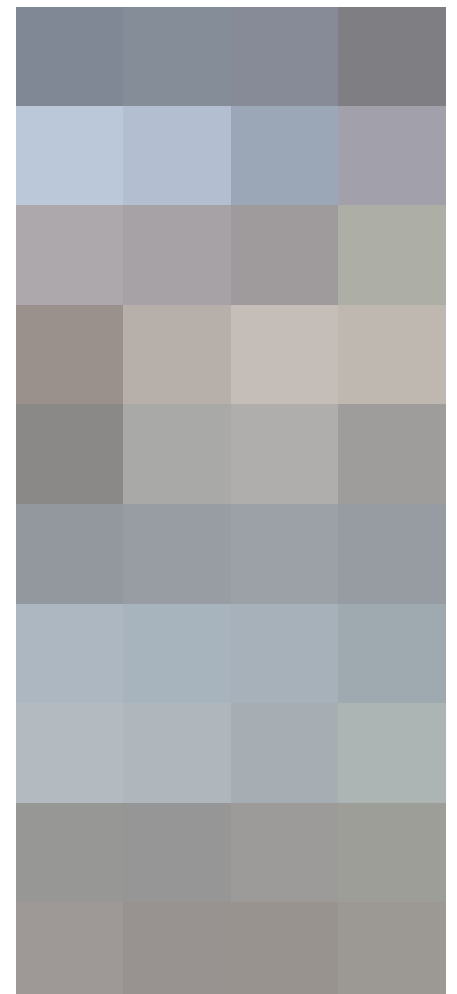
563. Jacques Herzog e Pierre de Meuron,
Fachhochschule, Eberswalde, 1999.

«La struttura architettonica è as-
sunta nella sua più intima essenza.
Un attento processo di misura-
zione la depura da tutte le in-
crostazioni concettuali di tipo
storico-convenzionale che in qual-
che maniera la appesantiscono.
I materiali sono selezionati e messi
in opera nel loro significato originario,
e quindi montati in un processo com-
positivo in cui le componenti con-
servano la loro identità e distinzione.
Sono quindi escluse mesco-

lanze linguistiche di sorta.
Ogni volta un materiale viene as-
sunto come elemento centra-
le della costruzione. Sono quindi
fortemente limitate le varietà del-
le composizioni polimateriche.
Assenza di mescolanza e discon-
tinuità affievoliscono quindi la con-
cezione dell'edificio come organi-
simo architettonico tradizionale»³¹².
L'edificio a Mulhouse che ospita la
fabbrica e il magazzino della Rico-
la (1992-1993) è caratterizzato da
una facciata composta da pannelli
in policarbonato su cui, tramite un
procedimento di stampa serigrafica,
gli architetti riproducono l'im-
magine ripetuta di un'achillea di Karl
Blossfeldt (1865-1932) (fig.562).
Il medesimo procedimento carat-
terizza il progetto della Biblioteca
della Fachhochschule a Eberswalde
(1994-1999), la cui facciata è com-
posta dalla successione in oriz-
zontale di pannelli in cemento e in
vetro su cui sono serigrafate delle
immagini di Thomas Ruff (fig.563).



562



563

La sintassi architettonica degli architetti svizzeri, così come molti altri, prevede un trattamento del materiale affinché possa esaltare la sua intensità materico-concettuale, coadiuvato dal disvelamento della tecnica di montaggio. «Il tema del librarsi della superficie d'appoggio, adottato nel Galleria d'arte Goetz di Monaco (fig.564), il tema dei telai strutturali vetrosi nella Greek Orthodox Church, il ricorso massiccio alle superfici, alle reti, lamiere, il senso dello stropicciato, i tagli concettuali nell'involucro del Museo Walker di Minneapolis. Si delineano delle stagioni sul ruolo dei materiali e delle superfici. La superficie lignea, trattata con sapienza artigianale, o la cruda elementarizzazione di pannelli e listelli di piccolo taglio (le varie versioni di magazzini Ricola), lamiere e nastri, involucri avvolgenti di tipo elettrico nei segnalatori ferroviari, la stratificazione delle superfici e lo slittamento concettuale nel loro addensarsi, fibre naturali impresse sul vetro, pesante tendaggio concettualmente impresso su vetri, nudità cementizia e sovrimpressioni fotografica, vetro serigrafato. E' una epifania del materiale che, assunto dapprima nella sua duttilità e inconsistenza materica, è capace poi di operare una ridefinizione volumetrica di masse»³¹³.



564



565

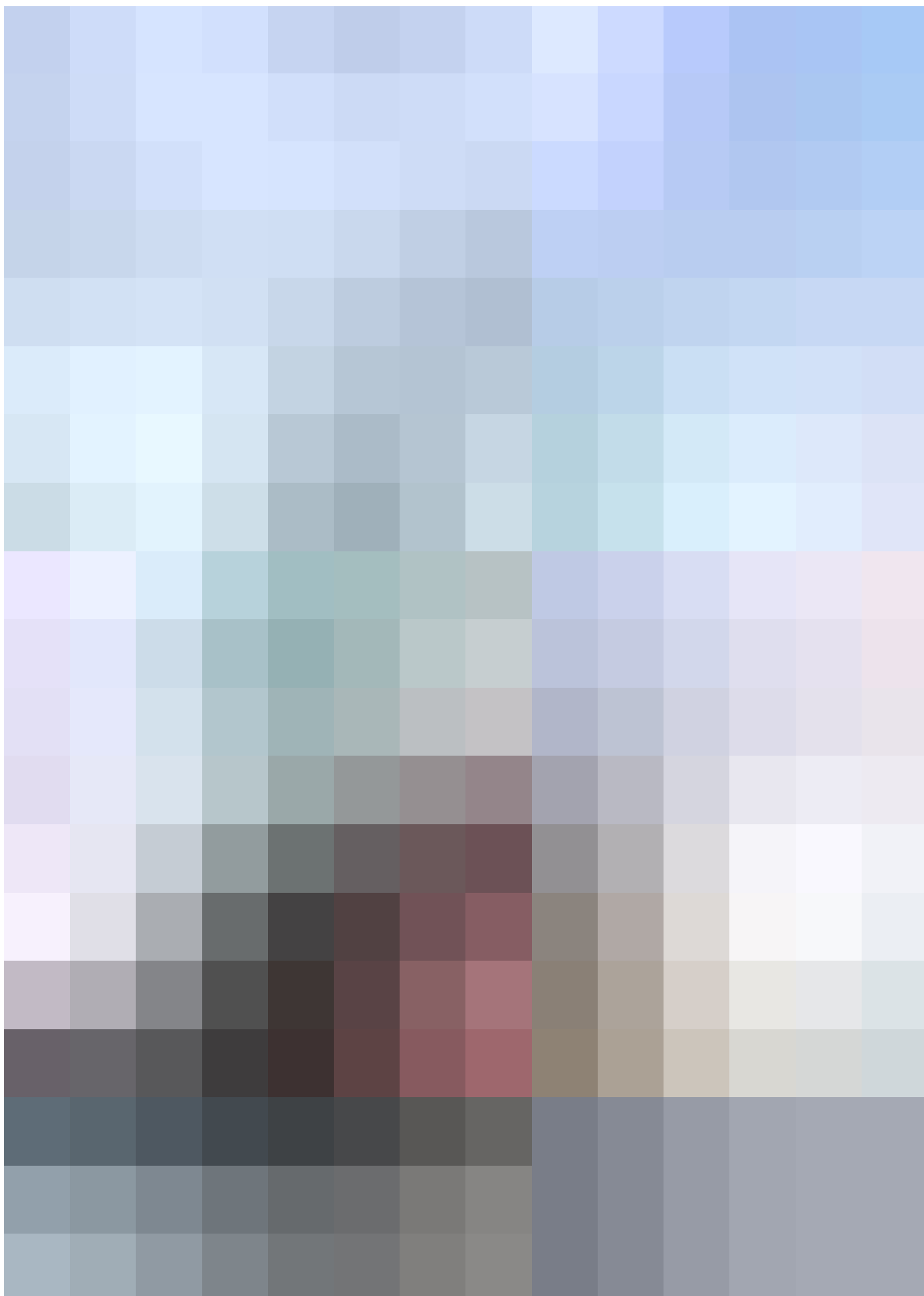
L'approfondimento concettuale del rapporto tra costruzione e facciate mediatiche assume un ruolo di primo piano all'interno dell'architettura contemporanea: l'unità volumetrica ritrovata come valore si accompagna spesso con differenziazioni tattili e materiche che conferiscono ambiguità di struttura e di scala agli edifici. La costruzione assume una natura sempre più problematica, e si interroga sulla nuova sostanza costruttiva dell'immagine. La città contemporanea sembra divenire sempre più uno spazio comunicativo laddove segnali e simboli si rinnovano incessantemente. Enormi gigantografie invadono sempre più le metropoli, vere e proprie maschere, che ricoprono interi palazzi e monumenti in restauro, cingono

d'assedio molte piazze i luoghi di maggiore frequentazione (fig.565). In un simile contesto l'architettura si presenta sempre più come un luogo di sperimentazione di processi costruttivi e di tendenze della comunicazione e del consumo, in cui la funzione abitativa sembra diventare sempre più marginale, soppiantata da quella dell'informazione, dello spettacolo e della finzione, come rivela la presenza dei media building, materializzazione della fusione del mondo reale e virtuale su larga scala. Si tratta di strutture che attraverso facciate interattive multimediali propongono superfici architettoniche dove la funzione dell'informazione prevale su tutte le altre. Una facciata mediatica, quindi si caratterizza per colori e immagini effimere³¹⁴.

564. Jacques Herzog e Pierre de Meuron, Galleria d'arte Goetz, Monaco, 1992.

565. Le facciate mediatiche in sovrapposizione agli edifici storici in Piccadilly Circus, Londra.

566. Nella pagina successiva: Jacques Herzog e Pierre de Meuron, Elbphilharmonie, Amburgo, 2017, © Iwan Baan.



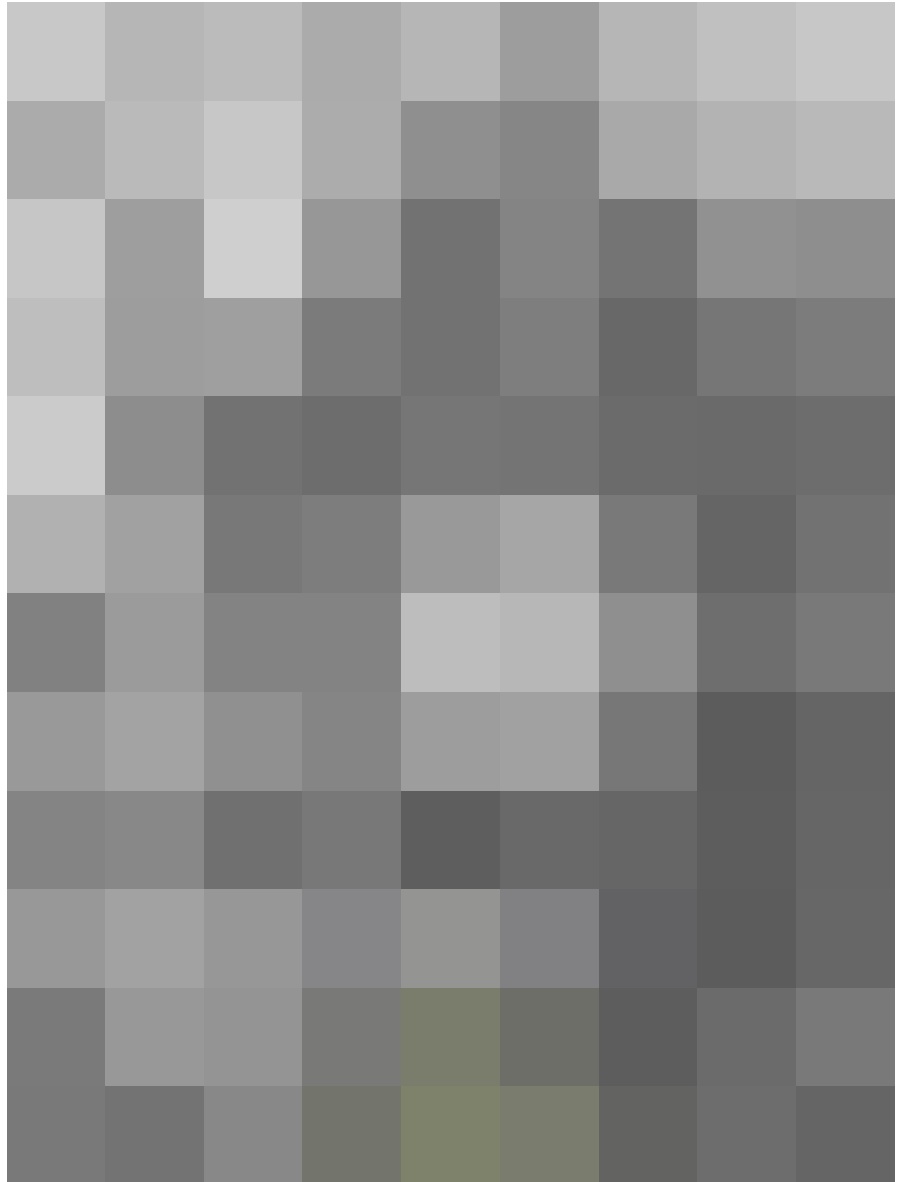
La forza comunicativa esternata ad una pluralità di persone attraverso le superfici architettoniche affonda le radici nella notte dei tempi. Se si pensa alla locuzione latina “*in medium proferre*” con il significato di “rendere pubblico, rivelare, manifesto” appare chiaro come anche storicamente l’architettura assolveva anche alle funzioni di rendere “manifesto” un determinato aspetto socialmente condiviso. Basti pensare al nastro narrativo del predominio dell’Atene periclea del fregio del Partenone; o ai rilievi simboleggianti le *Res gestae divi Augusti* dell’Ara Pacis o alle gloriose guerre Daciche descritte nella spiraliforme Colonna Traiana; e ancora, i mosaici bizantini, le vetrate istoriate delle cattedrali gotiche, alle pitture d’infamia raffigurate nella Firenze rinascimentale sfruttando le pareti dei più in vista palazzi pubblici, sino alla luminescenza spazialità del Crystal Palace di Paxton.

Scott Brown e Robert Venturi sostengono che in ogni stile architettonico della storia è individuabile l’utilizzo dell’architettura con la funzione di “insegna”³¹⁵.

Numerose sono le influenze che dagli anni ‘70 ad oggi hanno caratterizzato le facciate mediatiche:

- media architecture;
- video wall;
- urban screen;
- light architecture;
- blurring architecture;
- ipersuperfici e transarchitettura;
- interactive architecture;
- responsive architecture;
- kinetic architecture.

Già nel 1990 Toyo Ito (Seul, 1941) attraverso la mostra “Visions Japan” (Londra, 1991), teorizzava il concetto di *architettura evanescente* in grado di mescolarsi mediante i confini diffusi e morbidi dell’involucro con l’intero contesto urbano e naturale. Così propose il progetto *Dreams* con lo scopo di visualizzare sotto forma di nebbia di cristalli liquidi le particelle d’informazione che i vari media emettevano nell’aria. E ancora, nel 1964-65 Eero Saarinen



567

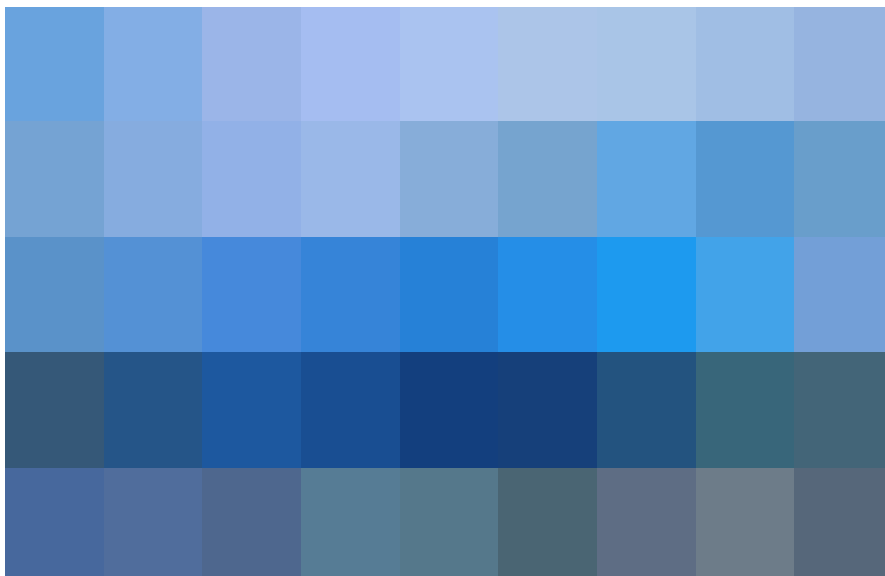
(Kirkkonummi, 1910 – Ann Arbor, 1961) e Charles Eames proponevano alla fiera mondiale di New York, il Pavillion IBM, un teatro ovoidale con un involucro recante la scritta ripetuta IBM, sorretto da una foresta di alberi in acciaio corten (fig.567). Infine, nel 2002, la società Diller & Scofidio + Renfro progetta il Blur Building, un’architettura dell’atmosfera in grado di generare una massa di nebbia risultante dalla nebulizzazione dell’acqua del lago di Neuchâtel attraverso 35.000 ugelli ad alta pressione. Sempre loro, nel 2019, hanno progettato The Shed, una innovativa struttura di 18.500 m² che può trasformarsi attraverso un guscio telescopico in ETFE in una grande aula per supportare le idee più ambiziose degli artisti (fig.568).

567. Eero Saarinen e Charles Eames, Pavillion IBM, New York, 1964-65.

568. Nella pagina successiva: Diller & Scofidio + Renfro, Blur Building, New York, 2019, © Iwan Baan.



Dalle sperimentazioni del secolo scorso di Ito, Nouvel e Tschumi e altri contemporanei alla nuvola di Diller & Scofidio + Renfro si è sviluppato un forte interesse per l'involucro dinamico, cioè capace attraverso una sensibilità indotta di adattarsi all'ambiente che lo circonda. Alcuni esempi sono il sistema dinamico di ombreggiamento delle Al Bahr Towers ad Abu Dhabi (fig.570), il Quadracci Pavilion (2001) di Santiago Calatrava, il Theme Pavilion Expo Yeosu (Corea, 2012) progettato dallo studio viennese Soma Architecture (fig.571) ed il Meteorosensitive Pavilion (Stuttgart, 2013) di Archim Menges (fig.572).



569



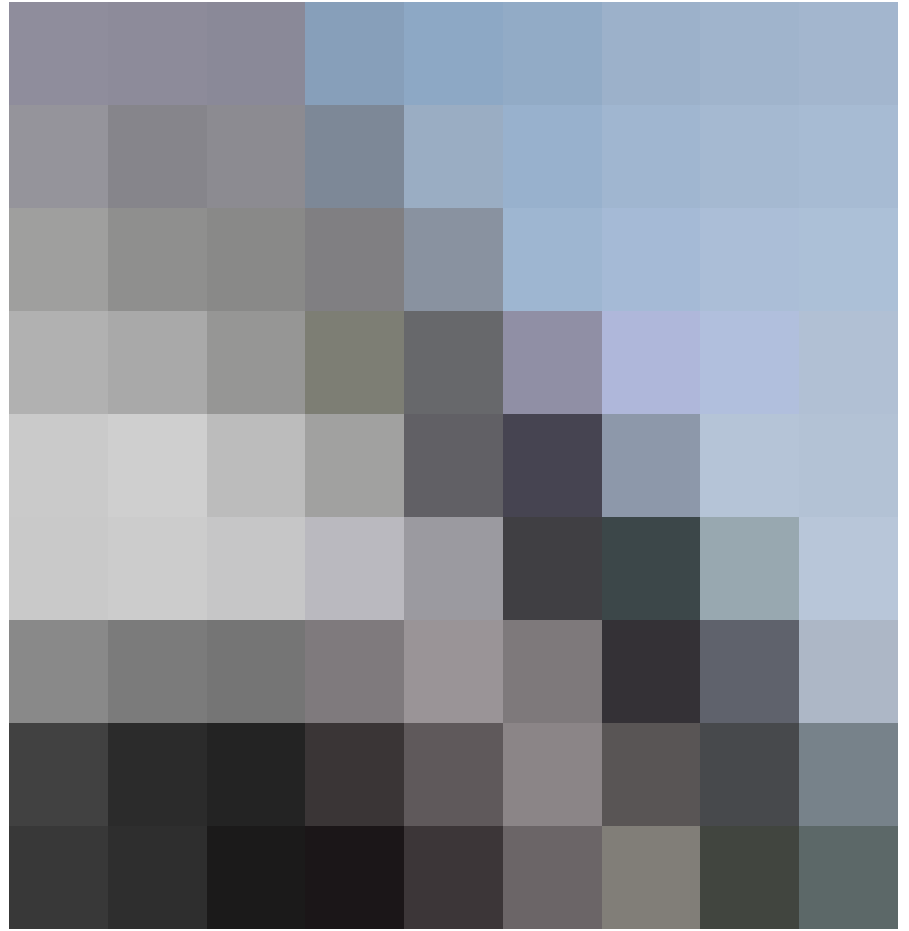
570

569. Nella pagina precedente: Asymptote Architecture, ARC- River Culture Multi-media Museum – Daegu.

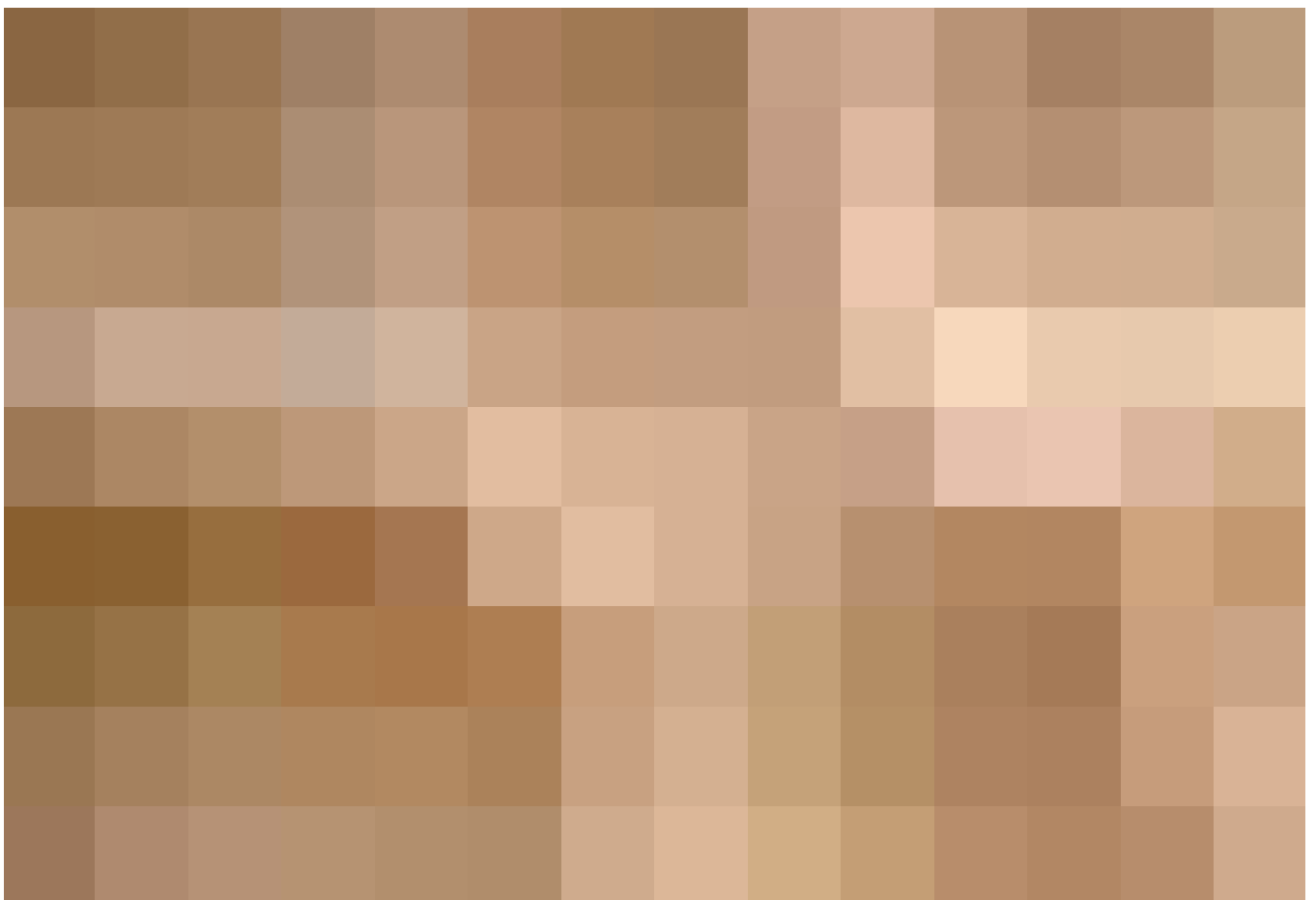
570. Nella pagina precedente: dettaglio dell'involucro schermante dinamico delle Al Bahr Towers, Abu Dhabi.

571. Soma Architecture, Theme Pavilion Expo Yeosu, Corea, 2012.

572. Achim Menges Architect, Oliver David Krieg, Steffen Reichert, HygroSkin-meteorosensitive pavilion, Stuttgart, 2013, © ICD University of Stuttgart



571



572

Note bibliografiche

- 1 Moccia C., *Realismo e astrazione e altri scritti*, in Fagioli M., collana *Theoria*, Aiòn edizioni, Firenze, 2015, pag.71.
- 2 Crippa M. A., *Storia dell'architettura: il mondo delle costruzioni e le sue immagini*, Jaca Book, Milano, 1992,
- 3 De Quincy Q., *Dizionario storico di architettura*, in Farinati V. e Teyssot G. (a cura di), *Le voci teoriche*, Marsilio, Venezia, 1985, pag.204.
- 4 Herzog T., Krippner R., Lang W., *Atlante delle facciate*, Utet, Milano, 2005, pag.9.
- 5 Winckelmann J. J., *Storia dell'Arte nell'antichità*, Abscondita, 2007.
- 6 Benjamin W., *Le affinità elettive*, in Solmi R. (a cura di), *Angelus Novus*, Einaudi, Torino, 1962, pp.225-226.
- 7 Bötticher K., *Die Tektonik der Hellenen*, Postdam, 1844-1852, in Dal Co F. (a cura di), *Teorie del moderno*, Laterza, Roma-Bari, 1985.
- 8 Moretti L., *Valori della modanatura*, in *Spazio*, n.6, 1951, pp.6-12.
- 9 De Mattia D., *Architettura antica e progetto. Dalla Bauforschung al progetto architettonico in area archeologica*, Gangemi, Roma, 2013.
- 10 Semper G., *Die vier Elemente der Baukunst*, Braunschweig, 1851, in Quitzsch H. (a cura di), *La visione estetica di Semper*, Jaca Book, Milano, 1991.
- 11 Trevisan C., *Per la storia della stereotomia. Geometrie, metodi e costruzioni*, Aracne, Roma, 2011, pag.7.
- 12 Frampton K., *Storia dell'architettura moderna*, Zanichelli, Bologna, 2008, pag.183.
- 13 *Ivi*, pag.183.
- 14 Moccia C., *Architettura e costruzione*, in Fagioli M., collana *Theoria*, Aiòn edizioni, Firenze, 2012, pag.36.
- 15 Schittich C., *Involucri edilizi. Progetti, strati funzionali, materiali*, in *Detail*, Birkhäuser - Edizioni d'Architettura, Monaco di Baviera, 2003, pag.10.
- 16 Semper G., *Der Stil in den technischen und tektonischen Künsten, oder praktische Ästhetik*. Ein Handbuch für Techniker, Künstler un Kunstfreunde, *Francoforte*, 1860.
- 17 Semper G., *Über den Ursprung einiger Architekturstile*, *Kleine Schriften*, 1854, pagg.369-382.
- 18 Squicciarino N., *Arte tessile, abbigliamento e architettura in Gottfried Semper*, Armando Editore, 2019, pag.56.
- 19 Hvattum M., *The Cult of Origins. In Gottfried Semper and the Problem of Historicism*, Cambridge University Press, 2004, doi:10.1017/CBO9780511497711.003.
- 20 De Quincy Q., *Encyclopédie méthodique. Architecture, par M. Quatremere de Quincy. Dédiée et présentée a Monseigneur de Lamoignon, Garde des Sceaux de France, &c. Tome premier*, Chez Panckoucke, Parigi, 1788, pag.478.
- 21 *Ibidem*.
- 22 Lavin S., *Quatremère de Quincy and the Invention of a Modern Language of Architecture*, MIT Press, Cambridge - Massachusetts, 1992, pag.70.
- 23 Bergdoll B., *European architecture 1750-1890*, Oxford University Press, 2000.
- 24 Conte A., *La città scavata. Pae-saggio di patrimoni tra tradizione e innovazione*, Gangemi, Roma, 2016, pag.2.
- 25 Bertozzi P., Ghini A., *Le forme della tradizione in architettura. Esperienze a confronto*, Franco Angeli, Milano, 2005, pag.101.
- 26 *Ivi*, pag.102.
- 27 Michell G., *The Penguin guide to the monuments of India*, Viking, Londra, 1989.
- 28 «*chaityagriha*»: casa del *chaitya*, ovvero dello *stupa*, oggetto della devozione buddhista.
- 29 Anati A. F., *Missione a Malta. Ricerche e studi sulla preistoria dell'arcipelago maltese nel contesto mediterraneo*, Jaca Book, Milano, 1988, pag.27.
- 30 «*globigerina*»: s.f. [lat. scient. *Globigerina*, comp. del lat. class. *globus* «sfera» e tema di gerēre «portare»]. – Genere di protozoi

- foraminiferi che comprende organismi pelagici, di dimensioni anche superiori a 1 mm, quindi visibili a occhio nudo, con scheletri calcarei a forma di globo: sono fra i più comuni costituenti dei sedimenti oceanici, che prendono appunto il nome di fanghi o fanghiglie a globigerine, e possono entrare nella costituzione di formazioni sedimentarie di notevole spessore.
- 31 Toffetti R., *Hypogeum Hal Saflieni. Cenni Storici, rilievi geobiologici e percezioni*, in www.ruditoffetti.it.
- 32 «*sepulcrum*»: è una struttura più o meno complessa destinata ad accogliere il defunto e alla celebrazione del culto funerario, che può avere luogo sia all'interno che all'esterno del monumento. Nell'ideologia funeraria etrusca l'idea del *sepulcrum* come casa dei defunti - e in quanto tale concepita come replica della casa dei vivi - appare profondamente radicata, in *Thesaurus Cultus Et Rituum Antiquorum (ThesCRA)*, di Fondation pour le Lexicon Iconographicum Mythologiae Classicae, J. Paul Getty Museum, Los Angeles, pag.320.
- 33 «*siltite*»: è una roccia sedimentaria appartenente alla categoria delle rocce clastiche.
- 34 Despois J., *Le Djebel Nefousa, Larousse éditeurs*, Parigi, 1935.
- 35 «*ghorfa*»: dall'arabo *ghurfa*, stanza è una tipologia di edificio propria dell'architettura berbera del sud della Tunisia. Si tratta di una cellula granaio a pianta rettangolare allungata, con un'unica apertura sul lato corto, che i Berberi usavano prevalentemente per immagazzinare cereali e altre derrate.
- 36 Besana E., Mainetti M. (a cura di), *Architetture trogloditiche del Mediterraneo. Il Villaggio di Douiret, jbel tunisino-tripolitano*, Opera Ipogea, n.2, Società Speleologica Italiana, Erga edizioni, Bologna-Genova, 2000.
- 37 Tommaselli M., *Guida alle Chiese rupestri del materano*, BMG Editrice, Matera, 1988.
- 38 Bixio R., Castellani V., *Tipologia delle strutture sotterranee della Cappadocia*, in *Le città sotterranee della Cappadocia*, Opera Ipogea, n.1, Società Speleologica Italiana, Erga edizioni, Bologna-Genova, 1995.
- 39 «*arnia*»: “cassetta” in legno o ferula nel quale una famiglia di api (colonia o sciame) costruisce con la cera il proprio nido (“favo”). Le ampie bocche posteriori delle arnie all'interno della camera di servizio, con ogni probabilità erano tenute chiuse da sportelli amovibili e aperte solo in occasioni particolari come la introduzione dello sciame “naturale” all'atto del ripopolamento, le ispezioni periodiche o la asportazione dei favi.
- 40 Gallo D., Acito M., *Alle radici della storia della Grotta del Sole. Da cava a luogo di produzione di miele e cera*, in *Mathera - Rivista trimestrale di storia e cultura del territorio*, anno III, n.8, Antros, Matera, 2019, pagg.37-49.
- 41 Gallo D., Fontana A., Foschino F., Paolicelli R., *Le neviere di Matera*, in *Mathera - Rivista trimestrale di storia e cultura del territorio*, anno III, n.9, Antros, Matera, 2019, pagg.91-102.
- 42 «*tenda nera*»: chiamate anche “*case di pelo*” o significativamente “*beit*”, “*case*”, diffuse in una grande fascia sovraequatoriale che va dall'Atlantico al Tibet e la cui origine è da cercarsi in zona mesopotamica. Il colore nero della tenda è dovuto all'utilizzo de lana di capra, *izzim*, in Piro F., *La tenda del deserto. Architettura del primo santuario di Israele*, Youcanprint, 2014, pag.43.
- 43 Faegre T., *Tende. Architettura dei nomadi*, Dedalo, 1981.
- 44 Lahuerta J.J., *Antoni Gaudì, 1852-1926. Architettura, ideologia e politica*, Mondadori Electa, Milano, 1992, pag.340.
- 45 Come è noto, Hooke era solito esprimere le leggi da lui definite riassumendole in anagrammi. La legge citata fu infatti espressa con l'anagramma «*abcccddee-eeeefgggiiiiiii-illmmmmnnnnnoo-prrssstttttuuuuuuuux*» che stava appunto per «*Ut pendet conti-*

- num flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum*»: «Come pende un continuo flessibile, così sta in piedi un contiguo rigido invertito», in Hooke R., *A Description of Helioscopes, And Some Other Instruments*, Londra, 1676, pag.31.
- 46 Otto F., *Tensile Structures*, MIT Press, Cambridge, 1979.
- 47 Isler H., *New Shapes for Shells - twenty Years After*, in Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures, 1979, n.71, pagg. 9-26.
- 48 «*In this analogy, an error arises from the fact that pneumatic pressure is perpendicular to the membrane surface whereas gravitation forces are vertical. If the shell is shallow and its rise small, this error can be neglected*», *ibidem*, pag.13.
- 49 Ramm E., *Heinz Isler - The Priority of Form*, in Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 52, n. 3, 2011, pagg.143-154.
- 50 Hildebrand S., Bergmann E., *Form-Finding, Form-Shaping, Designing Architecture. Experimental, Aesthetical, and Ethical Approaches to Form in Recent and Postwar Architecture - Approcci sperimentali, estetici ed etici alla forma in architettura, dal dopoguerra ad oggi*, in SNSF-International Exploratory Workshop Form-Finding, Form-Shaping, Designing Architecture. Experimental, Aesthetical, and Ethical Approaches to Form in Recent and Postwar Architecture (Mendrisio, 10-11 ottobre 2013), Mendrisio Academy Press - Silvana Editoriale, 2015, pagg.33-47.
- 51 *Ibidem*.
- 52 Musmeci S., *Ponte sul Basento a Potenza*, in L'Industria italiana del cemento, n. 2, 1977, pagg. 77-98 e pagg. 82-83.
- 53 Musmeci S., *Il calcolo elettronico e la creazione di nuove forme strutturali*, in M. Zevi (a cura di), *Il computer nella progettazione, Bulzoni*, Roma, 1972, pagg. 147-166.
- 54 Loos A., *Das Prinzip der Bekleidung*, Vienna, 1898, in Denti G., Peirone S. (a cura di), *Adolf Loos. Opera completa*, Officina, 1997, pag.13.
- 55 Squicciarino (2019), op. cit. (vedi nota 18), pag.119.
- 56 Semper (1860), op. cit. (vedi nota 16), pag.422.
- 57 Semper G., *Über architektonische Symbole*, Berlino-Stuttgart, 1884, pag.295.
- 58 Semper G., *Vergleichende Baulehre*, 1850, pag.196.
- 59 «*kunstwollen*»: termine e concetto introdotti nella critica d'arte dallo storico tedesco A. Riegl. Considerando l'opera d'arte come il risultato di una determinata e consapevole volontà artistica che emerge faticosamente dal fine pratico, dalla materia e dalla tecnica, Riegl sostituisce un'ipotesi teleologica a una concezione puramente meccanica della natura dell'opera d'arte, superando così le posizioni del materialismo e del causalismo storico. Poiché ogni opera d'arte va considerata e giudicata in merito alla raggiunta coerenza espressiva nell'ambito del K. caratteristico dell'epoca in cui è nata, ne consegue in primo luogo il riconoscimento della validità di quelle forme artistiche che si allontanano da una supposta norma classica. Riegl ha formulato esplicitamente il concetto di K. nell'introduzione della sua opera *Die spätrömische Kunstindustrie* (1901). La critica italiana di tendenza idealistica si rifece al K., nell'elaborazione del concetto di 'gusto', accentuandone tuttavia l'elemento irrazionale e intuitivo, www.treccani.it
- 60 Herrmann W., *Gottfried Semper*. Electa, Milano, 1990, pag.100.
- 61 Semper G., *Lo Stile*, Laterza, Bari, 1992, pag.13 e pag.360.
- 62 «*Il en est de l'Architecture comme de tous les autres Arts: se princips sont fondés sur la simple nature*», in Laugier M.A., *Essai sur l'architecture*, Chez Duchesne, 1753, pag.10.
- 63 Simoncini G., *Ritorni al passato nell'architettura francese fra Seicento e primo Ottocento*, Jaca Book, Milano, 2001, pag.184.
- 64 *Ivi*, pag.186.

- 65 de Cordemoy L.G., *Nouveau Traité de toute l'architecture ou l'Art de Bastir, utile aux Entrepreneurs et aux Ouvriers*, Parigi, 1706.
- 66 Milizia F., *Principi di architettura civile*, t.1., Tipografia Remondiniana, Bassano, 1804, pag.30.
- 67 «In tutta l'architettura l'ornamento fondamentale è costituito senza dubbio dalle colonne. Da un lato infatti esse adornano, riunite insieme in un certo numero, portici e muri e ogni tipo di aperture; d'altra parte fanno un effetto piacevole anche isolate, decorando crocicchi, teatri piazze, sostenendo trofei e monumenti commemorativi. La colonna conferisce vaghezza e decoro; e non è facile dare un'idea delle ricchezze che gli antichi profondevano in essa per conferirle la massima eleganza. [...] Le colonne possono avere funzione strutturale, allorché sono impiegate negli edifici; oppure hanno il solo fine di commemorare qualcosa da tramandare ai posteri», in Alberti L.B., Bartoli C., *L'architettura*, Libro VI, Biblioteca Pubblica Bavarese, 1667.
- 68 *Ibidem*.
- 69 Horster M., *Brunelleschi und Alberti in ihrer Stellung zur römischen Antike*, Mitteilungen des kunsthistorischen Institutes in Florenz, XVII, 1973, pagg. 29-63.
- 70 Di Stefano E., *L'altro sapere. Bello, Arte, Immagine in Leon Battista Alberti*, in *Aesthetica Preprint - Supplementa*, n.4, Centro Internazionale Studi di Estetica, 2000, pagg.41-68.
- 71 *Ibidem*.
- 72 «C'è una differenza sostanziale secondoché si intendono erigere colonne o pilastri, e se le aperture debbano essere coperte ad arco o ad architrave. Le aperture ad arco e i pilastri si usano nella costruzione dei teatri; pure nelle basiliche gli archi non sono da ricusarsi; ma nelle fabbriche dei templi più importanti non si trovano che portici ad architrave», in Alberti L.B., Bartoli C., *L'architettura*, Libro II, Biblioteca Pubblica Bavarese, 1667, pag.562. «Per i colonnati ad arco si richiedono colonne a pianta quadrata. Quelle rotonde infatti risultano difettose, per il fatto che il piede dell'arco non poggia interamente sul pieno della sottostante colonna, bensì poggia sul vuoto nella misura in cui la superficie del quadrato supera quella del cerchio in esso inscritto», in Morrolli G., *Le colonne di Alberti tra voluptas e necessitas. Diversità morfologiche ed eziologiche tra columnae rotundae e columnae quadrangulae nelle istituzioni del De re aedificatoria*, in Leon Battista Alberti teorico delle arti, tomo II, pagg.727-786.
- 73 Pane A., *L'antico e le preesistenze tra Umanesimo e Rinascimento. Teorie, personalità ed interventi su architetture e città*, in Casiello S. (a cura di), *Verso una storia del restauro dall'età classica al primo Ottocento*, Alinea, Firenze, 2008, pag.98.
- 74 «je n'aime pas dire colonnes, c'est un mot abîmé», in Le Corbusier (Charles-Edouard Jeanneret), *Vers une Architecture*, Arthaud, Parigi, 1923, pag.150.
- 75 Ugo V., *Laugier e la dimensione teorica dell'architettura*, Dedalo, Bari, 1990, pag.32.
- 76 *Ibidem*.
- 77 Teyssot G., *Mimesis dell'architettura*, saggio introduttivo in De Quincy Q., *Dizionario storico di architettura*, Marsilio, Venezia, 1985, pag.16.
- 78 Mc Clung W.A., *The Architecture of Paradise. Survivals of Eden and Jerusalem* (trad. it. *Dimore celesti. L'Architettura del Paradiso*), Il Mulino, Bologna, 1987, pag.150.
- 79 Lenza C., *Architettura e mimesi*, in *Op.cit.*, Rivista quadrimestrale di selezione della critica d'arte contemporanea, n.72, Edizioni il centro, 1988, pagg.5-18.
- 80 Gubler J., *Viollet-Le-Duc, amoureux des Alpes*, in *Construire*, n.56, Losanna, 1979.
- 81 «la cellula a misura d'uomo è la base», in Le Corbusier (Charles-Edouard Jeanneret), *Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme*, Crès et C., Parigi, 1930.
- 82 *Ibidem*.

- 83 Schittich (2003), op. cit. (vedi nota 15), pagg.10-11.
- 84 *Ibidem*.
- 85 Moretti A., *Muraria Arte*, in Enciclopedia dell'Arte Antica Classica ed Orientale, Poligrafico dello Stato, Roma, 1963.
- 86 Discorso tenuto da Vittorio Gregotti durante la New York Architectural League nell'Ottobre del 1982, pubblicato in Frampton K., *Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*, MIT Press, Cambridge-Massachusetts, pag.27.
- 87 Tavoletta C., *La persistenza del trilitte*, Altralinea edizioni, Firenze, 2016, pagg.25-37.
- 88 Heidegger M., Gajani S., *Costruire, Abitare, Pensare*, Ogni Uomo è Tutti Gli Uomini, 2017.
- 89 Loos A., *Ornamento e Delitto*, Adelphi, Milano, 1972.
- 90 Frampton K., De Benedetti M., *Tettonica e architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, Skira, Milano, 2005.
- 91 Acocella A., *L'architettura di pietra. Antini e nuovi magisteri costruttivi*, Alinea, Firenze, 2004, pag.45.
- 92 *Ivi*, pag.49.
- 93 Nigro L., *Ritorno a Gerico. Scavare tra archeologia e leggenda*, in Archeo, n.31, De Agostini Periodici, pagg.24-45.
- 94 Giuffré A., *Le tipologie murarie classiche*, in *Lecture sulla Meccanica delle Murature Storiche*, Edizioni Kappa, Roma, 1991, pag.84.
- 95 Acocella (2004), op. cit. (vedi nota 91), pag.58.
- 96 Martin R., *Architettura*, in Charbonneau J., Martin R., Villard F., *La Grecia arcaica*, Rizzoli, Milano, 1978.
- 97 Vitruvio M.P., *De architectura*, Libro II, capitolo VIII.
- 98 Plinio C.S., *Historia naturale di C. Plinio Secondo. Nuovamente tradotta di latino in volgare toscano per Antonio Brucioli*, Libro Trigésimoquinto, capitolo XIV - De muri formacei, et mattoni, et ragione loro, pag.1002 (MII).
- 99 Vitruvio, op. cit (vedi nota 97), Libro I, cap. V e Libro II, cap. VIII.
- 100 Zevi L., *Il Manuale del Restauro Architettonico*, Sez.C., Manco-su Editore, Roma, 2008.
- 101 Vitruvio M.P., Martini F.d.G., Biffi M., *La traduzione del De architectura di Vitruvio*, Scuola normale superiore, 2002, pag.610.
- 102 Lugli G., *La tecnica edilizia Romana con particolare riguardo a Roma e Lazio*, Roma, 1957, pagg.390-401.
- 103 Ventriglia U., *La geologia della città di Roma*, Bardi, Roma, 1971, pagg.206-224.
- 104 Esposito D., *Tecniche costruttive murarie medievali. Murature 'a tufelli' in area romana. Storia della tecnica edilizia e restauro dei monumenti*, L'Erma, Roma, 1998, pag.85.
- 105 Acocella (2004), op. cit. (vedi nota 91), pag.69.
- 106 Lauter H., *Materiale e tecnica*, in *L'architettura dell'ellenismo*, Longanesi, Milano, 1999, pag.59.
- 107 «gradina»: arnese d'acciaio per lavorare la pietra, a foggia di scalpello a più denti che possono essere piatti o a punta. Il suo uso è preceduto dall'impiego della subbia e seguito da quello dello scalpello e delle lime che ne cancellano le tracce, in www.treccani.it.
- 108 Martin R., *Ginouves R., Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine*, tomo I, Ecole Française de Rome, Parigi, 1997, pag.105.
- 109 Acocella (2004), op. cit. (vedi nota 91), pag.72.
- 110 Algarotti F., *Opere del conte Algarotti. Edizione novissima*, tomo VIII, Carlo Palese, Venezia, 1823, pagg.258-259.
- 111 «Bugne»: *bugnato, bozze, è ogni protuberanza nella superficie de' muri. Quest'uso nelle fabbriche può essere provenuto dalle primitive costruzioni fatte di tronchi d'albero: tronchi sopra tronchi fanno un bugnato. [...] I Greci osservatori della convenienza furono sobri nel bugnato. Non si vede che nel basamento della Lanterna di Demostene, in quella parte ch'è di pietrame, e non nel resto ch'è di marmo. I*

- Romani ne furono più generosi, ma lo impiegarono opportunamente nelle grandi masse di sodezza, come nel mausoleo di Cecilia Metella, nel foro di Nerva, nell'Anfiteatro di Verona, nella Maison Ruarrée de Nimes: ma non lo unirono mai con le colonne. [...] É assurdo nelle colonne. La colonna vi comparirebbe un ammasso di tronchi di diverso modulo», in Milizia F., *Opere complete di Francesco Milizia riguardanti le belle arti*, tomo II, Stamperia Cardinali e Frulli, Bologna, 1827, pag.175.*
- 112 Burckhardt J., Ghelardi M., *L'arte italiana del Rinascimento*, Saggi Marsilio, 1995.
- 113 Focillon H.J., *Le forme nella materia*, in *Vita delle forme*, Torino, Einaudi, 1990, pag.134.
- 114 Lauter H., *Fortificazioni della città*, in *L'architettura dell'Ellenismo*, Longanesi, Milano, 1999, pag.71.
- 115 Vitruvio M.P., Orsini B., *Dell'Architettura di M. Vitruvio Pollio*, tomo II, Torchi di Carlo Baudel, Perugia, 1802, pag.207.
- 116 Aula S., *Compendio delle antichità romane*, parte II, Tipografia dell'Aquila di Vincenzo Puzziello, Napoli, 1845, pag.250.
- 117 Adam J.P., *Roman Building: Materials and Techniques*, Routledge, Londra, 1994, pag.347.
- 118 Acocella A., *Mattoni quadrati di Roma*, in *Stile Laterizio II*, Media MD, 2013, pagg.50-55.
- 119 Forte M., *La villa di Livia. Un percorso di ricerca di archeologia virtuale*, L'Erma di Bretschneider, Roma, 2007, pag.155.
- 120 Vives V.R., Bodoni G., *Saggi sul ristabilimento dell'antica arte de' greci e romani pittori*, tomo I, Stamperia Reale, Parma, 1787, pag.76.
- 121 Fabiani F., Paribeni E. (a cura di), *Archeologia a Massa. Scavi all'ombra di Mercurio*, Edizioni nuova cultura, Roma, 2016, pag.80.
- 122 Acocella A., *Il primato della tegola da tetto e Artefatti laterizi e percorsi d'acqua*, in *Stile Laterizio II*, Media MD, 2013, pagg.22-40.
- 123 Bahadori M.N., *Il "condizionamento" dell'aria nell'architettura iraniana*, in *Le Scienze*, n.116, Aprile 1978, pagg.96-106.
- 124 Gallo C., *Architettura bioclimatica. Il raffrescamento passivo: stato dell'arte*, in *Protecta*, n.96, *Speciale Casambiente & Sicurezza*, 2009, pagg.33-36.
- 125 Bahadori (1978), op. cit. (vedi nota 123), pag.99.
- 126 *Ibidem*.
- 127 De Cesaris A., *Il progetto del suolo-sottosuolo*, Collana del Dipartimento di Architettura e Progetto, Gangemi Editore, Roma, 2015, pag.106.
- 128 Scamozzi V., Ticozzi S., Masieri L., *L'idea dell'architettura universale*, Volume I, Libro III, Coi tipi di Borroni e Scotti successori a Vincenzo Ferrario, Milano, 1838.
- 129 Palladio A., *Elementi di Architettura*, A spese Remondini, Bassano, 1803, pag.25.
- 130 «Bolo»: *dal greco bolos, zolla, è una particolare terra rossa, ricca di ferro, calcari marnosi, presente sul fondo delle lame. Era mischiato con grassello di calce per formare una malta dalle discrete qualità leganti. Grazie alle sue qualità di tenuta all'acqua veniva impiegato per l'impermeabilizzazione delle cisterne dei trulli pugliesi.*
- 131 Herzog T., Krippner R. (2005), op. cit. (vedi nota 4), pag.10.
- 132 *Ibidem*.
- 133 «On applique le nom de façade aujourd'hui à toute ordonnance d'architecture donnant sur les dehors, sur la voie publique, sur une cour, sur un jardin. Mais ce n'est que depuis le xvie siècle, en France, que l'on a élevé des façades comme on dresserait une décoration devant un édifice, sans trop se soucier du plus ou moins de rapports de ce placage avec les dispositions intérieures. Les anciens, non plus que les architectes du moyen âge, ne savaient ce que c'était qu'une façade dressée avec la seule pensée de plaire aux yeux des passants. Les faces extérieures des bons monuments

- de l'antiquité ou du moyen âge ne sont que l'expression des dispositions intérieures. Pour les églises, par exemple, les façades principales, celles qui sont opposées au chevet, ne sont autre chose que la section transversale des nefs», in Le-Duc V., *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, Tomo V, «Façade», Édition Bance — Morel, 1854-1868, pag.359.*
- 134 Gallo N., *Appunti sui castelli della Lunigiana*, Volume 3, All'insegna del giglio, Firenze, 2004, pag.67.
- 135 Garofalo I., *Le Stavkirker norvegesi. Un'architettura, una tecnica*, Arti Grafiche Saturnia, Trento, 1992.
- 136 Benedetti C., Bacigalupi V., *Legno e architettura. Il futuro della tradizione*, Kappa.Roma, 1991.
- 137 Brogiolo G.P., Cagnana A., *Archeologia dell'architettura. Metodi e interpretazioni*, All'insegna del giglio, Firenze, 2012, pag.73.
- 138 Mariano J. detto il Taccola, *Liber Tertius de ingeneis ac aedificitiis non usitatis*, 1427-1433, in Beck J.H. (a cura di), *Il Polifilo*, Milano, 1969.
- 139 Per quanto concerne l'architettura romana, dall'analisi del *De Architectura* di Vitruvio (Libro 4, capitolo 2) si può dedurre che, a seconda della luce da coprire, si facesse uso di due tipi di strutture: in edifici di dimensioni ridotte si ricorreva ad una serie di travi semplicemente appoggiate sui sostegni verticali (*columnen et cantherii*) mentre, nel caso di ambienti più ampi, si ricorreva ai *transtra cum capreoli*. L'interpretazione di quest'ultima espressione è controversa, ma pare si trattasse di vere e proprie capriate sulla cui forma, tuttavia, si confrontano opinioni discordanti. Un esempio chiarificatore potrebbe essere considerato il portico antistante il Pantheon, il cui tetto fu ampiamente documentato nel XVII secolo. Se si ammette che tale costruzione fosse ancora quella originale si avrebbe una testimonianza dell'uso di una combinazione tra capriata «a monaco e saette» e palladiana in epoca classica. In Valeriani S., *Monaci, dardi e colonnelli. Genesi e caratteristiche delle capriate italiane*, Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz, 2005.
- 140 Barbisan U., Laner F., *Capriate e tetti in legno. Progetto e recupero*, Franco Angeli, Milano, 2000, pag.19.
- 141 Palladio A., *Elementi di architettura*, A spese Remondini, Bassano, 1803, pag. 29.
- 142 Le ragioni della pratica dello spoglio e del reimpiego del materiale antico in epoca medievale avevano origine da motivazioni di ordine economico, più che mai pertinenti al caso delle strutture murarie; ma potevano avere anche motivi simbolici o politici, come nel caso d'immagini o pezzi antichi rappresentativi di particolari valori attinenti alla vita civica o al prestigio di una casata o di una determinata entità politica (comune o papato): tutto questo col fine di rimarcare un atto di presa di potere o, mediante una reinterpretazione del soggetto dell'opera antica, con la volontà d'inserirlo in una nuova cultura o sensibilità o entro le esigenze di un nuovo credo, come nel caso dell'*interpretatio christiana* di numerose statue pagane 'trasformate' in immagini di santi, in Esposito D., *Tecniche costruttive murarie medievali. Murature 'a tufelli' in area romana*, "L'Erma" di Bretschneider, Roma, 1998.
- 143 Moscati S., *Enciclopedia archeologica: mondo dell'archeologia*, Volume 2, Istituto della enciclopedia italiana, 2002, pag.152.
- 144 Esposito D., *Tecniche costruttive murarie medievali. Murature 'a tufelli' in area romana*, "L'Erma" di Bretschneider, Roma, 1998, pagg.33-37.
- 145 Brogiolo G.P., *Edilizia residenziale tra V e VIII secolo*, Seminario sul Tardoantico e

- l'Altomedioevo in Italia Centro-settentrionale (Monte Barro - Galbiate, 2-4 settembre 1993), Mantova, 1994.
- 146 Bonelli R., Bozzoni C., Pardo V.F., *Storia dell'architettura medievale. L'Occidente Europeo*, Laterza, Bari, 2009.
- 147 della Mirandola G.P., Agnolucci P., *Oratio de hominis dignitate. Discorso sulla dignità dell'uomo*, DigitalSoul, 2018.
- 148 Herzog T., Krippner R. (2005), op. cit. (vedi nota 4), pag.13.
- 149 De Vecchi P., Cherchiarì E., *I tempi dell'arte*, Volume 2, Bompiani, Milano, 1999.
- 150 Nifosì G., *Arte in Opera. Dal Rinascimento al Manierismo*, Volume 3, Laterza, Bari, 2016.
- 151 Acocella (2004), op. cit. (vedi nota 91), pagg.80-93.
- 152 *Ibidem*.
- 153 De Fusco R., *Trattato di architettura*, Altralinea Edizioni, Firenze, 2018, pag.184.
- 154 «*In a city the street must be supreme. It is the first institution of the city. The street is a room by agreement, a community room, the walls of which belong to the donors, dedicated to the city for common use. Its ceiling is the sky. Today, streets are disinterested movements not at all belonging to the houses that front them. So you have no streets. You have roads, but you have no streets*», in Kahn L., *Drawing for City/2 Exhibition: The street is a Room*, 1971 © The Museum of Modern Art, New York.
- 155 Argan G.C., *Storia dell'arte italiana: da Michelangiolo al Futurismo*, Volume 3, Sansoni, 1988, pag.331.
- 156 *Ibidem*.
- 157 Delsante I., *Innovazione tecnologica e architettura*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2007, pagg.114-115.
- 158 Benevolo L., *Storia dell'architettura del Rinascimento*, Laterza, Roma-Bari, 1968.
- 159 Locci M., *Gian Lorenzo Bernini. Scena retorica per l'immaginario urbano*, Testo&Immagine, 1998, pag.54.
- 160 «Laissez-faire»: espressione francesca «lasciar fare», attribuita all'economista e ministro del commercio francese J.C.M. Vincent de Gournay (1712-1759), che riassume il principio secondo il quale lo Stato non deve imporre alcun vincolo all'attività economica, allo scopo di affermare il postulato della libertà individuale. Sulla base della convinzione che l'interesse personale, se libero di agire, conduca l'individuo a inserirsi nell'ordine naturale e a ricercarvi ciò che è vantaggioso per lui e per la collettività, essa è divenuta un simbolo del liberismo economico, in www.treccani.it.
- 161 Bonfanti E., Biraghi M., Sabatino M., *Nuovo e moderno in architettura*, Mondadori, Milano, 2001, pag.78.
- 162 Taine H., *Philosophie de l'art*, Volume I, Hachette, Parigi, 1881, pagg.61-62.
- 163 Bonfanti E., Biraghi M., Sabatino M. (2001), op. cit. (vedi nota 161), pag.51.
- 164 Petrucci A., *Industrializzazione dell'edilizia*, Dedalo, Bari, 1980, pag.34.
- 165 Choay F., *La città. Utopie e realtà*, Einaudi, Torino, 2000, pagg.6-81.
- 166 Nazzari G.B., *Introduzione al futurismo*, Guida, Napoli, 1984, pag.79.
- 167 La tassa sui mattoni fu proposta per la prima volta da Lord George Lyttelton nel 1756. La proposta fu percepita come parziale poiché parti della Gran Bretagna usavano principalmente la pietra per la costruzione e anche ingiusta poiché la tassa non si applicava ai ricchi poiché le loro case erano costruite quasi esclusivamente in pietra. L'imposta sui mattoni veniva riscossa sui mattoni prima della combustione. Per poter esaminare se un mattone fosse stato tassato, lo stampo avrebbe avuto la parola "excise" ("accisa") su di esso che avrebbe lasciato un'impronta sul mattone.
- 168 Petrucci A. (1980), op. cit. (vedi nota 164), pag.12.
- 169 De Tommasi G., Fatiguso F., *L'e-*

- dilizia a struttura mista dei primi del '900: procedure e interventi per la conservazione e manutenzione*, Adda Editore, Bari, 2008.
- 170 Breymann G.A., *Trattato generale di costruzioni civili con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose guida all'insegnamento ed allo studio di Breymann G.A.: Costruzioni metalliche (costruzioni in ferro)*, Volume 3, Antica casa editrice Dottor Francesco Vallardi, Milano, Torino, Napoli, Firenze, Roma, Bologna, Palermo, Catania, 1853.
- 171 Zevi L. (2008), op. cit. (vedi nota 100), pag.76.
- 172 Petrignani A. (1980), op. cit. (vedi nota 164), pag.34.
- 173 Galano L., Betti M., *Elementi di Statica delle costruzioni storiche in muratura*, Esculapio, Bologna, 2019, pag.335.
- 174 Il ferro fucinato era di produzione abbastanza semplice, essendo sufficiente decarburare il prodotto di fusione con l'insufflazione di aria con mantici; attraverso tale processo, attuato con un grande dispendio di uomini che si avvicendavano nella fonderia, si ottenevano pani del peso max. di circa 45 kg, di qualità comunque sufficientemente affidabile per resistere a sollecitazioni di flessione, torsione e taglio, come tiranti, chiodi, catene e collegamenti. Ciononostante il ferro presentava gli stessi difetti di disomogeneità della ghisa di fusione, in Zevi L. (2008), op. cit. (vedi nota 100), pag.27.
- 175 Beccu M., *Il rapporto mutevole tra struttura e involucro. Evoluzione del tema della facciata contemporanea*, in Beccu M., Spartaco P., *L'involucro architettonico contemporaneo tra linguaggio e costruzione*, Tipografia Ceccarelli, Grotte di Castro, 2008, pag.15.
- 176 «carbon coke»: *chiamato anche "coke" è un carbone artificiale ottenuto da processi di raffinazione del litantrace, una tipologia di carbone fossile povero di sostanze bituminose e minerali, con un contenuto di carbonio compreso tra il 74 ed il 93%. Il pioniere dell'industria siderurgica Abraham Darby (Sedgley, 14 aprile 1678 – Coalbrookdale, 8 marzo 1717) fu il primo di una dinastia di fonditori ad ottenere la ghisa da minerali di ferro utilizzando il carbon coke. Suo nipote, Abraham Darby III, sarà il principale sottoscrittore nella realizzazione dell'Iron Bridge sul fiume Severn, il primo ponte in ghisa ideato da Thomas Farnolls Pritchard.*
- 177 Zevi L. (2008), op. cit. (vedi nota 100), pag.B27.
- 178 Petrignani A. (1980), op. cit. (vedi nota 164), pag.41.
- 179 «manutenzione»: *per molti secoli il concetto di manutenzione si è identificato con il complesso degli interventi d'emergenza mirati alla riparazione di guasti sopraggiunti. Tale opinione si è estesamente tradotta in una episodica attenzione alle problematiche connesse alla gestione strutturata dei beni immobiliari, siano essi parti di grandi patrimoni o piccole proprietà. Nell'ultimo decennio si è avuta una significativa evoluzione delle modalità di rapportarsi alle problematiche gestionali e manutentive dettata da vari fattori: 1) lo sviluppo di norme con funzione esplicativa nel campo della manutenzione edilizia; 2) la maturata consapevolezza da parte di proprietari ed investitori che una corretta manutenzione comporta un incremento del valore del bene immobile, 3) la necessità di recepire norme comunitarie riguardanti anche le problematiche gestionali e manutentive, 4) l'allargamento del mercato immobiliare e la conseguente necessità di confrontarsi con operatori più evoluti, 5) la necessità di confrontarsi con situazioni pregresse di degrado sulle quali non si hanno informazioni storiche che permettano di definire opportuni interventi. Si deduce la evidente convinzione che l'intervento manutentivo deve avere quale unico obietti-*

vo quello di garantire all'immobile uno standard accettabile. Quest'ultimo può essere interpretato in maniera differente a seconda che debba soddisfare le esigenze del committente, dell'utente, di una qualsivoglia struttura esterna con il compito di garantire un livello qualitativo minimo o della società nel suo complesso od in alcune sue parti. La International Standard Organization (ISO) definisce la manutenzione come il complesso di operazioni in atto per migliorare, ripristinare o ricondurre in servizio ciascuna parte dell'edificio e dei suoi impianti ad un livello standard correntemente accettato, e per mantenere il servizio ed il valore dello stesso. Il concetto di manutenzione è dunque riconducibile a quello di standard manutentivo inteso come livello di affidabilità di un componente o di un sistema di componenti. In quest'ottica negli anni '60 è stato proposto, per ciascun componente edilizio, l'individuazione di un limite qualitativo superiore, vigente al momento della realizzazione del fabbricato e denominato upper criteria, e di uno inferiore denominato lower criteria verso il quale il livello di prestazionalità tende a causa della crescente probabilità di guasto che implica maggiori costi di riparazione e disagi nel suo regolare utilizzo. Tale modello è fortemente discutibile in quanto ipotizza un improbabile processo di uniformità dell'obsolescenza e si basa sulla inverosimile analogia tra prodotto industriale ed edile. Pertanto, molto più efficace appare il modello proposto nei "Proceedings of Seminar on management, maintenance and modernisation of housing" di Varsavia nel quale si ammette la variabilità degli standard qualitativi entro un valore minimo ed uno ottimale, ambedue rappresentati mediante curve ascendenti in analogia al progressivo innalzamento della domanda di standard qualitativi, in Pagliuca

A., Lezione "La manutenzione in Edilizia" del Corso di Tecnologie per il Recupero dell'Architettura, Università degli Studi della Basilicata.

180 «manutenibilità»: il concetto di "manutenibilità" è collegato alla necessità che le attività rivolte alla conservazione in efficienza del bene o del singolo componente debbano poter essere svolte in modo efficiente e con risultato efficace. L' A.I.Man. (Associazione Italiana di Manutenzione) nel 1987 ha definito la manutenibilità come requisito qualitativo dei componenti e dei sistemi (impianti) "sinonimo di rapidità ed agevolezza nel portare a termine le operazioni di manutenzione intraprese a scopo preventivo e/o correttivo". La norma UNI 8290 definisce la manutenibilità come la possibilità di conformità a condizioni prestabilite entro un dato periodo di tempo in cui è compiuta l'azione manutentiva. Secondo questa nuova visione possiamo distinguere due diverse tipologie di manutenibilità: 1) manutenibilità intrinseca o ideale (MI), ovvero la probabilità che un guasto possa essere riparato in un tempo prefissato, disponendo di tutte le risorse necessarie non appena si verifica il malfunzionamento; 2) manutenibilità operativa o reale (MO), ovvero la probabilità che un guasto possa essere riparato in un tempo prefissato, tenendo in conto anche eventuali intemperatività di origine organizzativa e logistica. Manutenibilità e manutenzione sono due grandezze inversamente proporzionali: quanto più elevata è la manutenibilità del prodotto, tanto meno onerosi sono gli interventi manutentivi, in Pagliuca A., Lezione "La manutenzione in Edilizia" del Corso di Tecnologie per il Recupero dell'Architettura, Università degli Studi della Basilicata.

181 Pagliuca A., Lezione "Le strutture miste" del Corso di Tecnologie per il Recupero dell'Architettura, Università degli Studi

- della Basilicata.
- 182 Beccu M. (2008), op. cit (vedi nota 175), pag.19.
- 183 *Ibidem*.
- 184 Nastri M., *Involucro e architettura*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna (Rimini), 2008, pag.12.
- 185 Gayle M., Gayle C., *Cast-Iron Architecture in America: The Significance of James Bogardus*, W.W. Norton, New York, 1998.
- 186 Giedion S., *Spazio, Tempo ed Architettura*, Hoepli, Milano, 1989.
- 187 Holtz D.R., *Caissons in Chicago*, School of Civil Engineering, Purdue University, Indiana, 1975, pagg.19-23.
- 188 Giedion S. (1989), op. cit (vedi nota 186), pag.361.
- 189 Romanelli F., Scapaccino E., *Dalla finestra al curtain wall. Ricerche sulle tecnologie del discontinuo*, Officina Edizioni, Roma, 1979, pag.76.
- 190 Cascella P., *Facciate ventilate. Elementi di architettura*, Brianza Plastica, 2019, pag.59.
- 191 Romanelli F., Scapaccino E. (1979), op. cit. (vedi nota 189), pag.81.
- 192 Salvati M., *L'acciaio nelle costruzioni moderne*, Dedalo, Bari, 1980, pag.99.
- 193 Sinopoli N., Tatano V., *Sulle tracce dell'innovazione. Tra tecniche e architettura*, FrancoAngeli, Milano, 2016, pag.148.
- 194 Frampton K. (2008), op. cit. (vedi nota 12), pagg.277-278.
- 195 *Ivi*, pag.126.
- 196 Romanelli F., Scapaccino E. (1979), op. cit. (vedi nota 189), pag.202.
- 197 Nastri M. (2008), op. cit. (vedi nota 184), pag.13.
- 198 «*ridge and furrow*»: è una particolare tipologia di copertura ideata da Joseph Paxton per la realizzazione delle sue serre in ferro e vetro. Il sistema, adottato anche per la costruzione della copertura del Palazzo di Cristallo, è costituito da un modulo di copertura a più falde poggiate su delle travi tralicciate poggiate sulle colonne in ghisa. Le colonne verso il lato esterno sono cave e presentano un'anima in piombo per il convogliamento delle acque meteoriche raccolte lungo le grondaie posizionate all'intersezione di una falda e l'altra. Le grondaie che, nel caso del Crystal Palace sono ancora realizzate in legno, presentano sul lato interno delle scanalature per evitare il fenomeno di condensa sulle superfici trasparenti della copertura.
- 199 Gropius E., *Razionalizzazione nella economia edile*, in Quadrante, n.24, Edizioni del Milione, Milano, 1935, pag.13.
- 200 «*Involucro a secco*»: si riferisce ad un sistema tecnologico ad alta reversibilità, assemblabili a secco senza l'impiego di leganti idraulici, collanti e sigillanti. Si tratta, quindi, di un sistema che impiega elementi costruttivi prefabbricati industrialmente che in fase di costruzione richiedono una tipologia di giunzione meccanica (viti, ancoraggi, incastri, etc.). Numerosi sono i vantaggi derivanti dall'impiego di questo sistema, quali la velocità di realizzazione, minore manodopera, facilità di costruzione, assemblabilità e disassemblabilità, riduzione dei costi, minore produzione degli scarti, maggiore riciclabilità, etc.
- 201 Bottoni P., *La standardizzazione dell'abitazione collettiva*, in Quadrante, n.29, Edizioni del Milione, Milano, 1936, pag.23.
- 202 «*Plan libre*»: la "pianta libera" è uno dei cinque punti (pilotis, tetto-giardino, facciata libera, finestra a nastro) alla base del nuovo modo di concepire lo spazio architettonico secondo *Vers une Architecture* di Le Corbusier (1923).
- 203 Spiegel H., *Der Stahlhausbau, Wohnbauten aus Stahl* - Leipzig, Alwin Fröhlich Verlag, 1928.
- 204 Spadolini P., *Design e tecnologia. Un approccio progettuale alla edilizia industrializzata*, Edizioni Luigi Parma, Bologna, 1974, pag.28.
- 205 Gropius W., *Architettura integrata*, in *Architettura integrata*, Il Saggiatore, Milano, 1963,

- pag.103.
- 206 Hartmann K., Bollerey F., *200 Jahre Architektur*, Delft, 1987, pag.244.
- 207 Gropius W. (1963), op. cit. (vedi nota 205).
- 208 *Ibidem*.
- 209 *Ibidem*.
- 210 *Ibidem*.
- 211 Pagano G., *L'estetica delle costruzioni in acciaio*, in Casabella, nn.68-69, pagg.66-69.
- 212 *Ibidem*.
- 213 Pagano G., *Catalogo della VII Triennale di Milano*, 1940, pag.15.
- 214 Bosoni G., *Design italiano. New York: The Museum of Modern*, Ed. 5 Continents Editions, Milano, 2008. pag.24.
- 215 Lecce C., *Franco Albini e il progetto dell'effimero (1936-1958): le fonti d'archivio come tracce dell'evoluzione di un metodo*, in A/I/S/Design: storie e ricerche, Milano.
- 216 Ciocca G., *Costruiamo le case come macchine*, in Domus, n.135, Editoriale Domus, Milano, 1939, pag.13.
- 217 *Ibidem*.
- 218 Baciocchi M., *La casa isotermica*, in Domus, n.73, Editoriale Domus, Milano, 1934, pag.58.
- 219 *Ivi*, pag.62.
- 220 *Ibidem*.
- 221 *Ibidem*.
- 222 Peters N., *Prouvé*, Taschen, Colonia, 2007.
- 223 *Ibidem*.
- 224 Prouvé J., Stoullig C., *Jean Prouvé*, Musée de l'école de Nancy, Musée des beaux-arts, 2012, pag.26.
- 225 Beaudouin E., Lods M., Bodian-sky, *La maison du Peuple à Clichy*, in L'Ossature métallique, n.6, 1939.
- 226 Cohen J-L., *Architecture du front populaire*, in Le mouvement social, n.146, Janvier-mars, 1989, pag.6.
- 227 Bauer C., Occelli M., Toulhier B., *Maison du Peuple de Clichy*, Fichier international de Do.Co. Mo,Mo., 2018.
- 228 «Effetto venturi»: si verifica quando un fluido incompressibile (es. aria) che attraversa a portata costante una strozzatura, subisce un aumento di velocità e una diminuzione proporzionale di pressione. Tale proprietà fu scoperta nell'800 dal fisico italiano Giovanni Battista Venturi, durante alcune ricerche a riguardo della meccanica dei fluidi ed è ancora oggi utilizzato come uno dei più comuni metodi di misura della velocità (tubo di Venturi).
- 229 «Effetto camino»: è quel fenomeno per cui un fluido (es. aria) più caldo e meno denso, sale verso l'alto. Maggiore è la differenza di temperatura, più veloce sarà il movimento del fluido.
- 230 Pagliuca A., Gallo D., Trausi P.P., *Il riuso dei materiali bellici in architettura*. Le Pierced Steel Plank, in Cascone S.M., Margani G., Sapienza V. (a cura di), *Nuovi orizzonti per l'architettura sostenibile*, Atti di convegno Colloqui.AT.e Catania 2020, EdicomEdizioni, Catania, 2020, pagg.201-210.
- 231 Bonta J.P., Scalvini M.L., *Architettura: interpretazione e sistemi espressivi*, Dedalo, Bari, 1981, pagg.33-36.
- 232 Frampton K. (2008), op. cit. (vedi nota 12), pagg.91-92.
- 233 Tentori F., De Simone R., *Le Corbusier*, Laterza, 1987.
- 234 Aymonino C. (a cura di), *L'abitazione razionale. Atti dei Congressi CIAM*, Marsilio, Padova, 1971.
- 235 Frampton K. (2008), op. cit. (vedi nota 12), pagg.91-92.
- 236 Masoero A., Miracco R., Poli F., *L'estetica della macchina. Da Balla al futurismo torinese*, Mazzotta, 2004, pag.30.
- 237 Sant'Elia A., *L'Architettura futurista*, Direzione del Movimento Futurista, Milano, 1914.
- 238 *Ibidem*.
- 239 *Ibidem*.
- 240 Cohen J.L., *The future of architecture since 1889. A worldwide history*, Phaidon, Vienna, 2016.
- 241 Ferrari L., *Angelo Invernizzi: un costruttore, il suo tempo e il dopo*, S. Martino Buon Albergo, 2007.
- 242 Invernizzi A., Fagioli E., *Villa*

- Girasole in Marcellise (Verona)*, in Piacentini M. (a cura di). Architettura, Rivista del Sindacato Nazionale Fascista Architetti, fascicolo I, S.A. Fratelli Treves Editori, Milano-Roma, 1936, pagg.1-10.
- 243 *Ibidem*.
- 244 *Ibidem*.
- 245 *Ibidem*.
- 246 Minucci G., *Tecnologie e Ricerche. I metalli leggeri nell'architettura. L'alluminio*, in Piacentini M. (a cura di). Architettura, Rivista del Sindacato Nazionale Fascista Architetti, S.A. Fratelli Treves Editori, Milano-Roma, 1932, pagg.39-40.
- 247 Pagliuca A., *Materiali Made in Italy. Avanguardia Italiana nell'industria delle costruzioni del primo '900*, Gangemi Editore, Roma, 2019, pagg.247-248.
- 248 *Ibidem*.
- 249 Rivista Domus, n.60, 1932, pagg.104-109.
- 250 Bisi L., *La casa girevole, Villa "Il Girasole" a Marcellise*, Verona, in Lotus, n.40, 1935.
- 251 Poggi C.A., *Architettura futurista*, Vallecchi, Firenze, 1933.
- 252 Nervi P.L., *Una casa girevole*, in Quadrante, n.13, Mondiano, Milano, 1934.
- 253 Bertolazzi A., Segala I., *La poetica della macchina. Villa Girasole a Marcellise*, in Open4. Dalla carta al BIT, esposizione curata dall'Ordine degli Ingegneri di Verona e Provincia, Verona, 2015.
- 254 Petrignani A. (1980), op. cit. (vedi nota 164), pag.54.
- 255 Haegermann G., Huberti G., Mòli H., *Vom Caementum zum Spannbeton*, volume 1, Bauverlag, Berlino, 1964.
- 256 Il sistema Hyatt, dal nome del suo sperimentatore, l'avvocato americano Thaddeus Hyatt, fu il risultato di alcuni esperimenti volti proprio a verificare la qualità del conglomerato cementizio come strato protettivo ignifugo. In un lavoro a carattere privato stampato nel 1877, *An account of some experiments with Portland-cement-concrete combined with iron as a building material with reference to economy of construction and for security against fire, in the making of roofs, floors and walking surfaces*, Hyatt evidenzia l'efficacia della collaborazione tra acciaio e calcestruzzo alle alte temperature e suggerisce l'impiego di profili piani e di tondini al posto dei profilati ad "L", aprendo così la strada alla concezione delle moderne barre ad aderenza migliorata, superando la mera funzione di protezione dal fuoco espressa dal calcestruzzo e delineando le modalità di attribuzione dei singoli materiali alle specifiche funzioni: il ferro per riprendere le sollecitazioni di trazione, il conglomerato per garantire la resistenza agli sforzi di compressione.
- 257 Zevi L. (2008), op. cit. (vedi nota 100), pag.C53.
- 258 Frampton K. (2005), op. cit. (vedi nota 90).
- 259 Bruschi G., Faccio P., Maffei S.P., Scaramuzza P., *Il calcestruzzo nelle architetture di Carlo Scarpa. Forme, alterazioni, interventi*, Editrice compositori, Bologna, pagg.20-21.
- 260 Kind-Barkauskas F., Polònyi S., Kauhsen B., Brandt J., *Atlante del Cemento*, Utet, Torino, 2004.
- 261 Gottfried A., *Quaderni del Manuale di progettazione edilizia: le strutture*, Hoepli, Milano, 2003, pag.217.
- 262 Ghersi A., *Il cemento armato. Le basi della progettazione strutturale esposte in maniera semplice ma rigorosa*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2020, pag.88.
- 263 Tuttavia Robert Maillart non fu il solo ad avere questa idea. In modo del tutto indipendente negli Stati Uniti, già dal 1905, Claude Allen Porter Turner (1869-1955) stava facendo sperimentazioni con "colonne a fungo". Il sistema di solaio a fungo ideato da Turner risultava armato lungo quattro direttrici: le due longitudinale e trasversale e le due diagonali. Egli lo utilizzò per la prima volta nel 1906 per la costruzione di due edifi-

- ci: il Johnson Bovey Building a Minneapolis e per il Marshall Building a Milwaukee, Wisconsin.
- 264 Gherzi A. (2020), op. cit. (vedi nota 262), pag.91.
- 265 Capurso G., Martire F., *L'ingegneria Made in Italy alla conquista del Mondo?*, in Iori T., Poretti S. (a cura di), *SIXXI/5. Storia dell'ingegneria strutturale in Italia*, Gangemi, Roma, 2011, pagg.96-98.
- 266 Poretti S., *Nervi che visse tre volte*, in Iori T., Poretti S. (a cura di), *Pier Luigi Nervi. L'ambasciata d'Italia a Brasilia*, Electa, Milano, 2008.
- 267 Iori T., *Il Sistema Nervi*, in Bianchino G., Costi D. (a cura di) *Cantiere Nervi. La costruzione di una identità. Storie, geografie, paralleli*, Quaderni dello CSAC, Skira, Parma, 2012, pagg.51-54.
- 268 *Ibidem*.
- 269 Gherzi A. (2020), op. cit. (vedi nota 262), pagg.92-93.
- 270 Concialdi S., *Architettura digitale = nuova architettura?*, in Greco A., Quagliarini E. (a cura di) *L'involucro edilizio. Una progettazione complessa*, Ar.Tec - Associazione Scientifica per la Promozione dei Rapporti tra Architettura e Tecniche dell'Edilizia, Alinea Editrice, Firenze, 2007, pag.771.
- 271 Pagliuca A., Pelosi M., *Le Bubboli per alleggerire le volte in laterizio e gli esempi di. Matera*, in ANANKE, n.77, 2016, pagg.141-144.
- 272 Del Francia M., *Opere da salvare: architetture livornesi di Vittorio Giorgini*, in *Architetture Livorno*, n.2, Edizioni ETS, Pisa, 2006, pag.62.
- 273 Boesiger W., *Le Corbusier - Œuvre complète 1938-1946*, Birkhäuser Basel, Bâle, 1995, pag.113.
- 274 Eskilson S., *The Age of Glass. A Cultural History of Glass in Modern and Contemporary Architecture*, Bloomsbury Publishing, 2018.
- 275 Nota manoscritta da Le Corbusier indirizzata a Pierre Jeanne-
ret nell'Ottobre 1928 durante il viaggio a Mosca: «*Pierre , revoir tout le système fenêtres. On pourrait éventuellement tout vitrer et chauffer entre deux. Consulter G. Lyon et laboratoire. Etudier 1 chauffage à eau chaude p. bureaux [et] chauffage à air chaud par double cloison vitrée pour empêcher le froid*», Archivio Centrale del XX secolo, Dossier 327 lfa 1/3.
- 276 Lyon G., *L'Acoustique*, pagg.56-60 e Le Corbusier, «*Pour chauffer et pour ventiler la salle*» e «*Pour éclairer la salle*», *Une Maison - Un Palais. A la recherche d'une unité architecturale*, Grès, Parigi, 1928.
- 277 Benton T., *Pessac and Lège revisited: standards, dimensions and failures*, in *Annuaire d'études corbusiennes*, Volume 3, Massilia, 2004, pagg. 91-96.
- 278 Bosman J., Oechslin W., *Le Corbusier. Und die Schweiz, Dokumente einer schwierigen, Beziehung*, 1987.
- 279 Von Busse H-B., Waubke N.V., Grimme R., Mertins J., *Atlante delle Terrazze*, Utet, Torino, 1999.
- 280 «*Cartone catramato*»: *La carta catramata viene prodotta impregnando di catrame carta o fibra di vetro, producendo un materiale impermeabile utile per la costruzione del tetto . La carta catramata si distingue dal feltro per tetti, che è impregnato di asfalto anziché di catrame, ma questi due prodotti sono usati allo stesso modo e i loro nomi sono talvolta usati informalmente come sinonimi. La carta catramata è molto meno comune della carta in feltro per asfalto e viene utilizzata, tra le altre cose, per l'impermeabilizzazione dei tetti per impedire l'ingresso di umidità. Viene utilizzato in una piccola percentuale di tetti costruiti, come sottofondo con asfalto, legno, e tegole, o anche ghiaia, poiché la stessa carta catramata non è particolarmente resistente al vento o al sole. Può essere installato in diversi modi, come graffette o chiodi*

per tetti, ma a volte viene anche applicato in più strati con asfalto caldo, asfalto freddo (adesivo) o adesivi non asfaltici.

- 281 «Beton brut»: *Il termine béton brut fu inventato da Le Corbusier per definire il suo particolare utilizzo del cemento a vista, che prevedeva un'accurata scelta di tecnologie e materiali componenti e una cura in fase di cantiere simile a quella riservata a una scultura o a un quadro.*
- 282 Pagliuca A. (2019), op. cit. (vedi nota 247).
- 283 Heidegger M., Vattimo G. (a cura di), *Costruire abitare pensare*, Laterza, Bari, 1976, pagg.107-108.
- 284 De Carlo G., *Il risultato di un concorso*, in Casabella, n.231, Settembre, 1959.
- 285 Rossi, V., *Orientamenti per l'edilizia: elementi prefabbricati*, in Atti della Società degli ingegneri e degli architetti - Rassegna Tecnica, n. 5, pagg. 179-209.
- 286 Ferrazza G., *Il problema del costruire nell'Impero*, in Rassegna di architettura, IX, 1937, pagg.19-22.
- 287 Apollonio F., Zagnoni S., Gresleri G., *Architettura nelle colonie italiane in Africa*, Collana Rassegna, Compositori Editore, 1992.
- 288 Casabella Costruzioni, n.123, Marzo, 1938.
- 289 Citazione di una minuta tra gli architetti Del Debbio, Ponti e Vaccaro sulla costruzione di Addis Abeba italiana, indirizzata a Benito Mussolini, rapporto in data 7 Dicembre 1936, in Apollonio F., Zagnoni S., Gresleri G., *Architettura nelle colonie italiane in Africa*, Collana Rassegna, Compositori Editore, 1992, pag.27.
- 290 Astrua G., *Manuale completo del capomastro assistente edile*, Hoepli, Milano, ristampa 2006, pag.89.
- 291 Locandina pubblicitaria "Celotex - legname isolante", in Domus, n.53, Maggio, 1932, pag.103.
- 292 Griffini E., *Costruzione Razionale della Casa*, Hoepli, Milano, 1952, pagg.73-74.
- 293 Pagliuca A. (2019), op. cit. (vedi nota 247), pagg.629-631.
- 294 Piacentini M. *Architettura d'Oggi*, Paolo Cremonese Editore, Roma, 1930.
- 295 *Ibidem*.
- 296 Dal Falco F., *Stili del razionalismo. Anatomia di quattordici opere di architettura*, Gangemi Editore, Roma, 2016.
- 297 Poretti S., *La facciata del Palazzo delle Poste di Napoli e la questione dei rivestimenti lapidei nell'architettura italiana degli anni trenta*, in Architettura e Costruzione, nn.84-85, pagg.27-37.
- 298 Vitellozzi A., *Il nuovo Palazzo postale di Napoli*, in Edilizia Moderna, n. 23, Milano, 1936, pagg.1-9.
- 299 Vaccaro G., *Edificio per le Poste e Telegrafi di Napoli*, in Architettura. Rivista del Sindacato Nazionale Fascista Architetti, n.8, fascicolo VIII, Milano, 1936, pagg. 353-391.
- 300 *Ibidem*.
- 301 Vitellozzi A. (1936), op. cit. (vedi nota 298), pagg.1-9.
- 302 Griffini E., *La Costruzione Razionale della Casa*, IV Edizione, Hoepli, Milano, 1948.
- 303 Zorzi L., *Intonachi, pavimenti, rivestimenti nella moderna edilizia*, Edizioni Tecniche Utilitarie, Bologna, 1935, pag.167.
- 304 Poretti, op. cit. (vedi nota 297).
- 305 Bucci F., Mulazzani M., *Luigi Moretti. Opere e scritti*, Electa, Milano, 2000, pag.12.
- 306 Bertolazzi A., *Modernismi litici. Il rivestimento in pietra nell'Architettura Moderna*, FrancoAngeli, Milano, 2015.
- 307 Kind-Barkauskas F., Polònyi S., Kauhse B., Brandt J. (2004), op. cit. (vedi nota 260), pag.37.
- 308 Lucchini A., *Le pareti ventilate*, collana Manuali dell'Edilizia, Il Sole 24 Ore, 2000.
- 309 «Gerberette»: *il termine prende il nome dall'ingegnere Heinrich Gerber, che nel XIX secolo utilizzò questo principio strutturale per costruire i ponti. Si tratta di un sistema mobile a sbalzo destinato a garantire la stabili-*

tà complessiva di una struttura stabilendo una giunzione tra colonna e trave. Nel Centre Georges-Pompidou per progettare in facciata una serie di mensole senza l'ausilio di supporti intermedi, l'agenzia Ove Arup & Partners ha impiegato il sistema gerberette. La struttura è progettata secondo i vincoli che ad essa si applicano: a livello di attacco della trave è sottile, mentre a livello dei montanti periferici, dove i momenti sono più forti la gerberette è spessa, infine viene affinato a livello dei tiranti dove il carico viene prelevato in tensione.

- 310 Beccu M. (2008), op. cit (vedi nota 175), pag.32.
- 311 *Ivi*, pag.40.
- 312 *Ibidem*.
- 313 *Ibidem*.
- 314 Gasparini K, *Schermi urbani. Tecnologia e innovazione. Nuovi sistemi per le facciate mediatiche*, Wolters Kluwer Italia, Milano-fiori Assago, 2012.
- 315 Venturi R., Brown S., *Architecture as Signs and Systems: for a Mannerist Time*, Belknap Press, Cambridge, 2004, pag.24.

02

02 Il sistema involucro: connettivo tra forme costruttive tradizionali ed innovative strategie di sviluppo prestazionale e sostenibile

Sinòpsi Secondo l'anamnesi storico-tecnica condotta nel primo capitolo, l'introduzione di materiali industriali e di processi di evoluzione culturale e sociale hanno determinato la trasformazione delle murature da componente massivo portante a parte perimetrale dell'involucro edilizio, dando vita alla progressiva scomposizione delle funzioni in parte portanti, in parte di "pelle" protettiva, di sistema filtro in grado di ottimizzare le interazioni tra ambiente interno-esterno. Nella contemporaneità è improbabile che strutture omogenee costituite principalmente da un solo materiale soddisfino le esigenze di isolamento termico, così i progettisti sono chiamati - attraverso una progettazione integrata - ad adattare con precisione il profilo prestazionale dell'involucro per soddisfare determinati requisiti. Rendere modificabili strati o gusci consente alle proprietà dell'involucro edilizio di adattarsi alle condizioni esterne che cambiano periodicamente. Si sviluppa, quindi, una gerarchia definita degli strati e degli involucri costituenti la pelle dell'organismo edilizio. «Gli *strati* rappresentano parti di un'unità strutturale principale, come ad esempio lamine e rivestimenti, strati di ventilazione, strati isolanti, strati di intonaco, membrane, etc. Gli *involucri*, invece, sono in parte o del tutto autonomi dal punto di vista spaziale e/o strutturale. Un involucro può essere formato da più strati, ad esempio: pelle esterna o interna di facciate doppie, elementi costruttivi separati da strati d'aria o da isolanti con funzione non portante»¹. Dagli anni '50 del Novecento ad oggi, il sistema edilizio dell'involucro e di facciata è mutata notevolmente: dalle prime sperimentazioni di Le Corbusier la parete perimetrale si è liberata formalmente dalle fatiche strutturali dotandosi di innovazioni delle componentistiche dell'industria e dei nuovi materiali e integrando complessi sistemi impiantistici in grado di accumulare energia con un sensibile aumento del benessere indoor e una di-

minuzione dei consumi energetici. La produzione tecnologica degli ultimi anni ha favorito un processo evolutivo del concetto di involucro creando architetture innovative dal punto di vista formale ed energetico. Ciò ha dato nuovo impulso alla ricerca di soluzioni alternative per l'involucro tanto a livello progettuale quanto a livello produttivo. La sperimentazione di soluzioni stratificate e isolate, infatti, ha trovato un fertile terreno: alle chiusure monolitiche con o senza isolamento termico ed acustico, si sono progressivamente affiancate soluzioni 'a secco' con telai metallici o in legno, pannelli isolanti ad alte prestazioni e numerose altre tecnologie. All'involucro opaco si sono affiancate diverse tipologie: l'*involucro trasparente*; l'*involucro misto* e l'*involucro adattivo*. Tra le numerose istanze e campi di sviluppo, la ricerca approfondisce la tematica dell'involucro edilizio dinamico o adattivo (*innovative building envelope*) mediante l'applicazione dei biopolimeri, un settore in continua espansione, soprattutto nell'industria delle costruzioni. La ricerca intende indagare le potenzialità di applicazione dei materiali biocompositi prodotti a partire da materie di scarto e fonti rinnovabili, in grado di garantire un processo di dismissione biodegradabile. L'obiettivo è promuovere - attraverso la sinergia tra architettura e biologia - nuovi materiali naturali per il sistema involucro che possano limitare l'utilizzo dei polimeri sintetico-artificiali o comunque, tutti quei materiali altamente inquinanti per l'ambiente e che richiedono un elevato apporto di materia ed energia nell'intero ciclo di vita. Materiali che all'attualità sono ancora allo stadio di prototipazione, ma che costituiscono le fondamenta per una nuova pratica di progettazione integrata e sostenibile in architettura ed in innumerevoli settori penalizzati dall'impiego di risorse non rinnovabili e inquinanti e da processi tradizionali ormai obsoleti.

1. Zavarchitects, Abvarzan office building, Tehran, 2013, © Zavarchitects.



2

2.1. L'involucro di edifici complessi: tecnologie innovative e criticità nel progetto contemporaneo

Il sistema involucro

L'involucro ha subito negli ultimi centocinquanta anni una revisione che ha delineato un nuovo orizzonte sia sul piano della composizione architettonica, sia sul piano delle tecniche e delle tecnologie adottate. Un lento processo evolutivo che consente oggi di affermare l'involucro *non come un mero insieme di strati e materiali combinati tra loro per fornire determinate prestazioni ma inteso, concepito e sviluppato come una composizione di elementi, funzionalmente differenti e/o complementari, sinergicamente collaboranti tra loro al fine di dare luogo ad un efficiente sistema di divisione tra due ambienti*².

I principali compiti cui deve assolvere l'involucro sono:

- separazione fisica tra ambiente interno ed esterno;
- mantenimento e regolazione del comfort termico;
- mantenimento e regolazione del comfort acustico;
- mantenimento e regolazione del comfort luminoso;
- contenimento del fabbisogno energetico;
- integrazione di impianti, schermature, etc.;
- durabilità e propensione alla manutenzione;
- sostenibilità³.

L'elenco dei requisiti dell'involucro inteso come *sistema tecnologico* (UNI 7867)⁴ è definito nella classificazione delle unità tecnologiche e degli elementi che lo compongono

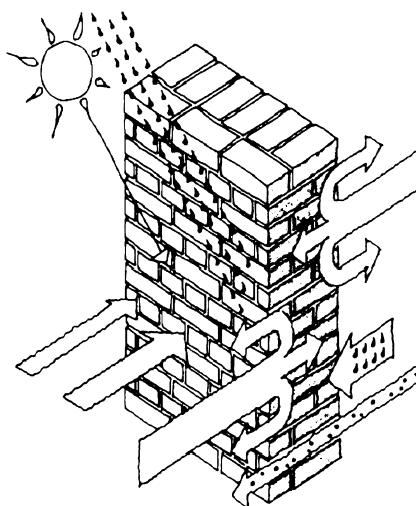
2. Facciata in costruzione della Domino Redevelopment's progettata nel 2020 dallo studio di architettura PAU - Practice for Architecture and Urbanism, New York, © Andrew Campbell Nelson.

contenuti nella norma UNI 8290. Tra le unità tecnologiche è annoverata quella di “*Chiusura verticale*”, intesa come «*unità tecnologica che separa verticalmente l'interno dell'edificio dall'esterno. La separazione serve a ottenere le condizioni necessarie allo svolgimento delle attività umane all'interno dell'edificio attraverso la regolazione dei flussi di materia e di energia. Infatti i flussi luminosi, termici e sonori e dell'aria attraversano la chiusura in modo tale da rendere lo scambio con l'esterno controllabile*»⁵ (fig.3).

Secondo l'anamnesi storico-technica condotta nel primo capitolo della presente ricerca, l'introduzione di materiali industriali e di processi di evoluzione culturale e sociale ha determinato la trasformazione delle chiusure verticali da componente portante dell'edificio a parte perimetrale dell'involucro edilizio, dando vita alla progressiva scomposizione delle funzioni in parte portanti, in parte di “pelle” protettiva e di sistema filtro in grado di ottimizzare le interazioni tra ambiente interno-esterno dell'organismo edilizio.

Le tipologie e soluzioni di involucro appartenenti a questo primo periodo di protoindustrializzazione, sono:

- il sistema stratificato ‘a secco’;
- la facciata continua o curtain wall, in conformità alla norma UNI EN 13119 del 2016⁶.



3. La separazione dall'ambiente esterno garantita dalla chiusura verticale esterna contribuisce a produrre il microclima interno attraverso la regolazione dei flussi di materia ed energia (scambio termico, scambio dell'aria, irraggiamento solare, flussi di umidità, flussi luminosi, flussi sonori, etc.)

Successivamente l'involucro è divenuto sempre più una superficie in grado di variare le prestazioni intrinseche al mutare delle condizioni ambientali esterne e delle esigenze indoor degli utenti. Inoltre, non bisogna elidere la centralità dell'involucro nel progetto di architettura che può essere ricondotta a una molteplicità di motivazioni che in buona parte fanno riferimento al rapporto che si instaura tra “l'immagine” trasmessa dall'edificio e la sua “consistenza fisica”, cioè la sua architettura e la materia con la quale esso è costruito. L'evoluzione del sistema può essere rappresentata dalle seguenti tipologie, sviluppatasi a partire dagli inizi del Novecento:

- la facciata a doppia pelle (muro di Trombe-Michel, sistema *aération ponctuelle*, mur *neutralisant* e *respiration exacte*);
- schermatura con *brise-soleil*;
- facciate leggere in lega metallica;
- la parete-tenda (*mur-rideau*).

Il carattere di urgenza nel secondo dopoguerra determinato dalla necessità di restituire nuovi alloggi ha favorito dal punto di vista insediativo un forte aumento della domanda abitativa con l'introduzione della tipologia residenziale plurialloggio. Il carattere ‘quantitativo’ della domanda prevalse su ogni altra istanza progettuale non consentendo difatti alcuna riflessione sui requisiti prestazionali dell'involucro. Solo negli anni '70 a seguito della prima crisi energetica, la collettività prese coscienza della non rinnovabilità delle risorse energetiche primarie dando luogo all'introduzione di una serie di nuovi requisiti nella progettazione degli edifici⁷. Si ha, quindi, un passaggio da una “domanda quantitativa” a una “domanda qualitativa” che spinge piccoli e grandi aziende a migliorare le prestazioni dei materiali e delle componenti edilizie dell'involucro. Il tema del risparmio energetico (in attuazione della Direttiva 2002/91/CE; in Italia armonizzata prima dalla Legge 10/91 e successivamente con l'introduzione del D.Lgs. n. 192/2005 e successivi

aggiornamenti), assume misure più stringenti che implicano un ripensamento delle caratteristiche di isolamento degli edifici di nuova progettazione e un'estesa analisi di quelle appartenenti all'edilizia storica.

Nascono, quindi, i *modelli funzionali*⁸ che definiscono le nuove tipologie, gli impieghi strutturali e funzionali, la complessità morfologica e relazionale e la morfologia degli elementi dell'organismo edilizio (fig.4).

Modelli funzionali - UNI 8290-1:1981

Impiego strutturale	<input type="text" value="parete portante"/>
	<input type="text" value="parete non portante"/>
Complessità morfologica	<input type="text" value="pareti integrate"/>
	<input type="text" value="pareti complesse"/>
	<input type="text" value="pareti semplici"/>
Impiego funzionale	<input type="text" value="parete opaca"/>
	<input type="text" value="parete trasparente"/>
	<input type="text" value="parete doppia"/>
	<input type="text" value="parete isolata"/>
Complessità relazionale	<input type="text" value="parete inserita"/>
	<input type="text" value="parete seminserita"/>
	<input type="text" value="parete a cortina"/>
Morfologia degli elementi	<input type="text" value="a piccoli elementi"/>
	<input type="text" value="a pannelli autoportanti"/>
	<input type="text" value="PPV gettata"/>
	<input type="text" value="a struttura ausiliaria"/>

4

Le tipologie di pareti perimetrali verticali che si sviluppano descrivono come le tecnologie disponibili risolvono le funzioni in rapporto a fenomeni di stabilità, comportamento energetico, tenuta, protezione, attrezzabilità, manutenibilità, etc. e sono:

- pareti a faccia vista;
- pareti a intercapedine;
- pareti termoisolate;
- pareti a isolamento termico distribuito;
- pareti ventilate (UNI 11018:2003);
- pareti captatrici;
- pareti integrate⁹.

La norma elenca buona parte dei requisiti principali attribuibili a ciascun sistema tecnologico, ma ce ne sono alcuni che per la prima volta collimano con le caratteristiche dell'involu-



5

cro come l'inerzia termica, il controllo solare, le dispersioni di calore, le caratteristiche di isolamento termico, il controllo del contenuto energetico, etc. In questo periodo storico, tali requisiti diventano fondamentali nella progettazione di un involucro efficiente e nell'individuazione di adeguate soluzioni tecnologiche. Una nuova dinamicità che ha generato un radicale cambiamento a seguito della crescente sensibilità alle condizioni climatiche: dalla cultura dissipativa si è passati a concepire l'involucro come un dispositivo in grado di sfruttare risorse naturali per produrre energia.

Questa tendenza positiva per la promozione di interventi di rinnovamento si è diffusa particolarmente grazie ai riferimenti normativi, a protocolli di sostenibilità ambientale (ITACA, LEED GBC, CasaClima)¹⁰ e ai provvedimenti di defiscalizzazione sul recupero edilizio e sull'efficientamento energetico. Lo sviluppo di soluzioni tecnologiche e di materiali innovativi, frutto di ricerche sia da parte di produttori che di progettisti ha portato negli ultimi anni alla realizzazione di architetture sempre più complesse e avanzate sia sotto il profilo formale, che tec-

4. I modelli funzionali secondo la norma UNI 8290-1 del 1981.

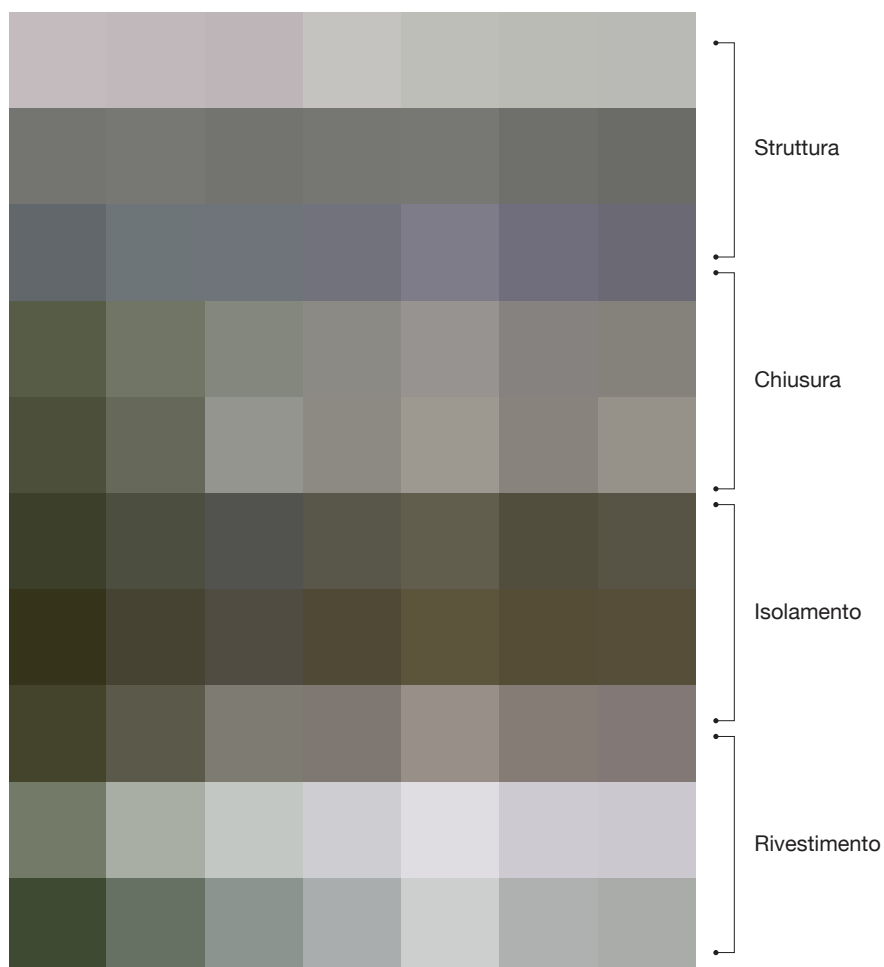
5. Frank O. Gehry, Guggenheim Museum, Bilbao, 1997.

nologico; tutto questo grazie anche allo sviluppo di algoritmi, software e ad un approccio di tipo parametrico in fase di progettazione di ogni singola componente dell'involucro. Ciò ha comportato, di conseguenza, l'introduzione di nuovi materiali di rivestimento e isolamento, talvolta estranei al contesto culturale o sociale in cui andavano a inserirsi (il Museo Guggenheim di Bilbao, di Frank O. Gehry, costituisce un esempio emblematico di realizzazione complessa il cui involucro in lastre di titanio montate sulla sottostruttura metallica ha permesso la diffusione del rivestimento metallico di facciata) (fig.5).

Parallelamente si è andata sviluppando nel panorama architettonico, a seguito del crescente interesse per la progettazione sostenibile¹¹, una sensibilizzazione della domanda fondata sulla qualità e sulle caratteristiche intrinseche delle opere edilizie e architettoniche assecondando la necessità di affrontare

la questione sulla valutazione della sostenibilità degli edifici e della certificazione delle caratteristiche energetiche e prestazionali. Questo ha dato nuovo impulso alla ricerca di soluzioni alternative per l'involucro tanto a livello progettuale quanto a livello produttivo. La sperimentazione di soluzioni stratificate (multilayer) e isolate, infatti, ha trovato un fertile terreno: alle chiusure litiche e di laterizio con o senza isolamento termico ed acustico, si sono progressivamente affiancate soluzioni a secco con telai metallici o in legno, pannelli isolanti ad alte prestazioni e numerose altre tecnologie (fig.6). Gli sforzi progettuali all'inizio del nuovo millennio si sono orientati inizialmente verso una riduzione dei consumi energetici grazie a un incremento delle capacità di coibentazione dell'involucro e in favore di un minor impiego di sistemi impiantistici. Successivamente si è constatato che l'involucro stesso poteva fornire un contributo attivo all'azione di termoregolazione ambientale e al soddisfacimento di numerosi requisiti. Infine, si assiste al tentativo di combinare le due strategie per raggiungere un comportamento energeticamente più sostenibile dell'edificio con appropriate scelte materiche, tipologiche e impiantistiche. In questa alternanza di soluzioni tecnologiche per l'involucro, la principale incognita sulla questione energetica riguarda l'avvento di soluzioni stratificate più o meno complesse di elementi. La questione energetica del sistema involucro si scinde in due principali famiglie: quella basata sull'"iperisolamento", e quella che cerca di sfruttare l'"inerzia termica". «La prima strategia affida la capacità isolante - e quindi indirettamente il contenimento del fabbisogno energetico in funzione delle dispersione - ai valori di "trasmissione termica"¹² raggiungibili mediante chiusure multilayer di limitato spessore, frutto della combinazione e della stratificazione di più prodotti isolanti. La seconda si basa, invece, sulla "capacità termica"¹³ degli elementi massivi che compongono lo spesso strato di muratura»¹⁴.

6. Sperimentazione di soluzioni di involucro stratificate (multilayer) e isolate.



In Italia

3 mln

Immobili in Italia che necessitano di interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria.

In Italia

7 mln

Immobili in Italia realizzati oltre 40 anni fa.

In Italia

45,2 mld

I consumi per il riscaldamento e l'elettricità delle sole unità residenziali, senza considerare gli edifici pubblici (+ 1,4 mld/€)

Questi sistemi trovano oggi applicazione nel settore delle nuove costruzioni e soprattutto nel patrimonio edilizio esistente: secondo i dati diffusi da CRESME¹⁵, solo in Italia vi sono quasi tre milioni di immobili che necessitano di interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, consolidamento, restauro, efficientamento energetico-prestazionale e di miglioramento dei requisiti di comfort e benessere dell'ambiente interno (figg.7-8).

Gli avanzamenti pratici e teorici effettuati mediante interventi concreti volti alla sostenibilità, al miglioramento delle prestazioni, delle esigenze e dell'immagine architettonica sono riconoscibili, da un lato nel campo dell'efficienza energetica e prestazionale, in relazione alla riduzione dei consumi e al ricorso di fonte rinnovabili di energia; dall'altro nel campo dei materiali, in termini di carico energetico, di potenziale im-

piegato per il riuso e riciclo, e di gestione al momento della dismissione. In questo contesto si inserisce la ricerca che, partendo da un attento stato dell'arte di materiali e tecnologie costruttive di applicazione del sistema "a secco" per l'involucro edilizio trova nella successiva fase, la sperimentazione e la brevettazione di un pannello termoisolante in fibra biopolimerica a base di caseina da applicare per l'isolamento termico ed acustico del patrimonio edilizio storico e di nuova costruzione.

Con il deposito brevettuale, il nuovo materiale si inserisce nel più recente settore di sviluppo del sistema involucro-isolamento all'interno di un panorama designato dal processo di transizione ecologica e dallo sviluppo di virtuosi modelli e processi di edilizia circolare. Inoltre, la sperimentazione del materiale biopolimerico e lo sviluppo di relativi modelli costruttivi, si inseriscono all'interno del concetto di Material Ecology, nuova frontiera di sviluppo per la prototipazione di materiali biopolimerici da applicare in edilizia, in modo particolare per la realizzazione di involucri sostenibili a parità di caratteristiche prestazionali.

La ricerca tripartita nell'analisi dello stato dell'arte del sistema involucro, nella fase sperimentale per lo sviluppo di un pannello termoisolante di derivazione biopolimerica e nella relativa brevettazione, si pone come punto di partenza per la successiva fase di prototipazione del campione e per la fase di applicazione (con l'ausilio di aziende del settore e con l'industria delle costruzioni) del campione su casi reali, per una accurata validazione e definizione di strategie di intervento ecocompatibili e sostenibili.

7. Centro Ricerche Economiche Sociali di Mercato per l'Edilizia e il Territorio. Il 60% del patrimonio edilizio esistente italiano, equivalente a oltre sette milioni di edifici, è stato realizzato più di quaranta anni fa. Questa percentuale cresce fino al 70% per le città capoluogo e fino al 76% per le grandi città metropolitane e, secondo i dati rilevati ISTAT e CRESME, si prevede che nei prossimi dieci anni possa arrivare fino all'85%.
8. Efficientamento energetico del patrimonio edilizio esistente.
9. Delimitazione del campo d'indagine e metodologia processuale della ricerca.

Evoluzione del sistema involucro
Evoluzione storico-tecnica del sistema involucro/facciata

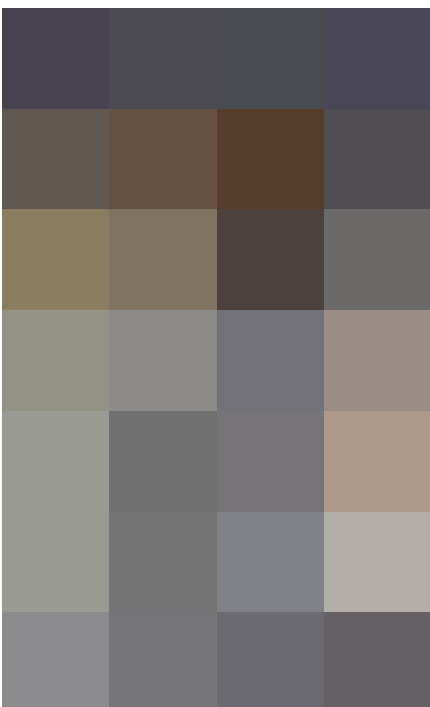
Stato dell'arte
Forme costruttive e materiali tradizionali ed innovativi del sistema involucro oggi

Sperimentazione
Lana isolante a matrice biopolimerica in fibra caseinica applicata per l'isolamento termico e acustico in edilizia

Brevettazione
Deposito del brevetto

Prototipazione e validazione
Partecipazione a bandi nazionali ed europei (per esempio Brevetti+) e validazione del campione su casi reali in collaborazione con aziende del settore.

Architettura & Recupero 4.0.



L'involucro di edifici complessi nella contemporaneità

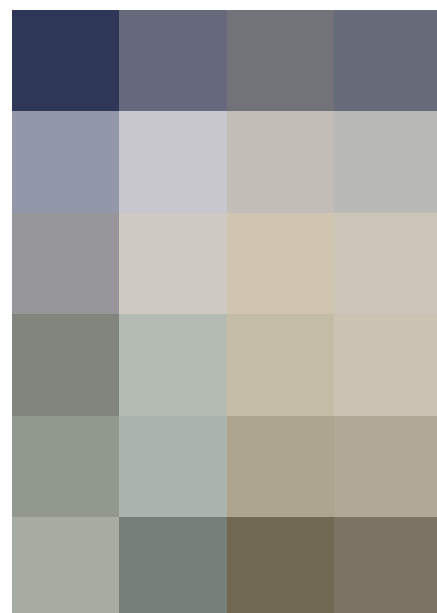
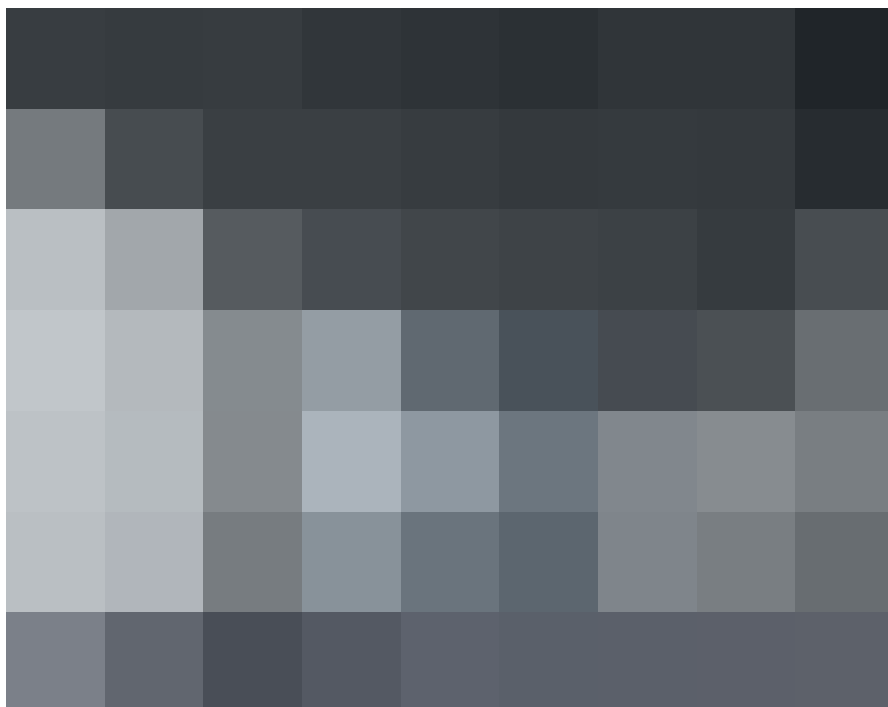
Oggi il tema dell'involucro rappresenta un ambito sperimentale molto complesso e diversificato. Tra gli ambiti di ricerca di involucri con prestazioni sempre più elevate e complesse sono da annoverare le tematiche più importanti:

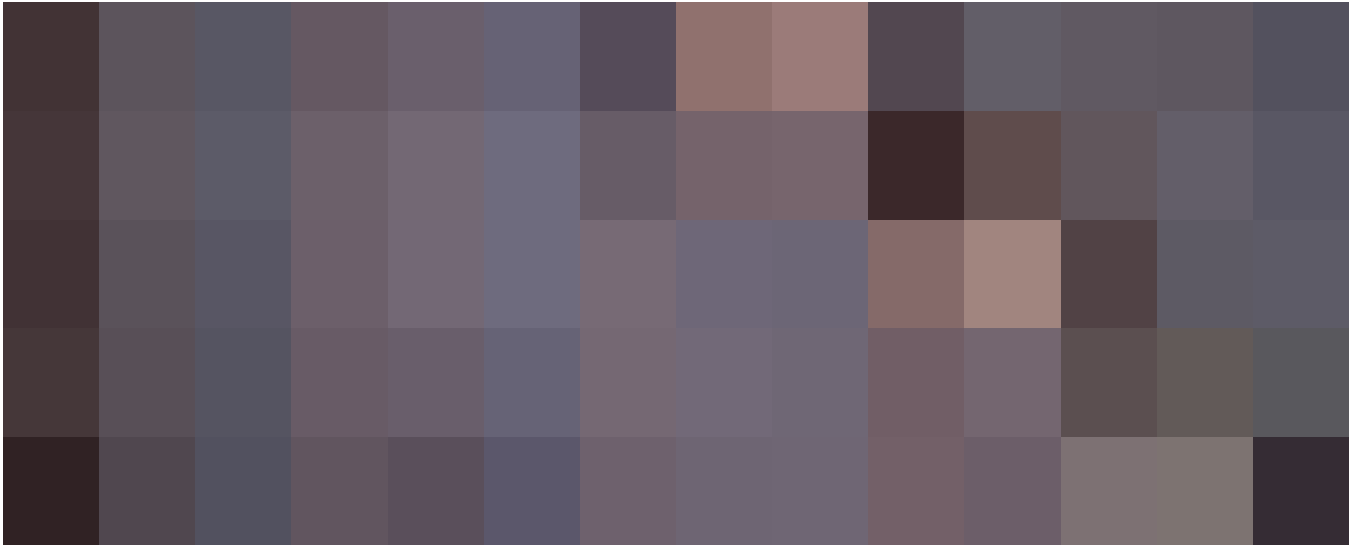
- sistemi multistrato di tipo termoisolato;
- sistemi con strati a ridotto spessore;
- nuove tipologie di vetro e di *coating* nel substrato per una maggiore riflessione o permeabilità verso l'interno/esterno;
- controllo della durabilità e del fabbisogno manutentivo degli strati maggiormente esposti al degrado;
- complessità formale e geometrica del sistema involucro;
- integrazione con servizi tecnologici;
- sicurezza antincendio di tipo prestazionale mediante un nuovo approccio alla prevenzione incendi (*Fire Safety Engineering* - FSE);
- accessibilità, manutenzione e sicurezza del sistema involucro (unità di manutenzione permanente - BMU, piattaforme sospese temporanee - TSP, etc.).

Come già detto la sperimentazione di soluzioni multistrato termoisolate e di sistemi costruttivi con strati a ridotto spessore hanno trovato un fertile terreno. Parallelamente la ricerca di trasparenza e permeabilità ha messo a disposizione nuovi materiali a matrice vetrosa in grado di controllare la quantità di energia termica e luminosa e di modificarne le prestazioni in funzione degli stimoli forniti dal sistema. Per esempio l'involucro adattivo traslucido del Design Hub del Royal Melbourne Institute of Technology progettato dall'architetto Sean Godsell è realizzato con un sistema a doppia pelle con un tamponamento interno in curtain wall (dotato di vetrocamera con cristalli basso emissivi e intercapedine con argon) e una struttura esterna realizzata con anelli in acciaio zincato e dischi di vetro satinato orientabili meccanicamente mediante un sistema elettromeccanico di building management ottimizzando gli apporti termici e luminosi. Inoltre, il sistema d'involucro esterno è stato predisposto non solo per adattarsi alle condizioni meteorologiche, ma anche per seguire l'evoluzione tecnologica e l'integrazione impiantistica: in alternativa ai dischi di vetro, si prevede la possibilità di installare celle fotovoltaiche per incrementare l'autonomia energetica dell'edificio, o sistemi di retroilluminazione per trasformare l'involucro in un superficie multimediale (figg.10-11).

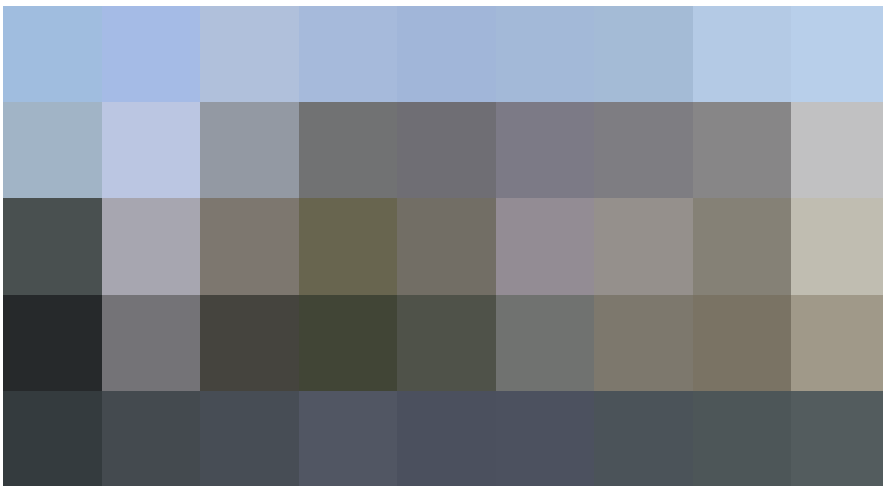
10. Involucro adattivo traslucido del Design Hub del Royal Melbourne Institute of Technology progettato dall'architetto Sean Godsell, © Rory Gardiner / OTTO.

11. Ibidem.





12



13

12. Facciata con sistema Building Integrated PhotoVoltaics - BIPV del City Administration Center a Friburgo, progettato nel 2017 dal gruppo ingenhoven architects, © Fraunhofer ISE.

13. Ibidem.

14. Turbine eoliche in facciata del Chicago Greenway Parking garage, © John Picken.

Questo riferimento rappresenta uno dei tanti esempi della diffusione progressiva del concetto di "adattività", ovvero di un sistema tecnologico in grado di auto-adattarsi al variare delle condizioni ambientali esterne. Un approccio in grado di innescare cambiamenti verso una architettura adattiva, di focalizzare l'attenzione nel legame tra involucro e fonti di energia rinnovabili e di valutare con attenzione l'integrazione impiantistica. Tra i sistemi più diffusi vi sono i "Building Integrated PhotoVoltaics - BIPV" (in grado di convertire la radiazione solare incidente in energia elettrica) (figg.12-13), i collettori solari termici (in grado di convertire la radiazione solare incidente in acqua calda sanitaria), gli impianti di "Solar Cooling" (macchine termodinamiche ad assorbimento) e i sistemi micro e mini eolici (macchine di microgenerazione per singole utenze con scambio in rete) (fig.14).



14

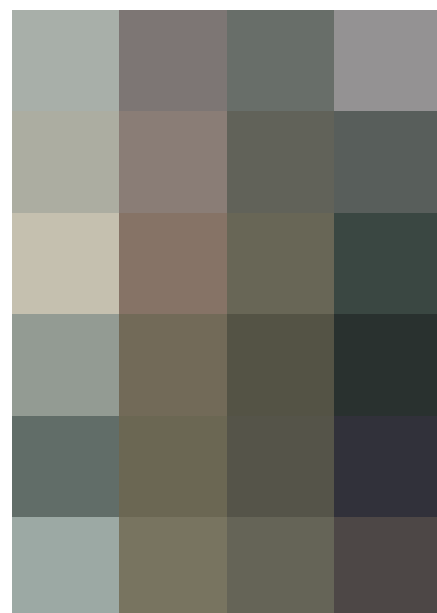
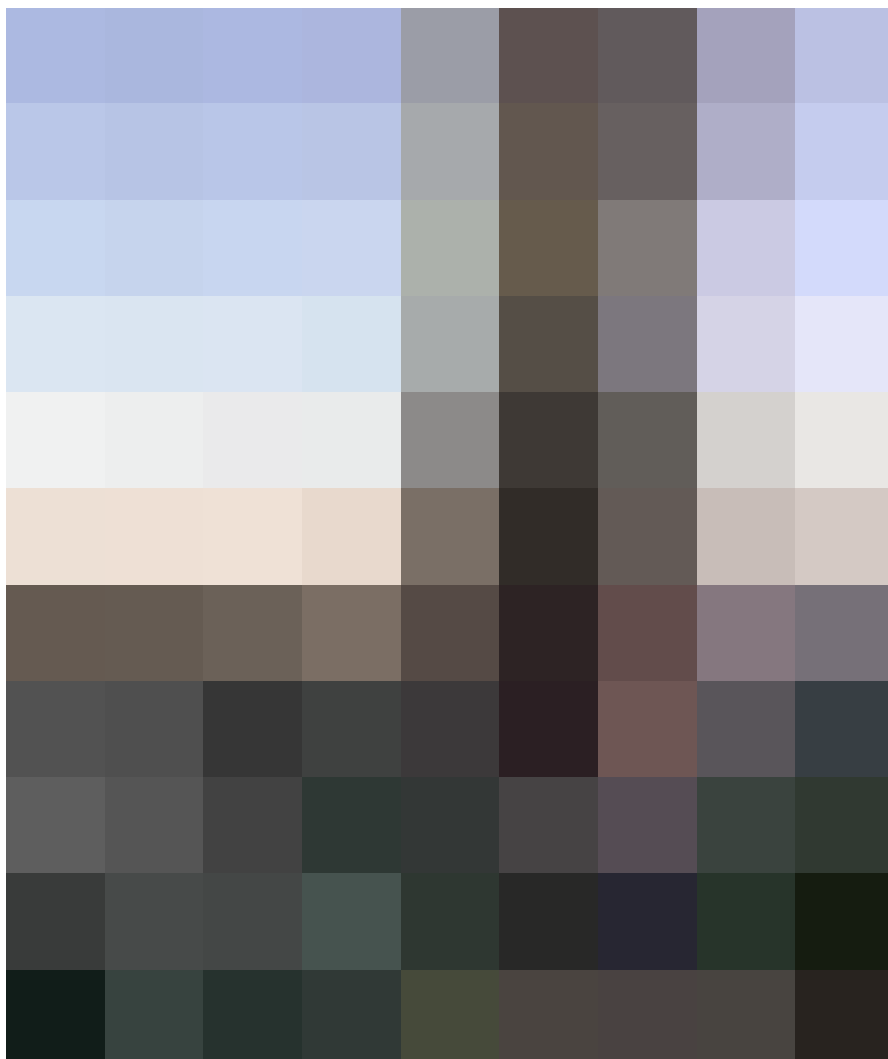
La complessità di questi sistemi di involucro comportano una progettazione in grado di definire in modo preciso le caratteristiche del sistema, individuare e sviluppare i nodi critici, considerare gli aspetti di velocità e facilità di posa in opera, manutenzione e controllo delle prestazioni di involucro e di impianto. L'obiettivo è raggiungere un adeguato soddisfacimento dei requisiti di comfort e garantire la sicurezza e incolumità degli utenti. In merito a quest'ultimo punto, occorre evidenziare come i recenti e drammatici casi di incendio (Grenfell Tower a Londra del 2017 e Torre dei Moro a Milano nel 2021) (figg.15-16) hanno evidenziato come sia imprescindibile il miglioramento delle conoscenze tecniche e delle procedure pratiche nella progettazione di sistemi di involucro per quanto inerente la loro vulnerabilità al fuoco. «Dal momento che negli anni re-

centi lo spessore di isolante termico è più che raddoppiato, nel caso di impiego di materiali combustibili sono inevitabilmente aumentati anche i carichi di incendio. Sono di conseguenza aumentate anche la durata sia del potenziale incendio, sia del suo spegnimento, con un possibile conseguente incremento del rischio di propagazione del fuoco sulle facciate dell'edificio e, in aggiunta, anche verso il suo interno e/o verso costruzioni limitrofe. Un significativo contributo alla efficace modellazione *Fire Safety Engineering* - FSE degli scenari di incendio e al miglioramento della sicurezza delle soluzioni deriva dal crescente numero di test al vero che vengono condotti per valutare il comportamento delle differenti soluzioni di facciata in caso d'incendio, sia per quanto concerne l'utilizzo di differenti materiali, sia per quanto concerne gli effetti dovuti a differenti geometrie e configurazioni delle aperture di facciata»¹⁶.

Un'ultima considerazione riguardo agli involucri di edifici complessi concerne le modalità con la quale accedere, in sicurezza all'involucro per le operazioni di manutenzione, impiegando unità tecnologiche complesse e componenti in grado di consentire un'agevole esecuzione delle operazioni di manutenzione ordinaria e/o straordinaria (controlli, pulizia, riparazioni, sostituzioni, etc.)¹⁷.

15. Incendio della Grenfell Tower a Londra nel 2017.

16. Incendio Torre dei Moro a Milano nel 2021.



2.2. Principi fisici, tipologici e strutturali del sistema involucro

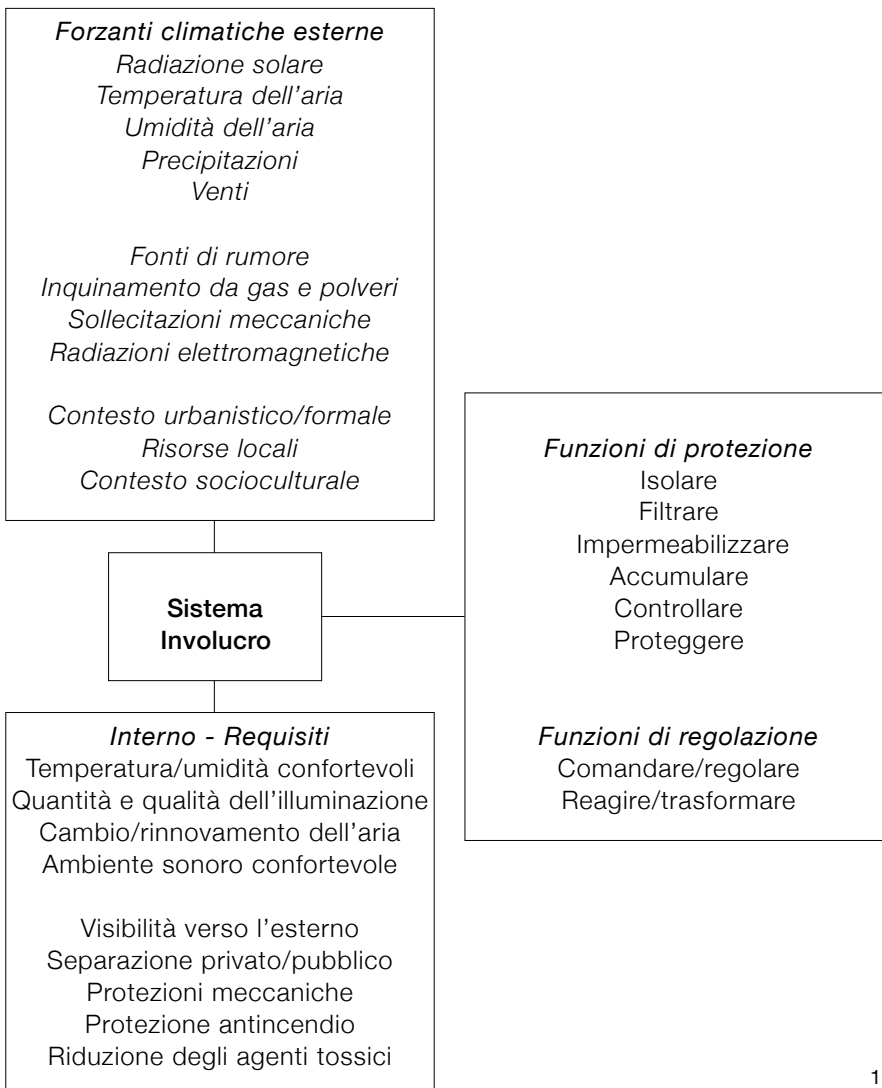
Capacità prestazionale del sistema involucro

L'involucro costituisce lo strato di separazione tra ambiente esterno ed interno, tra la natura e gli ambienti in cui vive l'uomo. L'aspetto primordiale da parte dell'uomo nel cercare riparo e la necessità di raggiungere uno standard abitativo più elevato con il progredire delle risorse tecniche e materiche, sono alla base della progettazione del sistema involucro.

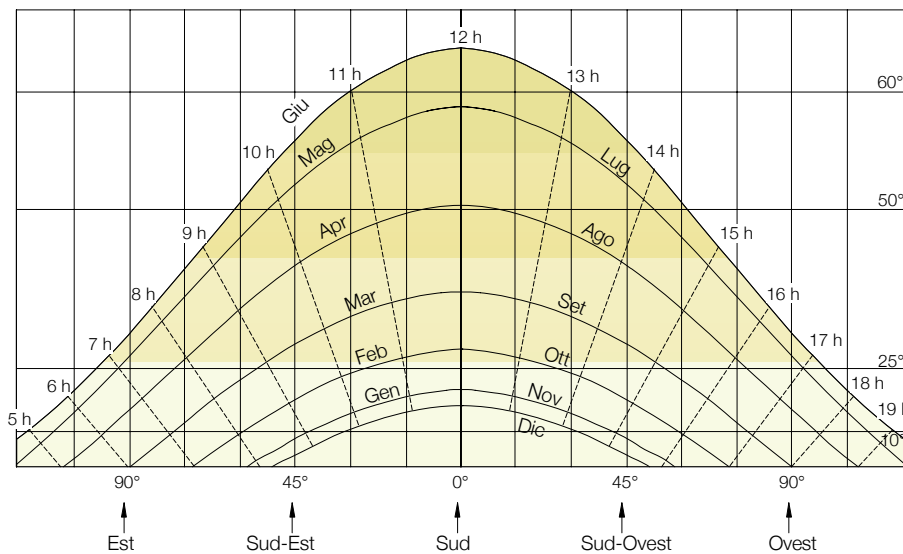
Tali esigenze si possono raggruppare in due macrocategorie:

- *fattori o requisiti esterni del sistema involucro;*
- *fattori o requisiti interni del sistema involucro.*

I fattori esterni sono quelli che non possono essere influenzati dalla progettazione e dipendono dal contesto ambientale, dal clima specifico e dalla presenza di elementi attivi in grado di generare interferenze (per esempio la vicinanza di un'area industriale, la presenza di una strada trafficata, etc.). I fattori interni, invece, vengono individuati preventivamente alla fase di progettazione; essi permettono di stabilire le quantità di energia e di materiali richiesti per la realizzazione del sistema involucro che sono subordinati alla ricerca del benessere abitativo. L'involucro, quindi, viene concepito dall'uomo come una terza pelle (dopo il corpo e gli abiti) suscettibile delle oscillazioni degli stessi fattori ambientali provenienti dall'esterno.

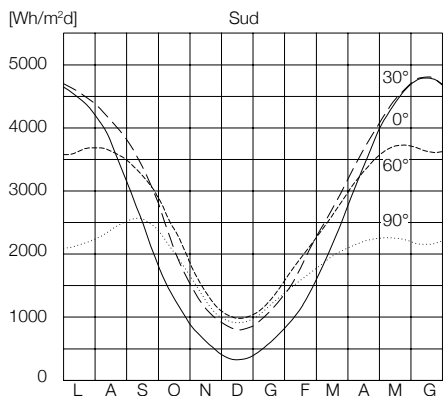


17. Fattori o forzanti climatiche esterne e fattori o requisiti interni del sistema involucro.

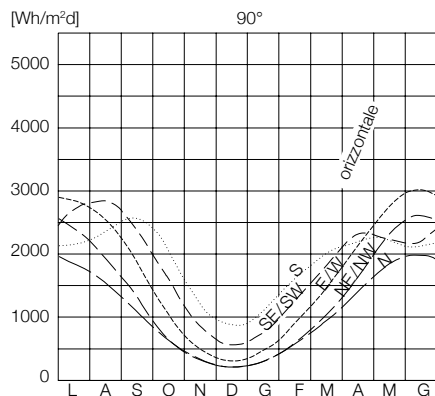


La valutazione della capacità prestazionale del sistema involucro è un aspetto imprescindibile in fase di progettazione se si vuole limitare al massimo la necessità di introdurre nuovi impianti per la climatizzazione ed il riscaldamento degli ambienti interni. Per tale motivo è essenziale un attento studio dei principi fondamentali della fisica da applicare nella progettazione del sistema involucro. Per esempio è possibile rendere "attivo" un elemento costruttivo sfruttando il principio dell'accumulo temporaneo di energia dell'involucro opaco (inerzia termica) o limitare l'aumento del gradiente termico mediante evaporazione o ventilazione naturale attraverso appositi sistemi di intercapedine o aperture praticati nel sistema involucro. Inoltre, si può trasformare la radiazione termica - così come in modo analogo l'energia del vento e dalla risorsa idrica derivante dalle precipitazioni - in risorse cumulabili per rendere più efficienti determinati ambiti impiantistici in apposizione al sistema involucro. Così operando gli impianti tecnici vengono integrati direttamente in facciata (*facciate installate*) o incorporata in determinati punti (*facciata decentralizzata*).

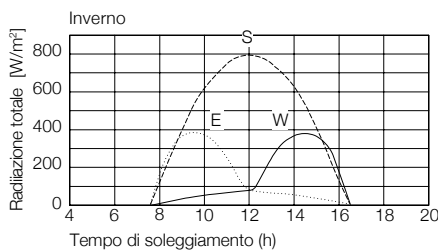
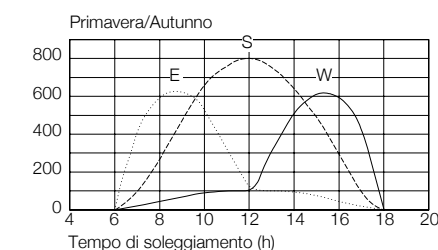
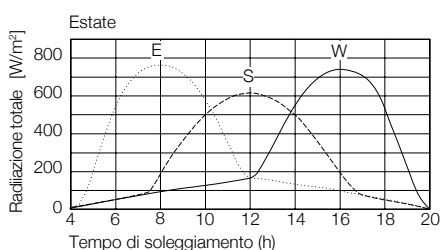
18



19



20



21

- 18. Diagramma del percorso del sole (latitudine 50°N).
- 19. Radiazione per superfici esposte a sud con incidenza diversa.
- 20. Radiazione per superfici verticali con orientamento geografico diverso.
- 21. Radiazione totale per chiusure verticali a orientamento diverso nei giorni solari nelle varie stagioni.

Fattori esterni

Nel sistema involucro il sole inteso come sorgente di energia diretta e indiretta, ricopre un ruolo di grande importanza. La progettazione delle facciate richiede, infatti, particolari analisi:

- studio del percorso solare in rapporto alla località e al tempo (fig.18);
- livello di radiazione in relazione all'orientamento, all'inclinazione delle superfici e al fattore spazio-tempo (figg.19-20);
- differenti tipi di radiazione (diffusa, diretta, diverse lunghezze d'onda, anche riflessa dalle superfici circostanti l'edificio) in rapporto alle condizioni atmosferiche, all'orientamento, al periodo (fig.21);
- interazione tra superfici e materiali; apporto energetico e relazione con il fabbisogno termico;
- azione combinata pioggia/vento.

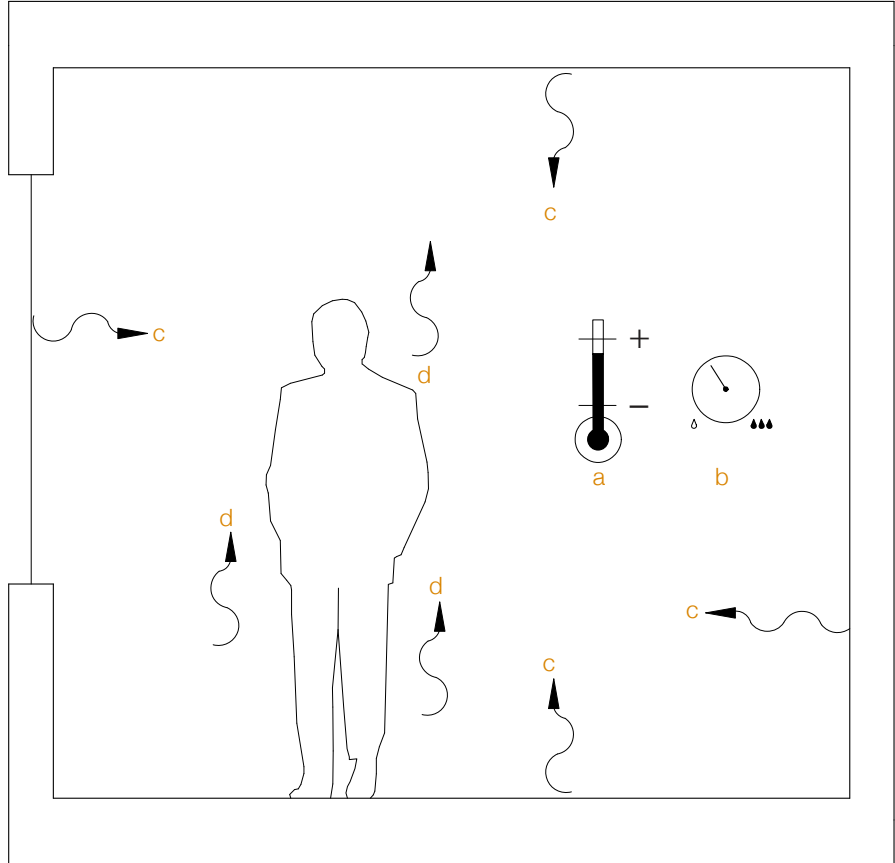
Fattori interni: benessere indoor

Le diverse condizioni ambientali interne si possono riassumere nel concetto di *benessere indoor*. I fattori interni di maggiore importanza e strettamente correlati alla progettazione dell'involucro sono (fig.22):

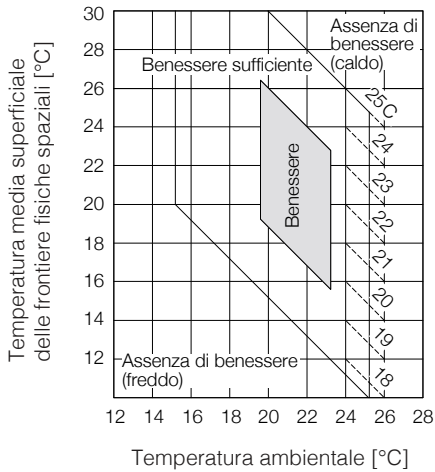
- temperatura ambientale;
- umidità relativa;
- temperatura operativa e temperatura media radiante;
- IAQ (Indoor Air Quality).

Tali condizioni misurabili definiscono il benessere ambientale in relazione al contesto geografico e soprattutto allo stile di vita individuale.

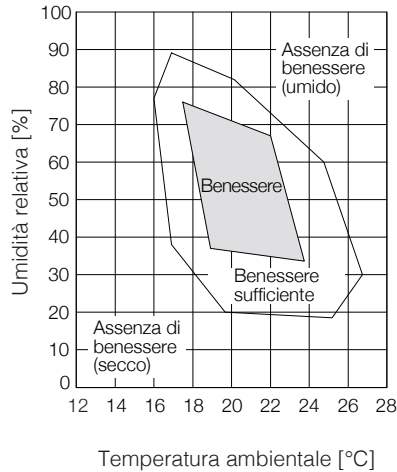
I diversi fattori concorrono a definire degli intervalli chiamati *campi di benessere*, per cui è assicurato un determinato livello di comfort in relazione alla *temperatura media superficiale delle frontiere fisiche spaziali* (°C), dell'*umidità relativa* (%) e di eventuali *movimenti dell'aria* (cm/s) (figg.23-25).



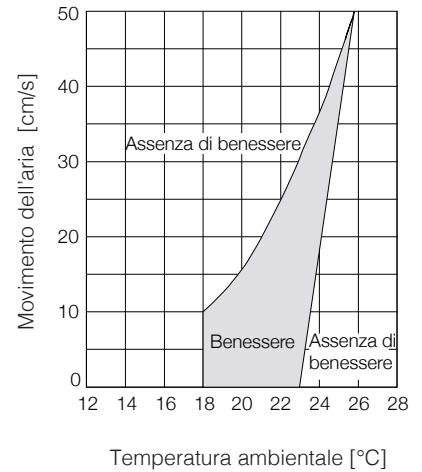
22



23



24



25

Principi generali della fisica

La comprensione del sistema involucro passa necessariamente attraverso alcuni principi fondamentali della fisica che regolano il suo comportamento:

- *trasferimento del calore* [W/m²K]: il flusso di energia termica si trasferisce dal corpo più caldo a quello più freddo secondo i principi di *conduzione*, *convezione* e *irraggiamento*;
- *conducibilità termica e capacità di*

accumulo del calore: entrambe le proprietà dipendono dalle caratteristiche del materiale e aumentano con il peso specifico;

- *trasferimento di vapore*;
- *radiazione termica*: la radiazione termica che colpisce un elemento viene riflessa, assorbita o trasmessa in relazione alla superficie ed al colore dei materiali;
- *vento, correnti termiche e ventilazione naturale*;
- *propagazione del suono*.

22. Benessere termico - situazione estiva.

Legenda: a) temperatura ambientale, b) umidità relativa, c) temperatura superficiale degli elementi costitutivi dell'involucro, d) correnti d'aria. Elaborazione grafica tratta da Herzog T., Krippner R., Lang W., *Atlante delle facciate*, Utet, Milano, 2005..

23. Diagramma del benessere indoor: temperatura media superficiale delle frontiere spaziali-temperatura ambientale.

24. Diagramma del benessere indoor: umidità relativa-temperatura ambientale.

25. Diagramma del benessere indoor: movimento d'aria-temperatura ambientale.

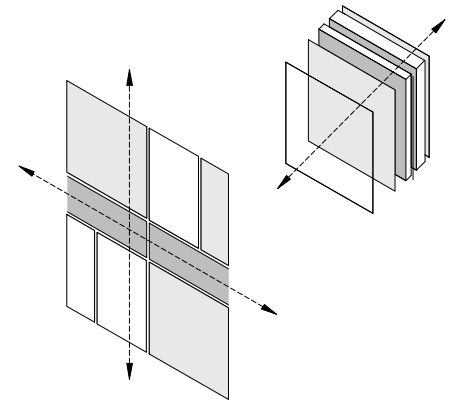
Criteria funzionali e criteri costruttivi fondamentali

I *criteri funzionali* oltre a definire le funzioni generali di *protezione, isolamento termico e acustico, impermeabilizzazione e permeabilità all'aria, all'acqua ed alla luce*, influiscono principalmente sul bilancio energetico dell'edificio. Le superfici permeabili alla radiazione, infatti, consentono un guadagno diretto di energia (attraverso sistemi fotovoltaici nel caso di sistemi trasparenti e semitrasparenti, pareti assorbenti con sistemi TWD, etc), poiché la radiazione solare che le attraversa riscalda gli elementi costruttivi opachi. La *modificabilità* e la *regolabilità* del sistema involucro sono altri due criteri funzionali in grado di gestire l'apporto energetico. Tale modificabilità/regolabilità può avvenire attraverso il movimento manuale o meccanico di elementi della facciata (lamelle, grado di apertura di imposte, etc.) oppure attraverso variazioni reversibili delle proprietà di alcuni materiali indotte da processi fotosensibili, elettrici, ultravioletti, etc. I *criteri costruttivi fondamentali* definiscono la *gerarchia e le scelte costruttive e materiche, il rapporto con la struttura portante, la trasmissione dei carichi, la differenziazione tra strati e involucri, l'eventuale sistema di ventilazione ed il grado di prefabbricazione*.

Morfo-tipologie di superficie del sistema involucro

La morfologia dell'involucro definisce la geometria esterna di un volume architettonico. Una facciata costituita da più elementi, può assumere differenti forme (verticali, orizzontali, inclinate, curve, etc.) che incidono sulla progettazione formale e strutturale dei particolari di facciata (fig.26). La concezione morfo-tipologica del sistema involucro è subordinata a numerosi fattori:

- geometria del volume architettonico in pianta, in prospetto e in sezione;
- aspetti funzionali (aperture, nicchie, cavedi, etc.);



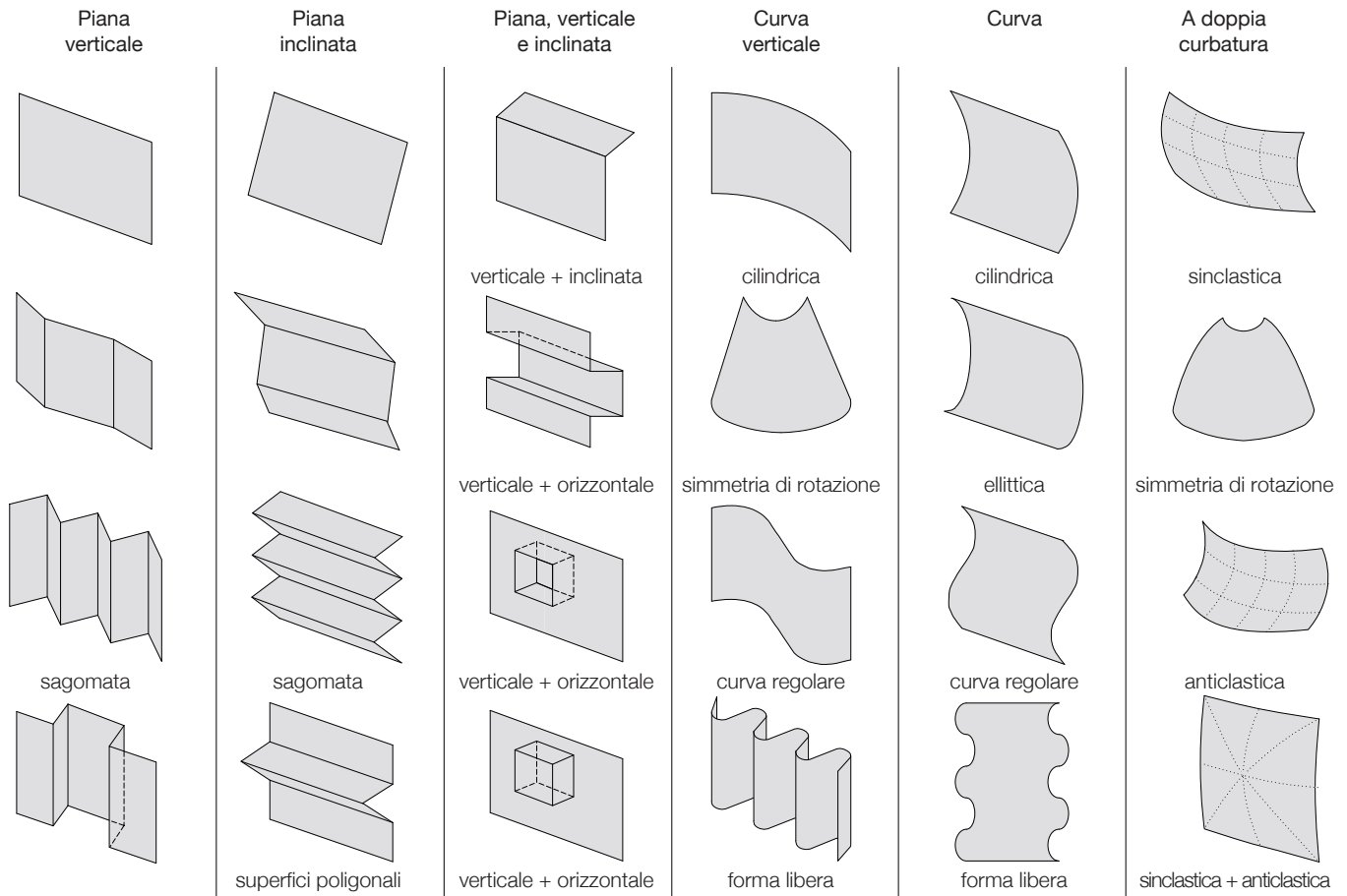
Criteri funzionali

Permeabilità all'aria	chiusa
	parzialmente permeabile
Penetrabilità alla luce	opaca
	traslucida
	semistrasparente
	trasparente aperta
Guadagno energetico	nessuno
	energia termica energia elettrica
Modificabilità	non modificabile
	meccanica fisico-strutturale chimico-materica
Regolabilità	manuale diretta
	manuale indiretta autoregolante

Criteri costruttivi fondamentali

Struttura	portante
	non portante
Chiusura	monostrato
	pluristrato
	involucro semplice
	a più involucri
Ventilazione	ventilato
	non ventilato
Grado di Prefabbricazione	basso
	elevato

- aspetti di isolamento termico (per esempio la riduzione degli spessori degli strati per minimizzare il rapporto tra superficie dell'involucro e volume);
- aspetti costruttivi;
- aspetti specifici dei materiali e dei sistemi di ancoraggio;
- aspetti formali ed estetici.



Le principali geometrie di superficie del sistema involucro sono:

- *superfici verticali*;
- *superfici orizzontali*;
- *superfici inclinate*;
- *superfici curve*;
- *doppia curvatura* (fig.27).

Principi strutturali

La facciata o un sistema involucro deve sostenere in assoluta sicurezza i carichi che agiscono su essa e trasmetterli alla struttura portante. Le sollecitazioni che agiscono sul sistema involucro sono:

- *carichi verticali*: peso proprio, carichi supplementari (per esempio, schermature solari, vegetazione, ponteggi, etc.), carichi accidentali, carico neve (e ghiaccio nel caso di facciate verde);
- *carichi orizzontali*: azione del vento (pressione e depressione), carichi accidentali;
- variazioni di volume per cause termiche o igrometriche.

Facciata appoggiata o facciata appesa

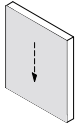
Una delle differenze sostanziali nei principi strutturali del sistema involucro è quella tra *facciata appoggiata* e *facciata appesa*. La differenza comporta una fase di calcolo degli elementi secondo le azioni di compressione e flessione (*facciata appoggiata*) e di trazione e flessione (*facciata appesa*).

Il sistema involucro “appeso” si è imposto universalmente per i seguenti vantaggi:

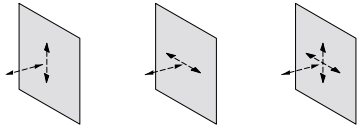
- l'elemento costruttivo si trova in posizione stabile subito dopo il montaggio (a differenza del sistema appoggiato che resta labile) favorendo maggiore sicurezza in fase di costruzione, soprattutto per edifici alti;
- il peso proprio dell'elemento costruttivo produce una sollecitazione di trazione lungo l'asse longitudinale e la pressoflessione che si genera ha funzione stabilizzatrice (al contrario del sistema appoggiato).

27. Rappresentazione schematica di superfici tipiche del sistema involucro, combinabili in numerose varianti. Elaborazione grafica tratta da Herzog T., Krippner R., Lang W., *Atlante delle facciate*, Utet, Milano, 2005.

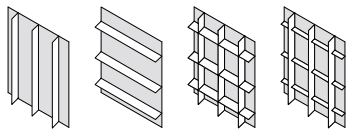
Solo compressione



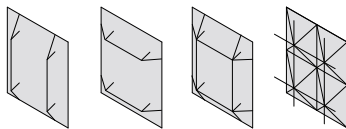
Flessione e sollecitazioni normali



Solo pannello

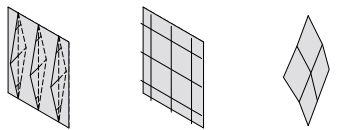


Pannello e irrigidimento alla flessione



Pannello e tiranti

Pannello e reticolare

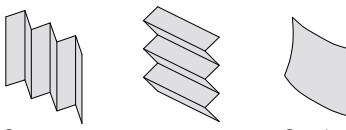


Pannello e cavi

Pannello e reticolo di cavi

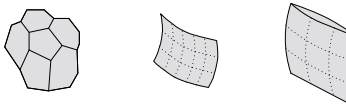
Pannello e involucro a griglia

Solo sollecitazioni normali



Sagomatura

Guscio



Guscio di superfici poligonali

Membrana

Struttura pneumatica

28

Strutture portanti del sistema involucro

Il sistema involucro, a seconda del tipo di struttura portante, viene sollecitato da carichi normali al suo piano di giacitura (trazione e/o compressione) e da sollecitazioni di flessione in direzione perpendicolare al piano.

Al sistema costituito da elementi pannello, possono essere subordinate strutture portanti lineari (tiranti, reticolari, cavi, etc.) con lo scopo di migliorare la stabilità e per ridurre l'impiego di materiale all'aumentare dell'altezza statica.

Quindi, le tipologie strutturali del sistema involucro sono:

- **pareti pesanti:** tipologia in grado di non sopportare nessuna sollecitazione a trazione. La risultante dei carichi verticali e orizzontali deve trovarsi all'interno del nocciolo centrale d'inerzia affinché sia assicurata la staticità del sistema. Solitamente le murature portanti rispondono a questo principio;
- **pannelli:** la struttura autoportante formata da pannelli verticali trasferisce i carichi orizzontali perpendicolarmente al proprio piano attraverso sollecitazioni di flessione. La rigidità alla flessione e alla stabilità (in caso di sovrapposizione con gli sforzi di compressione) dipendono essenzialmente dall'altezza statica dell'elemento costruttivo. La contemporaneità di sollecitazioni dovute a carichi verticali e orizzontali implica una sovrapposizione di momenti flettenti e forze normali al piano;
- **pannelli e irrigidimenti alla flessione:** gli irrigidimenti convogliano i carichi concentrati o lineari degli elementi piani (pannelli) e flettendosi li trasmettono come carichi concentrati alla struttura portante. Le azioni del vento (pressione e depressione) generano la sovrapposizione di compressione e flessione, accrescendo il rischio di pressoflessione e conseguenti problemi di stabilità.
- **pannelli e strutture lineari sollecitate:** le strutture portanti lineari (pannelli) possono comprendere le **strutture reticolari** (strutture

spaziali formate da tiranti e puntoni, adatte per grandi luci); **reticolo di cavi** (strutture pre-sollecitate resistenti solo agli sforzi di trazione) e **involucro a griglia**.

- **strutture sagomate, gusci, membrane:** le strutture piane autoportanti resistenti a compressione e/o trazione soltanto lungo il proprio piano sono adatte per resistere a carichi superficiali omogenei. Tali sistemi vengono sollecitati ulteriormente a sforzi di flessione dall'alternarsi di carichi superficiali e/o concentrati. Adeguate pre-sollecitazioni assicurano che anche in caso di variazioni di carico, le deformazioni delle membrane sollecitate esclusivamente a trazione, restino limitate (figg.28-29).

Sollecitazioni dell'elemento	Sistema portante
Solo compressione	principio del peso proprio
Compressione e trazione	struttura sagomata
Compressione ed eventuale trazione	guscio
	struttura pneumatica
	struttura a membrana
Flessione e compressione	pannello appoggiato
Flessione e trazione	pannello appeso

29

Tipologie di strutture d'involucro

Nel sistema involucro si possono distinguere numerose strutture realizzate anche con materiali differenti. Si differenziano per:

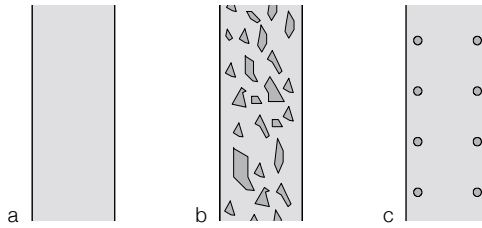
- struttura passante: sezione piena con struttura direzionale o non direzionale (isotropa o anisotropa);
- struttura porosa, espansa, a sfere o a griglia/reticolo;
- struttura a cavità o a camere;
- struttura a strati, con accoppiamento per attrito e/o forma;
- struttura a strati, con accoppiamento per materiali;
- sandwich;
- nervature o telai rivestiti;
- strutture profilate (fig.30).

28. Classificazione del sistema involucro secondo la funzione strutturale. Elaborazione grafica tratta da Herzog T., Krippner R., Lang W., *Atlante delle facciate*, Utet, Milano, 2005.

29. Sollecitazioni negli elementi piani di facciata in corrispondenza dei carichi orizzontali e verticali.

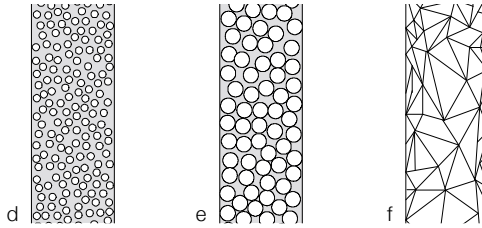
Struttura passante

- a) materiale semplice
- b) miscela di materiali, materiale composito
- c) materiale composito armato con fibre



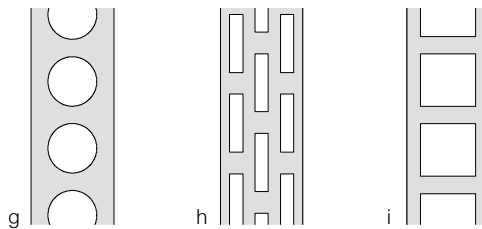
Struttura con elevato contenuto d'aria

- d) poroso, espanso
- e) struttura a sfere
- f) griglia/reticolo tridimensionale



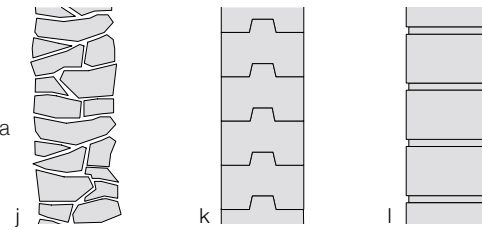
Struttura a cavità o camere

- g) cavità, camere (a punti, lineare)
- h) cavità lineari sfalsate
- i) lastre trasversali



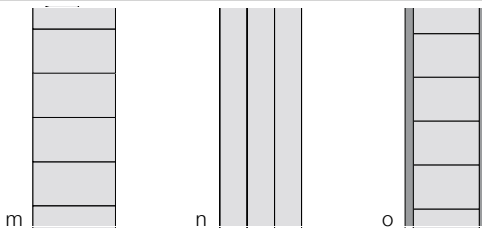
Struttura a strati, con accoppiamento per attrito e/o forma

- j) unità irregolari, accoppiate per attrito
- k) unità regolari, accoppiate per attrito e forma
- l) unità regolari, accoppiate per attrito



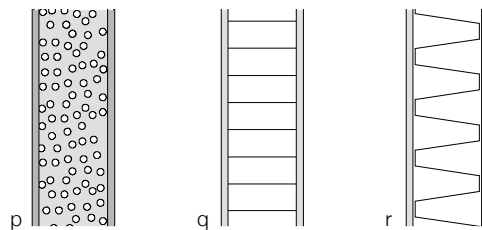
Struttura a strati, con accoppiamento per materiali

- m) unità a barre
- n) unità piane
- o) unità a barre e piane



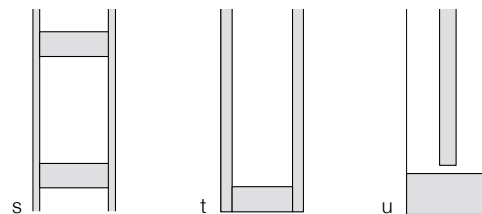
Sandwich

- p) con strato interposto a celle chiuse
- q) con strato interposto a celle aperte
- r) con strato interposto a profilati



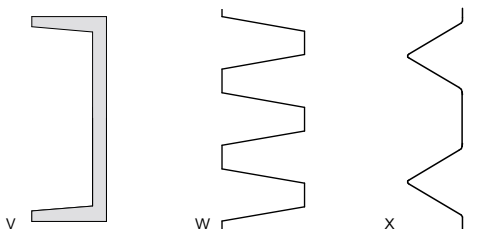
Nervature o telai rivestiti

- s) unità costruttiva formata da nervature e rivestimento resistente bifacciale
- t) unità costruttiva formata da telai e rivestimento resistente bifacciale
- u) telai e riempimento disaccoppiato



Strutture profilate

- v) profilo singolo
- w) profilo grecato
- x) profilo nervato



30. Schema delle tipologie di strutture del sistema involucro. Elaborazione grafica tratta da Herzog T., Krippner R., Lang W., *Atlante delle facciate*, Utet, Milano, 2005.

Involucro e strati

Nella contemporaneità è improbabile che strutture omogenee costituite principalmente da un solo materiale (struttura muraria monolitica) soddisfino le esigenze di isolamento termico richieste agli involucri edilizi. I progettisti possono adattare con precisione il profilo prestazionale di una facciata per soddisfare determinati requisiti creando strutture differenziate che assegnano funzioni individuali a diversi strati con un materiale e una struttura specifici. Rendere modificabili strati o gusci consente alle proprietà dell'involucro edilizio di adattarsi alle condizioni esterne che cambiano periodicamente. Singoli strati e gusci possono essere successivamente aggiunti o sostituiti, consentendo di adattare l'involucro edilizio alle diverse esigenze funzionali e normative durante il suo intero ciclo di vita. Questo principio può essere utile anche in successivi processi di *retrofitting*¹⁸ per rinnovare e ottimizzare gli involucri del patrimonio edilizio esistente. L'assegnazione di singole funzioni a strati e gusci può, però, presentare anche degli svantaggi a seconda della qualità dei materiali e dei metodi costruttivi scelti:

- insorgenza di numerosi punti di discontinuità tra materiali e componenti differenti;
- maggior numero di giunti, dunque potenziali punti deboli;
- problemi di fissaggio per interpenetrazione di strati drenanti o termoisolanti;
- alti costi di produzione;
- crescenti costi di manutenzione;
- maggiori costi di manodopera;
- costi derivanti dalla dismissione dei differenti strati;

Le nuove tendenze derivanti dallo sviluppo del sistema involucro, sono:

- aumento delle capacità prestazionali dei vari livelli funzionali;
- riduzione degli spessori degli strati (soprattutto isolanti);
- applicazioni di strati basati sulle nanotecnologie;
- materiali compositi polivalenti.

Gli strati e gli involucri devono costituire una cellula costruttiva unica che viene applicata alla struttura di facciata.

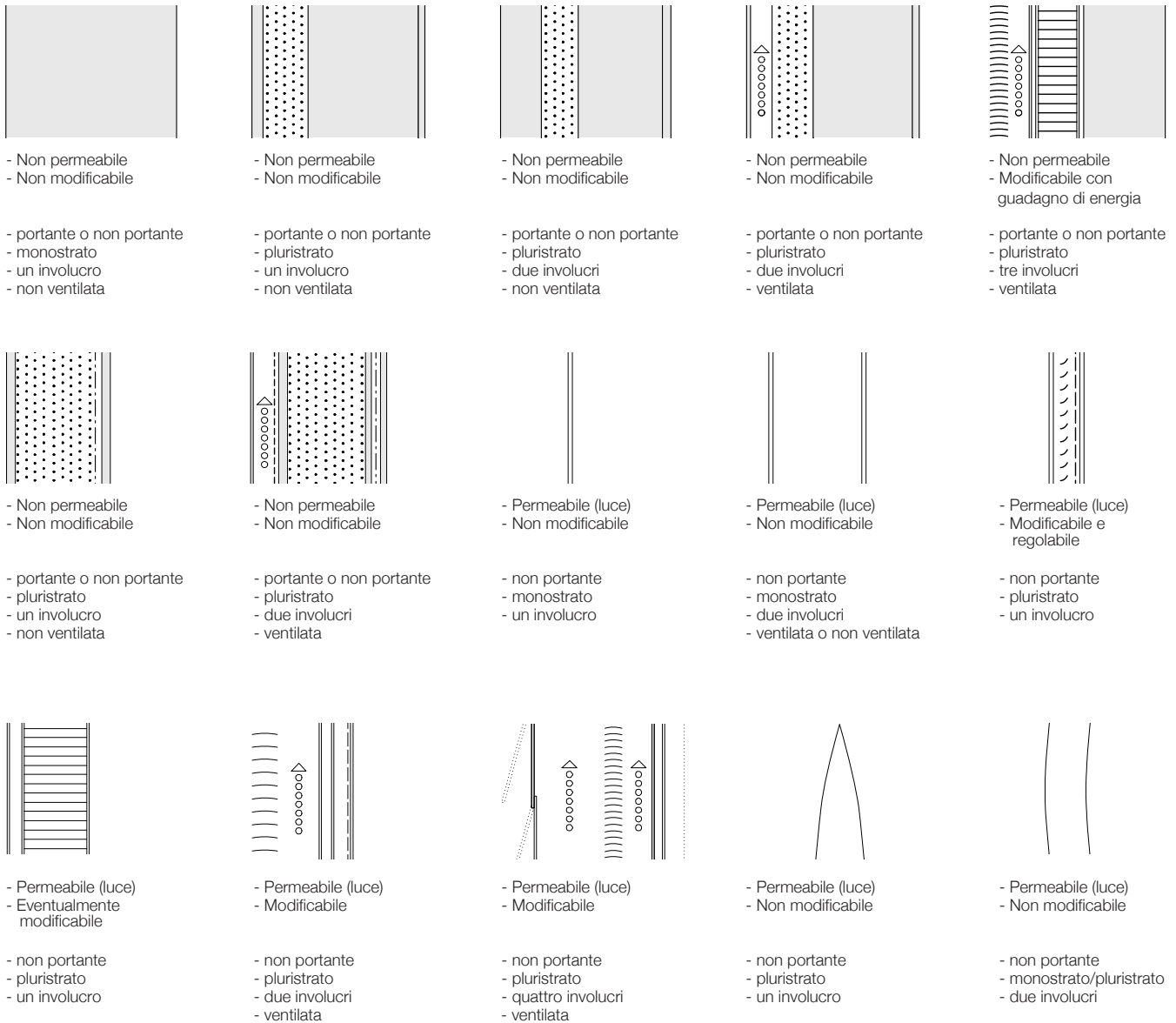
A seconda della posizione dei livelli funzionali nella struttura, i carichi che agiscono risultano differenti: a causa delle proprietà o della resistenza dei materiali determinati elementi superficiali non sono in grado, o lo sono in misura limitata, di convogliare e di trasmettere le sollecitazioni.

Pertanto per quanto riguarda la trasmissione dei carichi è necessario individuare precise gerarchie che stabiliscono quale elemento esterno deve essere supportato da quale elemento strutturale. La distinzione dei livelli funzionali di una struttura di facciata in strati e involucri è legata al grado di autonomia strutturale.

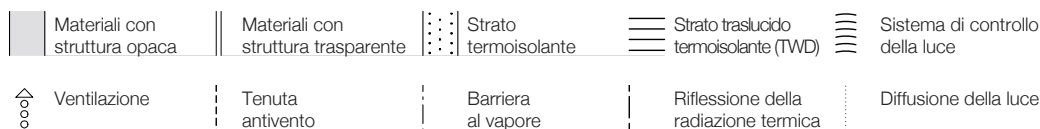
Gli *strati* non sono di per sé portanti e/o parti di un'unità strutturale principale, o lo sono ad alcune condizioni come ad esempio: lamine e rivestimenti irrilevanti dal punto di vista strutturale, strati di ventilazione, strati isolanti, strati di intonaco, membrane, etc.

Gli *involucri*, invece, sono prevalentemente portanti, e sono in parte o del tutto autonomi dal punto di vista spaziale e/o strutturale. Un involucro può essere formato da più strati; per esempio: pelle esterna o interna di facciate doppie, elementi costruttivi separati da strati d'aria o da isolanti con funzione non portante.

Una struttura portante (ad esempio a montanti e traversi) può collegare più involucri restando gerarchicamente superiore oppure comportandosi come sottostruttura, può unire un elemento costruttivo subordinato (ad esempio la parete ventilata o a cortina) a uno principale. La quantità e lo spessore degli strati e degli involucri variano in maniera evidente. Essi si suddividono in sistemi costruttivi pesanti e leggeri, il cui funzionamento è adatto in relazione al contesto climatico (fig.31).



Legenda



Strati e involucri possono essere combinati e/o implementati per rispondere a determinate prestazioni, come per esempio:

- protezione meccanica;
- protezione dalla pioggia battente;
- funzione antivento;
- limitazione delle permeabilità al vapore;
- controllo e diffusione della luce;
- riflessione delle radiazioni elettromagnetiche, luminose e termiche;

- controllo inquinamento acustico;
- controllo della trasmissione e accumulo termico;
- trasmissione dei carichi;
- trasformazione dell'energia solare in energia termica e/o elettrica;
- compatibilità tra strati;
- zone di scorrimento per cinematismi liberi da vincoli;
- protezione antincendio e tenuta dei fumi;
- controllo della ventilazione;
- aspetto formale.

31. Schema delle tipologie di strati e involucri. Elaborazione grafica tratta da Herzog T., Krippner R., Lang W., *Atlante delle facciate*, Utet, Milano, 2005.

2.3. Il sistema involucro oggi: strategie innovative per lo sviluppo prestazionale e sostenibile

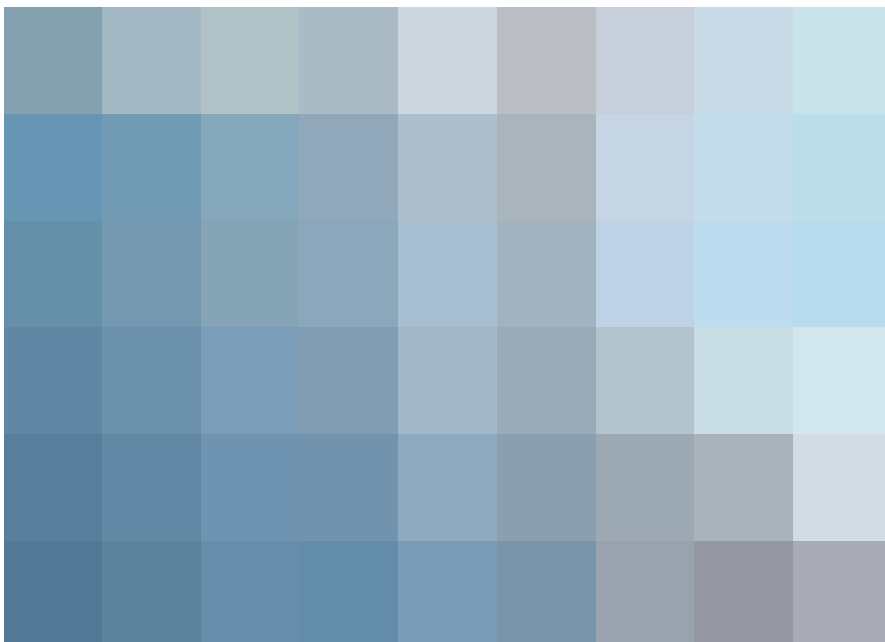
Il linguaggio e la tecnologia dell'involucro oggi

Dagli anni '50 del Novecento ad oggi, il sistema edilizio dell'involucro e di facciata è mutata notevolmente: dalle prime sperimentazioni di Le Corbusier (*Mur neutralisant e Respiration exacte*) la parete perimetrale si è liberata formalmente dalle fatiche strutturali, dotandosi di innovazioni delle componentistiche dell'industria e dei nuovi materiali (calcestruzzo, acciaio, vetro, materiali sintetici, etc.) e integrando complessi sistemi impiantistici in grado di accumulare energia migliorando il benessere indoor e limitare i consumi energetici.

La produzione tecnologica degli ultimi anni ha favorito un processo di evoluzione del concetto di involucro creando architetture innovative dal punto di vista formale ed energetico. Tecnologie e materiali hanno aumentato in numero e complessità i sistemi costruttivi dell'involucro che è possibile sintetizzare nelle seguenti tipologie:

- *involucro opaco*;
- *involucro trasparente*;
- *involucro misto*;
- *involucro adattivo e parametrico*.

32. Facciata continua con montanti e traversi.



A seconda delle caratteristiche strutturali (portanti e non portanti), le tipologie di involucro opaco si suddividono ulteriormente in:

- *parete solida*: realizzata con elementi monolitici naturali o artificiali rivestita con intonaco, ceramiche, pietra naturale o artificiale;
- *parete solida calda*: realizzata con elementi monolitici naturali o artificiali. Presenta uno strato di isolamento termico applicato direttamente sulla superficie dell'edificio (*cappotto termico*);
- *parete solida fredda*: realizzata con elementi monolitici naturali o artificiali. Presenta una intercapedine ventilata interposta tra lo strato superficiale di rivestimento e lo strato di isolamento termico (*facciata ventilata*). La ventilazione naturale evita la formazione di condensa tra strato resistente e isolante attraverso il fenomeno del *lavaggio termico*;
- *struttura a tenda*: progettate per facilitare il montaggio e lo smontaggio del sistema, sancendo la prima separazione tra struttura e involucro;
- *struttura a telaio in legno*: definita anche timber-frame è formata da elementi verticali in legno con interposti i pannelli isolanti. I montanti, inoltre, fungono da supporto per il rivestimento interno ed esterno;
- *balloon frame*: primo sistema industrializzato in legno costituito da una ossatura lignea con montanti e traversi di sezione ridotta, disposti a intervalli ravvicinati e irrigiditi con appositi controventi lignei. Tra un elemento e l'altro è interposto lo strato isolante.

Le tipologie di involucro trasparente sono, invece:

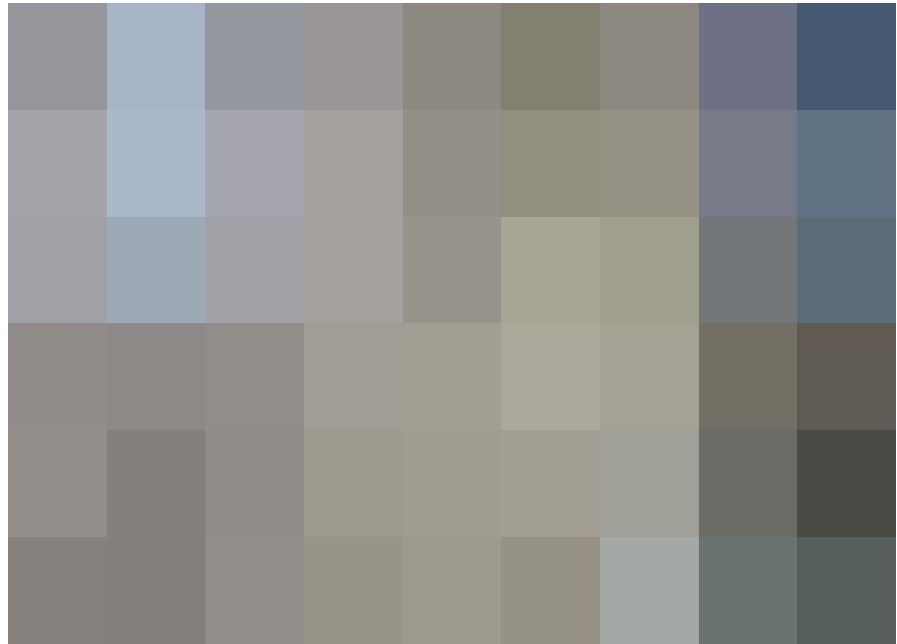
- *facciata continua con montanti e traversi*: prima evoluzione della facciata continua come sistema dissolutivo della stereotomia muraria (fig.32);
- *facciata continua portante*: caratterizzata da elementi metallici verticali portanti che scaricano direttamente in fondazione il peso

proprio, il peso portato e le spinte orizzontali del vento;

- *facciata continua sospesa o parete tenda*: caratterizzata da elementi metallici orizzontali e sistema di sospensione verticale per sostenere il peso della facciata;
- *sistema post-and-beam*: noto più semplicemente come sistema a pilastri e travi, il sistema è caratterizzato esclusivamente da condizioni strutturali per la necessità di coprire grandi luci;
- *curtain wall*: parete di tamponamento formata da elementi tutti uguali appesi alla struttura. I carichi della facciata sono trasferiti alla struttura portante principale attraverso i collegamenti ai solai o ai pilastri dell'edificio;
- *facciata continua prefabbricata a celle*: realizzata con elementi modulari prefabbricati assemblati a secco (fig.33).

Le tipologie di involucro misto sono, invece:

- *facciata a doppia pelle*: facciata continua dotata di un ulteriore involucro trasparente per migliorare le prestazioni termiche ed acustiche (fig.34);
- *facciata a box-window*: sviluppate per affrontare il problema delle interferenze tra i sistemi di ventilazione e l'aria esausta tra i diversi livelli. Per ciascun modulo sono integrati dei deflettori orizzontali



34

apribili sia superiormente che inferiormente, garantendo la ventilazione naturale;

- *facciata a corridoio*: definite come *corridor façade* sono state sviluppate per affrontare il problema delle interferenze tra i sistemi di ventilazione e aria esausta tra i diversi livelli. Mediante una configurazione di apertura diagonale superiore e inferiore, il sistema garantisce - rispetto al facciata box-window - un migliore volume di ventilazione naturale;
- *facciata shaft-box*: grazie alle ridotte aperture sulla superficie esterna garantiscono elevati valori di isolamento acustico. La morfo-



33

33. Costruzione di una facciata continua prefabbricata a Yokohama, Giappone, © Satoshi Kimura.

34. Facciata a doppia pelle del Grattacielo Intesa Sanpaolo di Torino progettato nel 2011 dall'architetto Renzo Piano, © Andrea Cappello).

logia a moduli sfalsati, inoltre, favorisce la ventilazione in apposite intercapedini ricavate dall'arretramento del modulo;

- *facciata alternata*: nel sistema una seconda pelle viene aggiunta localmente alla costruzione della facciata. Una griglia viene montata alternata alla parete trasparente per consentire la ventilazione indipendentemente dalle condizioni atmosferiche;
- *facciata integrata*: comprende oltre le funzioni di ventilazione, anche componenti impiantistici attivi di controllo ambientale e di illuminazione.

Le tipologie di involucro dinamico sono, invece:

- *muro a trombe*: il sistema utilizza il concetto di effetto serra: l'energia solare che penetra attraverso l'involucro trasparente viene assorbita dalla massa termica di una parete massiva. Il calore accumulato viene rilasciato nell'ambiente interno per riscaldarlo naturalmente;
- *muro di trombe-michel*: il sistema è un particolare muro ad azione passiva solare brevettato nel 1881 da Edward Morse e reso famoso nel 1964 dall'ingegnere francese Félix Trombe e dall'architetto Jacques Michel. Si tratta di una parete a doppio vetro esposta a sud con una intercapedine compresa tra i 5 e i 20cm e due bocchette d'aerazione poste alla base e alla sommità dell'invo-

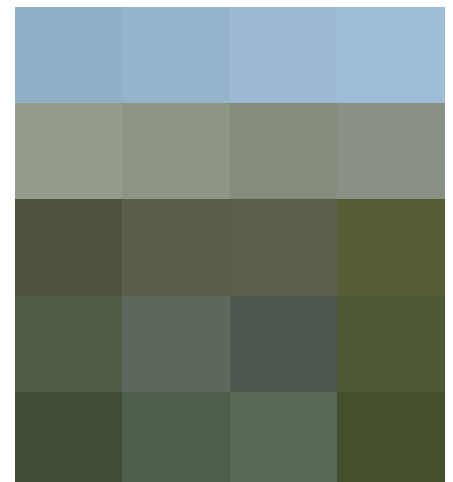
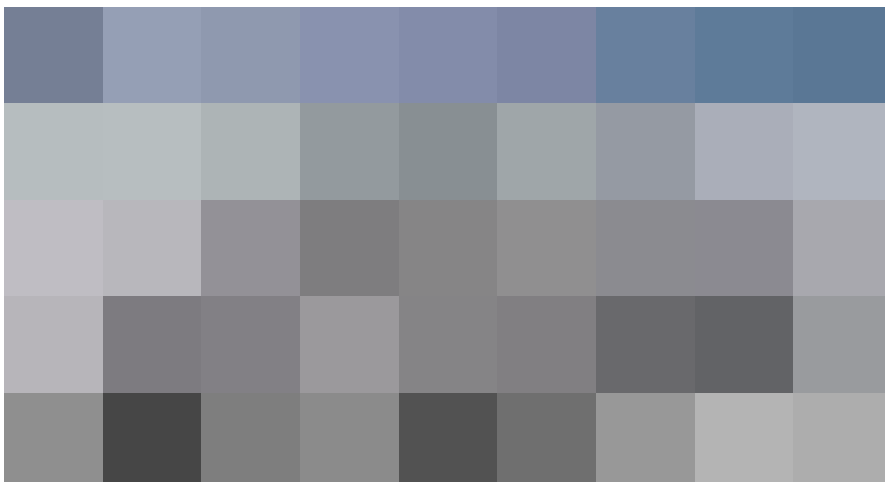
lucro trasparente e opaco. Durante la stagione invernale, di giorno, le bocchette (dell'involucro opaco) lasciate aperte favoriscono il flusso termico dall'intercapedine (più calda) agli ambienti interni; di notte, invece, le bocchette sono chiuse per evitare il fenomeno inverso del flusso termico. Durante la stagione estiva, invece, le bocchette d'aerazione dell'involucro opaco sono tenute chiuse di giorno affinché nell'intercapedine si generino dei moti convettivi (parete ventilata) che filtrano l'aria calda convogliandola all'esterno attraverso delle aperture praticate sulla superficie vetrata esterna;

- *facciata adattiva*: o involucro dinamico, sono in grado di modulare le condizioni di benessere e comfort all'interno di un edificio al variare delle condizioni ambientali di contorno mediante un sistema impiantistico sensibile alle variazioni ambientali (fig.35).
- *facciata verde*: la creazione di superfici verticali verdi sulle pareti di un edificio apporta numerosi benefici (depurazione idrica e dell'aria, isolamento, controllo microclimatico, attenuazione dei rumori, difesa del suolo, conservazione delle biodiversità, qualità del costruito e percezione psicologica, etc.). La facciata verde può essere considerata un involucro adattivo attraverso il fototropismo, cioè la capacità di limitare il flusso delle onde corte per irraggiamento e dell'assorbimento dell'energia radiante (soprattutto della gamma di radiazioni del rosso) (fig.36).

35. Facciata adattiva del Kolding Campus, University of Southern Denmark, © Jens Lindhe.

36. Facciata verde.

37. Nelle pagine successive: tipologie di involucro opaco, trasparente e misto. Legenda: a) parete solida, b) parete solida calda, c) parete solida fredda, d) apertura nella parete solida, e) apertura vetrata singola e doppia, f) apertura vetrata isolata, g) struttura a tenda, h) struttura a telaio in legno, i) balloon frame, j) facciata continua con montanti e traversi, k) facciata continua portante, l) facciata continua sospesa o parete tenda, m) sistema post-and-beam, n) curtain wall, o) facciata continua prefabbricata, p) facciata a doppia pelle, q) facciata a box-window, r) facciata a corridoio, s) facciata shaft-box, t) facciata alternata, u) facciata integrata, v) muro a trombe, x) muro di trombe-michel, y) facciata adattiva.

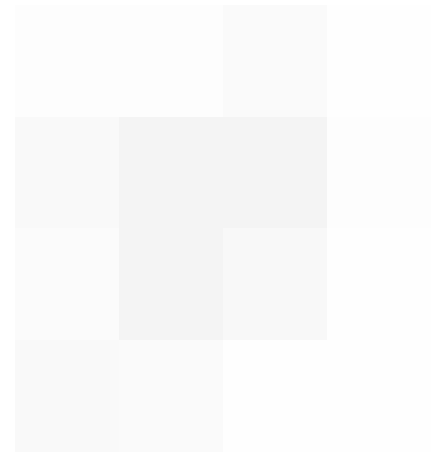




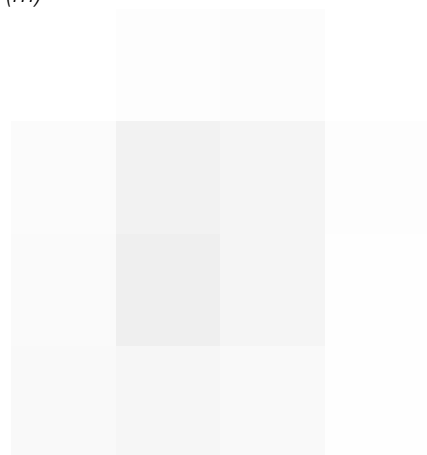
(m)



(n)



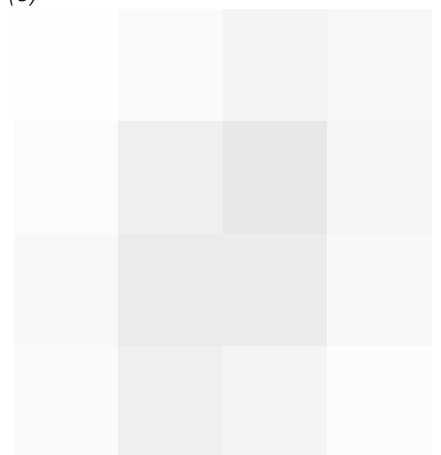
(o)



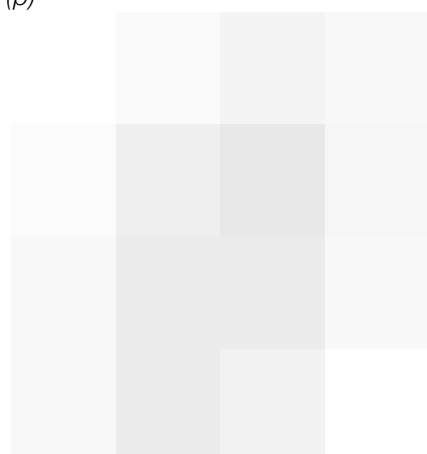
(p)



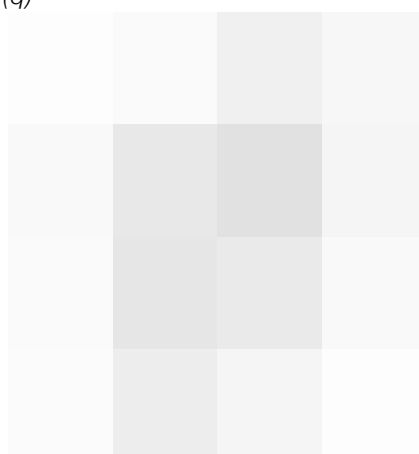
(q)



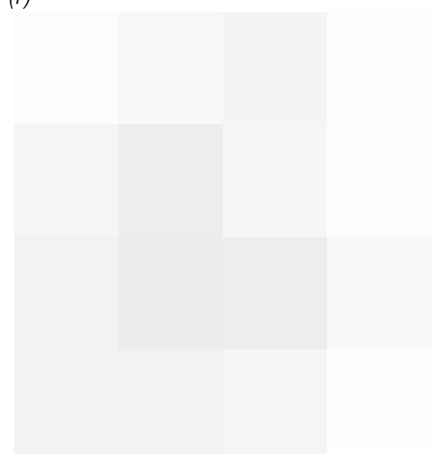
(r)



(s)



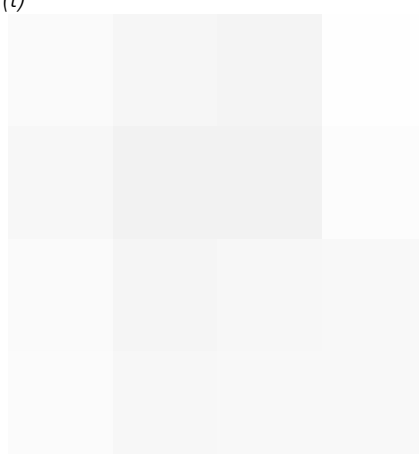
(t)



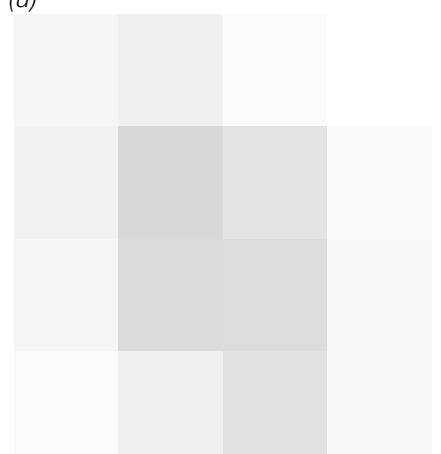
(u)



(v)



(x)



(y)

Innovative Building Envelope

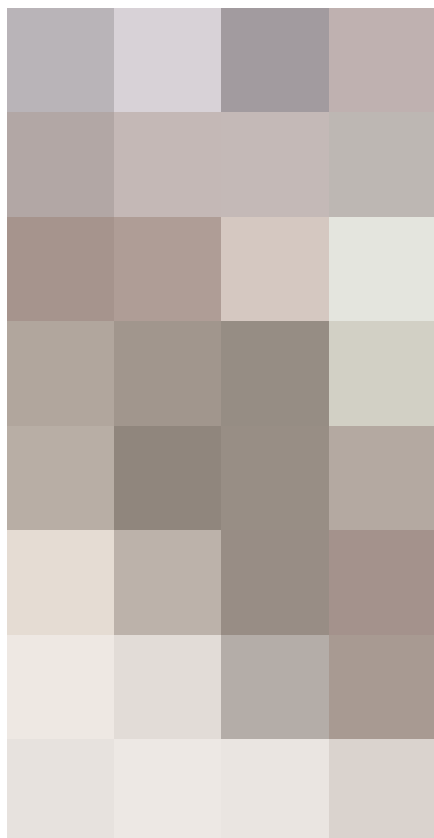
Tra le numerose istanze e campi di sviluppo del sistema involucro, la ricerca approfondisce la tematica dell'involucro edilizio innovativo (o *Innovative Building Envelope*)¹⁹ mediante l'applicazione dei biopolimeri, un settore in continua espansione, soprattutto nell'industria delle costruzioni. La ricerca intende indagare le potenzialità di applicazione dei materiali biocompositi prodotti a partire da materie di scarto e fonti rinnovabili, in grado di garantire un processo di dismissione biodegradabile. L'obiettivo è promuovere - attraverso la sinergia tra architettura e biologia - nuovi materiali naturali per il sistema involucro che possano limitare l'utilizzo dei polimeri sintetico-artificiali o comunque, tutti quei materiali altamente inquinanti per l'ambiente e che richiedono un elevato apporto di materia ed energia nell'intero ciclo di vita. Materiali che all'attualità sono ancora allo stadio di prototipazione, ma che costituiscono le fondamenta per una nuova pratica di progettazione integrata e sostenibile in architettura ed in innumerevoli settori penalizzati dall'impiego di risorse non rinnovabili e inquinanti e da processi tradizionali oramai obsoleti.

Gli involucri edilizi innovativi possono, inoltre, fornire miglioramenti nell'efficienza energetica e nell'economia degli edifici, grazie alla loro capacità di modificare il loro comportamento in tempo reale in base a sollecitazioni naturali interne o esterne²⁰. Ciò può avvenire tramite materiali, componenti o sistemi. In quanto tali, le facciate innovative e adattive possono dare un contributo significativo e fattibile al raggiungimento degli obiettivi dell'UE per il 2020. Sono già stati sviluppati diversi concetti di facciata adattiva e nel prossimo futuro si prevede un aumento delle soluzioni emergenti e innovative. Ma è possibile trovare una definizione univoca per il complesso panorama dei sistemi di involucro intelligente che hanno caratterizzato l'architettura con-

temporanea dell'ultimo decennio? Per anni, architetti e scienziati edili hanno immaginato la possibilità che gli edifici futuri possedessero involucri con un certo tipo di risposta adattativa alle mutevoli condizioni ambientali. Nel 1975 Nicholas Negroponte (1943) ha introdotto il concetto di *architettura reattiva* (*responsive architecture*) (fig.38), capace di svolgere un ruolo attivo, avviando in misura maggiore o minore cambiamenti come risultato e funzione di calcoli complessi o semplici²¹ «Sebbene negli ultimi anni sia stata spesa una notevole quantità di tempo e sforzi per le case intelligenti, l'enfasi qui è stata principalmente sullo sviluppo di sistemi computerizzati ed elettronica per adattare l'interno dell'edificio o le sue stanze alle esigenze dei residenti. La ricerca nel settore dell'architettura reattiva ha avuto molto più a che fare con la struttura stessa dell'edificio, la sua capacità di adattarsi alle mutevoli condizioni meteorologiche e di tenere conto della luce, del caldo e del freddo. Ciò potrebbe teoricamente essere ottenuto progettando strutture costituite da aste e corde che si piegherebbero in risposta al vento, distribuendo il carico più o meno allo stesso modo di un albero.

38. Struttura parametrica - architettura reattiva (*responsive architecture*).





39

39. L'involucro adattivo del Kuggen, progettato a Gothenburg (Svezia) nel 2011 dal gruppo Wingårdh Arkitektkontor, © Lindman.
40. Il sistema di facciata BIPV Adaptive Flakes progettato nel 2016 dal prof. Enrico Sergio Mazzucchelli e da Luisa Doniacovo (Building Physics Engineer), è in grado di orientare le celle fotovoltaiche in modo intrinseco, al fine di ottimizzare la produzione di energia in relazione alle condizioni esterne nell'arco di un anno. Grazie al dinamismo passivo, il componente può adattarsi alle condizioni climatiche esterne senza un sistema meccanico alimentato elettricamente. Il modulo base premontato è costituito da un telaio perimetrale in legno, ovvero il supporto per traversi, dove le lamelle vengono fissate con viti. Per quanto riguarda l'unione tra lo strato adattativo lamellare e quello fotovoltaico si utilizzano viti maschio-femmina in acciaio. L'assemblaggio tra lo strato adattativo e quello fotovoltaico dovrebbe consentire l'adeguamento di quest'ultimo alla forma assunta dal materiale autoregolante, a seconda delle condizioni esterne. A tale scopo sono stati previsti fori asolati sulla parte inferiore delle scaglie. Le viti maschio-femmina, inserite in speciali guarnizioni in neoprene, possono muoversi in questi fori quando la flangia cambia forma.

Allo stesso modo, le finestre risponderebbero alla luce, aprendosi e chiudendosi per fornire le migliori condizioni di illuminazione e riscaldamento all'interno dell'edificio»²².

Questa linea di ricerca, nota come "tensegrità attuata", si basa sui cambiamenti nelle strutture controllate da attuatori che a loro volta sono guidati da interpreti computerizzati delle condizioni del mondo reale. Un esempio è il progetto Actuated tensegrity prototype di Tristan d'Estree Sterk e ORAMBRA, un involucro che cambia forma utilizzando strutture di "tensegrità attuata", ovvero un sistema di barre e fili manipolati da "muscoli" pneumatici che fungono da scheletro dell'edificio, che costituisce l'ossatura di tutte le sue pareti²³. All'interno del progetto vengono utilizzate tecnologie sensori/computer/attuatori per produrre una serie di involucri edilizi intelligenti che cercano nuove relazioni tra "edificio" e "utente". Questi edifici sensibili sono ricoperti da pelli che hanno la capacità di alterare la loro forma al variare delle condizioni sociali e ambientali degli spazi all'interno e intorno a ciascun edificio (fig.39). Nel 1981, Mike Davies ha proposto l'idea di "The polyvalent wall", un sistema di involucro in cui diverse funzioni possono essere integrate in un unico strato. Tuttavia, solo negli ultimi anni, la ricerca tecnologica ha indagato nuove

frontiere di sperimentazione in grado di riaffermare la qualità osmotica di un processo di scambio che riguarda flussi di energia che sono passati e scambiati proprio attraverso l'involucro²⁴. Questi studi sono una nuova ricerca per dimostrare se una superficie di chiusura verticale può essere dotata di sistemi atti a garantire la dinamica richiesta ai flussi energetici gestiti alla stregua di un organismo biologico. Le facciate adattive possono quindi essere considerate l'ultima frontiera della ricerca architettonica e tecnologica contemporanea, sempre più legata alla volontà di progettare nuovi modelli di involucro dinamico, che, con l'ausilio di sensori, diventino componenti di sistema per la produzione di energia e materiali intelligenti, contribuisce a ridurre il fabbisogno energetico dell'edificio. Si tratta di soluzioni tecnologiche che, come detto in precedenza, sono in grado di gestire i flussi energetici alterando le proprietà di dispositivi fissi (materiali intelligenti) o controllando (manualmente o automaticamente) parti in movimento. Questa tipologia di involucro è improntata all'anisotropia dinamica, ovvero alla capacità di offrire soluzioni differenti per le diverse esposizioni dell'edificio, dove una variazione della struttura modula i vari flussi ambientali in funzione delle condizioni climatiche esterne²⁵ (fig.40).



40

Alcune delle moderne sperimentazioni per l'architettura parametrica ci mostrano la nuova frontiera del potenziale sviluppo degli *involucri adattivi e parametrici*. Attraverso questo approccio, è possibile tradurre in architettura l'aspetto della multifunzionalità presente in natura²⁶. L'architettura contemporanea parametrica trae ispirazione dai diversi livelli di organizzazione biologica e reticolare di alcuni organismi cellulari e dei sistemi presenti in natura. Le tecnologie digitali possono fornire soluzioni adeguate per affrontare la complessità formale e tecnica dei sistemi di protezione o chiusura degli edifici, determinando cambiamenti senza precedenti anche nel processo di conservazione, verso il concetto di Architettura e Recupero 4.0..

La trasformazione dei processi di progettazione attraverso l'utilizzo del design generativo computazionale, algoritmico o parametrico basato sulle prestazioni, o le simulazioni realizzate grazie alle tecnologie della realtà aumentata, così come la fabbricazione digitale e i nuovi metodi di costruzione contribuiscono a un cambio di paradigma in architettura e una trasformazione della pratica progettuale contemporanea.

Il tema delle facciate adattive è solo uno degli spunti di riflessione su alcune strategie di intervento, che assume il carattere generale tale da offrire un regesto di indicazioni utili per tutti i progettisti. Una volta elaborati e messi a sistema le strategie di intervento elaborate possono essere utilizzate in contesti geografici diversi, ma con caratteristiche climatiche simili.

Gli involucri adattivi sono in grado di variare le proprietà fisiche e chimiche intrinseche reagendo alle oscillazioni dell'ambiente esterno o interno e regolando le condizioni di comfort secondo l'esigenza dell'utenza. Ad oggi esistono numerose soluzioni di involucri adattivi in grado di recepire le novità tecnologiche e costruttive, nonché materiali integrati in grado di variare la propria condizione di fase (ad esem-

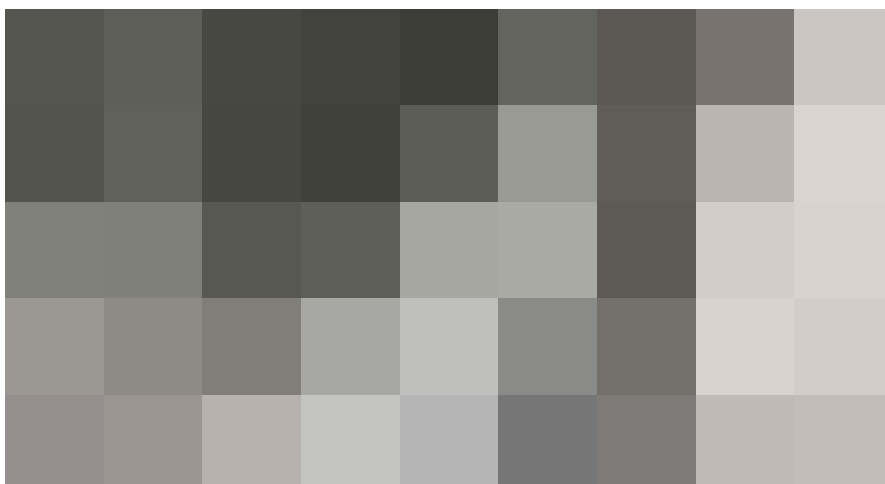
pio, i *Phase Change Materials*). L'adattività dell'involucro edilizio richiede, pertanto, non solo un coordinamento dimensionale dell'intero organismo edilizio (sia storico che di nuova costruzione), ma una attenzione particolare alla sua progettazione e al dialogo con il sistema impiantistico affinché siano soddisfatte le condizioni per il corretto svolgimento delle funzioni²⁷.

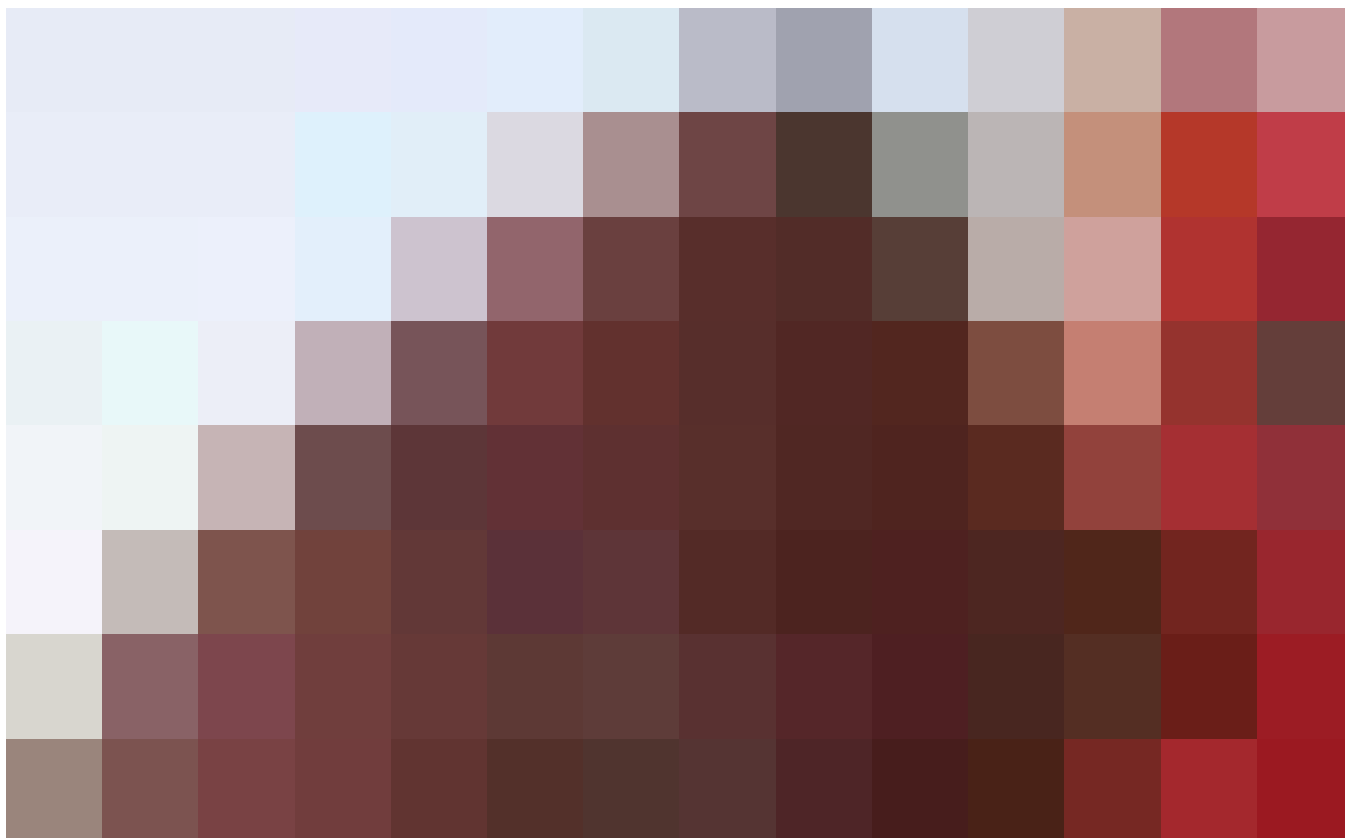
Spunti di riflessione per una lettura originale di temi già presenti da tempo nell'agenda di chi governa la città e rappresentano uno stimolo per nuovi approfondimenti sulle facciate biomimetico-adattive da implementare e sfruttare per edifici nuovi o esistenti in aree mediterranee.

Se la copiosa letteratura dell'ultimo decennio promette un ruolo centrale alla biomimesi in architettura di questo millennio, lo studio della riproduzione dei meccanismi biologici dovrà sempre più caratterizzare la progettazione di schermature, facciate o involucri smart per edifici in climi caldi. Soluzioni di design radicali e rivoluzionarie stimolano così la ricerca e lo sviluppo di strutture ambientalmente responsabili, reattive (fig.41).

La multifunzionalità in natura è l'integrazione di più di una funzione in un unico sistema, in cui una struttura unificata è in grado di controllare molteplici funzioni. Ecco perché gli studi attuali si concentrano sulla realizzazione di elementi monofunzionali assemblati in un unico sistema, che diventa

41. L'involucro S.A.B.E.R. - *Self-activated building envelope regulation* si ispira al funzionamento della pelle umana sfruttando le proprietà dell'idrogel poroso a cambiamento di fase composto da reticoli geometrici di Poli(N-isopropilacrilammide), un termo-polimero in grado di gestire autonomamente la propria struttura in ragione della temperatura esterna, del grado di umidità atmosferica e dell'insolazione.





42

42. L'involucro adattivo del Kuggen, progettato a Gothenburg (Svezia) nel 2011 dal gruppo Wingårdh Arkitektkontor, © Lindman.

successivamente multifunzionale. Nel caso di una facciata adattiva, ad esempio, i componenti di una finestra sono progettati separatamente per soddisfare diversi requisiti, come l'illuminazione diurna e la vista esterna controllata dalle proprietà del vetro. Mentre l'abbagliamento e il guadagno solare sono controllati mediante sistemi di ombreggiatura.

L'approccio dell'architettura parametrica o computazionale mette in conto la possibilità di gestire più aspetti contemporaneamente, al fine di soddisfare i requisiti funzionali di un edificio e proteggere gli interni da fattori ambientali come vento, precipitazioni, umidità, temperatura esterna e radiazione solare. I sistemi di facciata adattiva smart mirano a soddisfare un'ampia gamma di vari requisiti funzionali (fig.42).

Chiaramente, il fronte aperto è quello dell'efficientamento e del risparmio energetico. Nel caso delle facciate intelligenti o adattive l'elemento più immediato è l'integrazione del fotovoltaico, che in un paese mediterraneo come l'Italia risulta essere una sfida interessante e complessa. Le

aree del Mediterraneo, appetibili per il forte soleggiamento risultano idonee per un approccio energetico al passo coi tempi. L'individuazione di sistemi integrati nella casa mediterranea attraverso la scelta di soluzioni innovative potrà rendere possibile la trasformazione di specifici componenti architettonici dell'involucro in componenti energeticamente attivi²⁸.

Rispetto a quanto detto nei confronti di questo componente tipicamente mediterraneo, si propone di alimentare la ricerca interdisciplinare su un approccio di tipo prestazionale integrato che, da un lato, coglie i suggerimenti dalla tradizione e individua le nuove esigenze di adeguamento del già costruito e una migliore progettazione del nuovo e, dall'altro, attinge dalla ricerca e catalogazione dei nuovi materiali presenti sul mercato e caratterizzanti la ricerca nazionale e internazionale. Attraverso questo nuovo approccio vengono individuate nuove prestazioni, unificate in un involucro multifunzionale in base alle esigenze di adattamento climatico e condizioni ambientali esterne²⁹.

Verso la sperimentazione: involucri biopolimerici

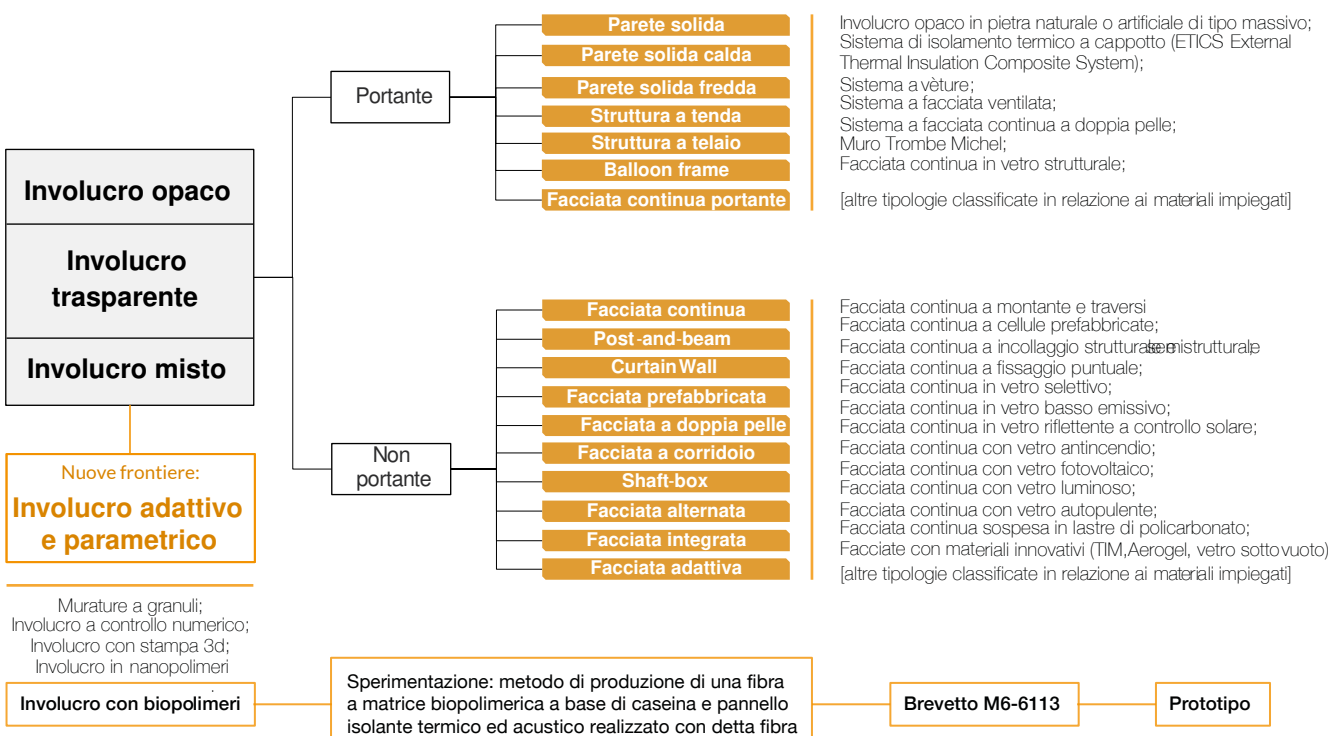
Nel panorama post industriale è vocato al concetto di edilizia circolare e di Green Economy, numerosi sono i materiali ed i sistemi di involucro indagati nello stato dell'arte. Tra le numerose istanze e campi di sviluppo, la ricerca approfondisce la tematica dell'involucro adattivo - parametrico mediante l'applicazione dei biopolimeri, un settore in continua espansione, soprattutto nell'industria delle costruzioni (fig.43). La ricerca intende indagare le potenzialità di applicazione dei materiali biocompositi prodotti a partire da materie di scarto e fonti rinnovabili, in grado di garantire un processo di dismissione biodegradabile. L'obiettivo è promuovere - attraverso la sinergia tra architettura e biologia - nuovi materiali naturali per il sistema involucro che possano limitare l'utilizzo dei polimeri sintetico-artificiali o comunque, tutti quei materiali altamente inquinanti per l'ambiente e che richiedono un elevato apporto di materia ed energia l'intero ciclo di vita.

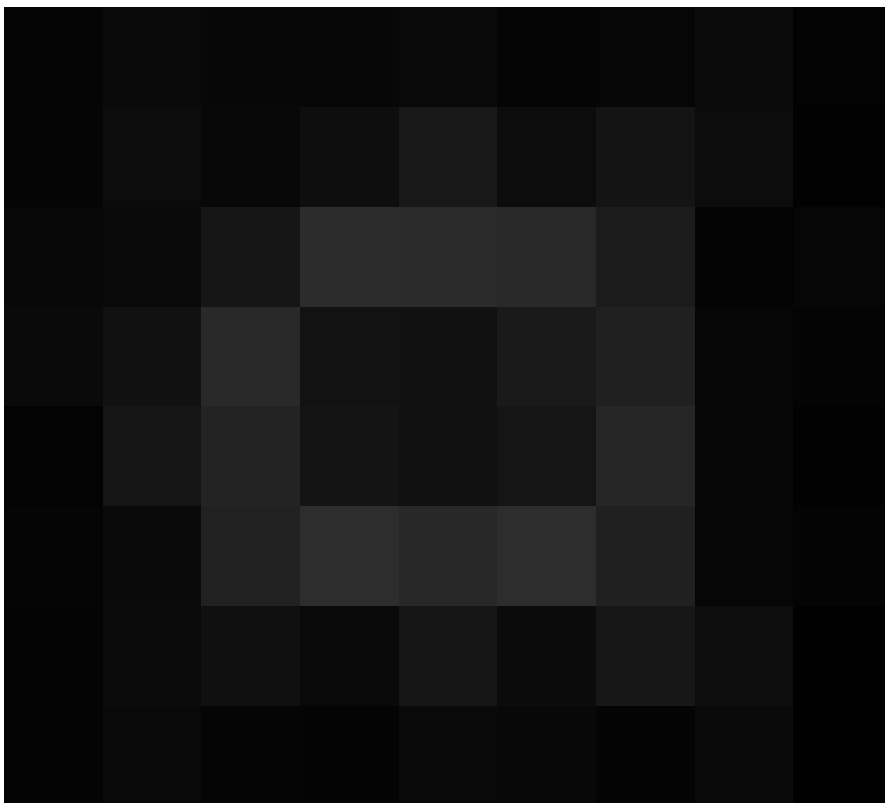
Materiali che all'attualità sono ancora allo stadio di prototipazione, ma che costituiscono le fondamenta per una nuova pratica di progettazione

integrata e sostenibile non solo in architettura, ma in innumerevoli settori, penalizzati dall'impiego di risorse non rinnovabili e inquinanti e da processi tradizionali oramai obsoleti. Aboliti i confini tra arte, scienza, architettura e tecnologia, la *summae* della ricerca è quello di fornire una visione futuristica ma al tempo stesso concreta chiarendo il processo come prodotto in un ciclo della creatività (fig.44). Progetti in grado di offrire visioni di un futuro in cui gli oggetti sono ingegnerizzati da banchi da seta e infusi con melanina o batteri, di edifici in grado di rispondere alle variazioni di luce e temperatura, di manufatti architettonici e non in grado di 'invecchiare' in maniera organica e di ritornare alla natura a fine del loro ciclo di vita, di involucri cartesiani realizzati con cere colate stampate nelle tre dimensioni (fig.45). Lo scopo di fabbricare digitalmente i biopolimeri è sovvertire il ciclo industriale di sovrapproduzione e obsolescenza attraverso l'uso di materiali naturali e al tempo stesso rafforzare e proteggere gli ecosistemi, fornendo una nuova frontiera di progettazione e produzione.

Il focus della seconda parte della ricerca sarà, quindi, la sperimentazione di una nuova fibra isolante a matrice

43. Individuazione del settore sperimentale (involucri biopolimerici) degli involucri adattivi e parametrici.

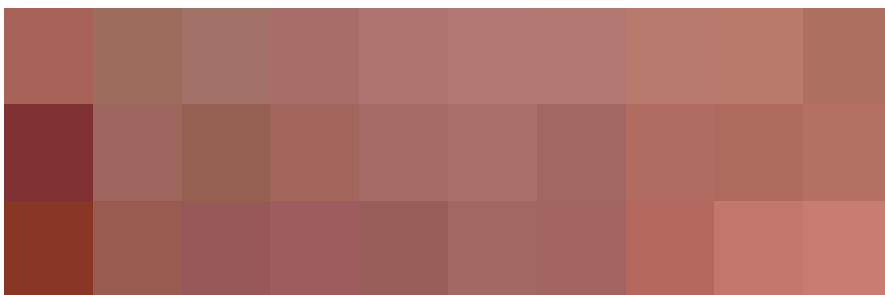




44

44. Krebs Cycle of creativity, © Neri Oxman.

45. Cartesian Wax è una superficie architettonica simile alla pelle fatta di piastrelle. Generata da un unico stampo semi-regolabile fresato in 3D, ogni piastrella è stata colata e polimerizzata ad alte temperature, un processo che deforma sempre più lo stampo originale ad ogni colata. La variazione delle proprietà geometriche e fisiche delle piastrelle è stata ottenuta modulando la temperatura attraverso lo stampo alla scala dell'intera parete, in modo tale che ciascuna piastrella risultante, sebbene di forma simile, differisca in proprietà come rigidità e opacità; riflettendo e rispondendo alle condizioni che l'hanno "formata" in primo luogo. Tali piastrelle assemblate in una sequenza di più unità rigide e flessibili è stata creata una superficie continua in grado di rispondere ad una serie di condizioni fisiche tra cui trasmissione della luce, flusso di calore, modulazione dell'energia immagazzinata e supporto strutturale, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group



45

biopolimerica partendo da un prodotto di scarto di natura organica (la caseina), in cui diviene imprescindibile l'adozione di criteri, metodologie e validazioni aggiornate, soprattutto in una contemporaneità caratterizzata da una crescente consapevolezza vocata alla sostenibilità ambientale, all'ottimizzazione delle risorse, all'utilizzo di energia 'verde' e alla implementazione di processi eco-sostenibili ed eco-compatibili. La scelta di volere indagare questo campo di ricerca al confine tra architettura e biologia è dovuta all'imposizione a livello globale dei limiti sul concetto di tutela ambientale con lo scopo di conferire la salute e il benessere all'uomo e che rappresenta un nuovo stimolo all'innovazione di prodotto quale processo di miglioramento della qualità per soddisfare la bio-com-

patibilità e la eco-sostenibilità. Lo sviluppo sostenibile sempre più normato a livello comunitario propone, inoltre, un radicale cambiamento dei modelli di consumo (da lineari a circolari), degli stili di vita, della riduzione degli sprechi di materia ed energia nella produzione dei beni, della riduzione dei rifiuti rinveniente dalle demolizioni e delle emissioni nell'ambiente.

Obiettivo della politica ambientale europea (Green Deal Economy) è far sì che il miglioramento ambientale vada di pari passo con il miglioramento delle prestazioni dei prodotti e nello stesso tempo favorisca la competitività dell'industria a lungo termine. Questo, in estrema sintesi, è l'obiettivo della *Politica Integrata dei Prodotti* (IPP) le cui linee strategiche, sviluppate in collaborazione con le imprese e i soggetti interessati, sono contenute nella Comunicazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento Europeo³⁰. La produzione dei biopolimeri, quindi, è alla base della visione della Commissione Europea, che accoglie con favore il passaggio da un'economia lineare ad una economia circolare, esortando i legislatori a prendere in considerazione misure che catalizzino il processo di sviluppo sostenibile della bioeconomia europea. I biopolimeri si adattano perfettamente al concetto economico circolare, allontanandosi dall'economia lineare caratterizzata dal processo di *creazione-utilizzazione-eliminazione* a favore del processo di *creazione-utilizzazione-riciclo*. Per garantirlo è indispensabile concentrarsi sia sul *ciclo tecnico* che sul *ciclo biologico* per la produzione di nuovi materiali sostenibili, supportati da un quadro politico che migliori l'efficienza della gestione dell'intero ciclo e affrontando le barriere legali e di mercato che ostacolano la diffusione di materiali a matrice biopolimerica. La presente ricerca, quindi, vuole offrire un valido contributo nella sperimentazione di materiali a matrice biopolimerica da inserire nel sistema involucro secondo diverse forme: rivestimento, isolamento, esoscheletro, etc.

- 1 Herzog T., Krippner R., Lang W., Atlante delle facciate, Utet, Milano, 2005, pag.36.
- 2 Mazzucchelli E.S., *“L’involucro di edifici complessi: aspetti progettuali e costruttivi”*, in Modulo n.415, BE-MA Editrice, Milano, Ottobre 2018, pagg.78-83.
- 3 *“L’involucro di edifici complessi: i compiti dell’involucro”*, in Mazzucchelli E.S., Lezione *“L’involucro di edifici complessi”* del Corso di Progetto di Edifici Complessi, Scuola di Architettura Urbanistica Ingegneria delle Costruzioni del Politecnico di Milano.
- 4 UNI 7867 parte 4: definisce il *sistema tecnologico* come «insieme strutturato di unità tecnologiche o di elementi tecnici secondo la fase operativa metaprogettuale o progettuale del processo edilizio a cui si riferisce».
- 5 UNI 8290-1:1981: Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia.
- 6 UNI EN 13119:2016: Facciate continue - Terminologia. La norma descrive la terminologia utilizzata in documenti, disegni, specifiche, riferita agli elementi di facciate continue.
- 7 Gaspari J., Trabucco D., Zannoni G., *Involucro edilizio e aspetti di sostenibilità. Riflessioni sul comportamento energetico di pareti massive e stratificate iperisolate: performances ambientali ed embodied Energy*, Franco Angeli, Milano, 2010, pagg.9-24.
- 8 *«Modelli funzionali»*: definiti nella norma UNI 8290 secondo cui un organismo edilizio è costituito da un insieme strutturato di elementi spaziali e di elementi tecnici, caratterizzati dalle loro funzioni e relazioni reciproche e costituenti il sistema edilizio dell’organismo stesso.
- 9 UNI 8290-1:1981: Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia.
- 10 Il protocollo ITACA affronta il problema del surriscaldamento estivo considerando proprio come indicatore di prestazione lo scarto medio tra la temperatura operativa e la temperatura ideale negli ambienti nel periodo estivo.
- Inoltre prevede dei punti anche in funzione dei ricambi d’aria in base alla classificazione della norma UNI 15251. Il protocollo LEED affronta, invece, criticità dal punto di vista impiantistico considerando gli aspetti legati alla ventilazione degli ambienti e ai ricambi orari.
- 11 Il documento chiave per il riconoscimento delle problematiche della sostenibilità ambientale è forse individuabile ancor oggi nel rapporto del 1987 della commissione ONU presieduta da G.Brundtland, *“Our Common Future”*, che individua nei decisori del tempo presente i responsabili delle possibilità di sviluppo concesse alle generazioni future. Il rivoluzionario messaggio trasmesso implicava quindi la presa di coscienza del ruolo dell’uomo nel mondo e il riconoscimento delle conseguenze potenzialmente irreversibili delle sue azioni. Declinando e ampliando il significato economico del termine, la commissione Brundtland introduceva il concetto di sostenibilità dello sviluppo e delle azioni umane.
- 12 *«Trasmittanza termica (U)»*: indica la quantità di calore che viene dispersa in un metro quadrato di involucro dell’edificio ed è definita dall’inverso della somma delle resistenze termiche (R) degli strati che costituiscono la chiusura. A bassi valori di trasmittanza corrisponde una minore dispersione di calore e una migliore coibentazione. La *resistenza termica (R)* è determinata dal rapporto tra spessore dello strato e la conduttività termica del materiale ($R=s/\lambda$ dove “s” è lo spessore dello strato e “λ” la conduttività/conducibilità termica del materiale. La resistenza termica è espressa in m^2/mK).
- 13 *«Capacità termica»*: è una proprietà caratteristica di alcuni materiali che descrive l’attitudine di un sistema omogeneo a trattenere il calore all’interno della propria struttura senza cederlo immediatamente all’ambiente circostante. «Tale proprietà - che dipende da vari parametri fisici -

- è direttamente proporzionale alla massa per area unitaria (la densità superficiale, espressa in kg/m³) e alla capacità termica specifica (espressa in J/kg°K). Se il sistema presenta una elevata capacità termica, all'interno dello stesso si verificherà un ritardo nella trasmissione del calore da un lato all'altro del suo spessore innescando il fenomeno che prende il nome di "inerzia termica", in Francese D., *Architettura bioclimatica. Risparmio energetico e qualità della vita nelle costruzioni*, UTET, Torino, 1996.
- 14 Gaspari J., Trabucco D., Zannoni G. (2010), op. cit. (vedi nota 7).
 - 15 Centro Ricerche Economiche Sociali di Mercato per l'Edilizia e il Territorio. Il 60% del patrimonio edilizio esistente italiano, equivalente a oltre sette milioni di edifici, è stato realizzato più di quaranta anni fa. Questa percentuale cresce fino al 70% per le città capoluogo e fino al 76% per le grandi città metropolitane e, secondo i dati rilevati ISTAT e CRESME, si prevede che nei prossimi dieci anni possa arrivare fino all'85%.
 - 16 Mazzucchelli E.S. (2018), op. cit. (vedi nota 2), pagg.81-82.
 - 17 Weismantle P., Thompson K., Torrem E., *Facade Access & Maintenance for High-Rise Buildings*, CTBUH Technical Guides, Chicago, 2018.
 - 18 «*Retrofitting*»: etimologicamente il termine retrofitting deriva dal sostantivo inglese *retrofit* costituito dalla prima parte del termine *retroactive* (retroattivo) "retro" e dal termine *fitting* (adattamento). Si riferisce a differenti prassi operative, non esclusive del settore energetico-ambientale, in rapporto al quale prende la specifica aggettivazione di retrofitting tecnologico ed energetico, ma estensibili anche ad altri campi tecnici, come ad esempio quello strutturale (il retrofitting strutturale-architettonico, funzionale all'adeguamento sismico, rappresenta ad esempio un ambito importante e di grande attualità nella ristrutturazione del patrimonio edilizio storico. Il concetto di *retrofit* definisce prassi operative caratterizzate dal riferimento e dall'applicazione di tecnologie e soluzioni tecniche innovative, dalla realizzazione di nuovi elementi ed assetti architettonici e impiantistici, dalla modificazione delle originarie caratteristiche dell'assetto fisico e funzionale degli edifici, dal potenziamento delle prestazioni, estese a differenti categorie di esigenze e requisiti, dei componenti e degli spazi edilizi, in D'Olimpio D., *Il retrofitting energetico e bioclimatico nella riqualificazione edilizia. Tecnologie e soluzioni tecniche per il miglioramento della prestazione energetico-ambientale degli edifici*, Legislazione Tecnica, Roma, 2017, pag.15.
 - 19 Mazzucchelli E.S. (2018), op. cit. (vedi nota 2), pag.78.
 - 20 Loonen R.C.G.M., Rico-Martinez J.M., Favoino F., Brzezicki M., Menezo C., La Ferla G., Aelenei L.L., *Design for façade adaptability: Towards a unified and systematic characterization*, in 10th Conference on Advanced Building Skins, 3-4 Novembre 2015, Berna, Svizzera, pagg. 1284-1294).
 - 21 Beesley P., Hirosue S, Ruxton J., Trankle M., Turner C., *Responsive Architectures: Subtle Technologies*, Riverside Architectural Press, 2006, pag.239.
 - 22 Aelenei L., Aelenei D., Romano R., Mazzucchelli E.S., Brzezicki M., Rico-Martinez J.M., *Case Studies - Adaptive Facade Network*, COST European Cooperation in Science and Technology, TU Delft Open, 2018.
 - 23 Sterk T., *Using Actuated Tensegrity. Structures to Produce a Responsive Architecture*, ORAMBRA, 2009.
 - 24 Altomonte S., *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica: strumenti e criteri per una architettura sostenibile*, Firenze, ALINEA, 2004.
 - 25 Aelenei L., Aelenei D., Romano R., Mazzucchelli E.S., Brzezicki M., Rico-Martinez J.M. (2018), op. cit. (vedi nota 22).
 - 26 Iannaccone G., *Involucri adattati*, in *Architettura e tecnologia*, Roma, 2018, pag. 100-101.

- tivi per architetture flessibili*, in Greco A., Quagliarini E. (a cura di) *L'involucro edilizio. Una progettazione complessa*, Ar.Tec - Associazione Scientifica per la Promozione dei Rapporti tra Architettura e Tecniche dell'Edilizia, Alinea Editrice, Firenze, 2007, pag.105.
- 27 Di Salvo Santina, *La progettazione computazionale per le facciate adattive*, in *Architettura resiliente* (it.architetturaresiliente.com).
- 28 Mazzucchelli E.S., *Facciate adattive*, *The Next Building Year* II n. 2, DBInformation SpA, Milano, 2017, pag.13.
- 29 «Eco-sostenibilità»: si intende quella caratteristica dei processi edilizi, o parte di essi, tali da lasciare almeno invariata, nel lungo periodo, la quantità di risorse disponibili. Per biocompatibilità, invece, si intende quella caratteristica tecnologica (dei materiali, componenti, elementi o sistemi) e/o ambientale (delle unità ambientali, degli edifici e degli insediamenti) tale da comportare un equilibrato inserimento nel contesto naturale, evitando non solo qualunque forma di "rigetto", ma anche qualsiasi effetto nocivo sulla vita, ed in particolare sulla salute ed il comfort dell'uomo. I due concetti sono strettamente collegati essendo inscindibile il rapporto uomo-natura, e vengono distinti soltanto per cercare di approfondire il più possibile l'individuazione di tutti i possibili fattori di rischio.
- 30 L'approccio IPP, sviluppato gradualmente durante gli ultimi dieci anni, si basa su cinque principi generali: 1) considerazione del ciclo di vita (*life-cycle thinking*) dei prodotti; 2) collaborazione con il mercato (introduzione di incentivi per orientare il mercato verso soluzioni più sostenibili: in particolare, incoraggiando la domanda e l'offerta di prodotti più ecologici e premiando le imprese più innovative e impegnate a promuovere la sostenibilità); 3) coinvolgimento delle parti interessate (incoraggiare coloro che entrano in contatto con il prodotto - le industrie,
- i consumatori e le autorità pubbliche - ad intervenire nell'ambito della propria sfera di influenza, promuovendo la cooperazione tra le varie parti; 4) miglioramento continuo (ciascun impresa può stabilire i miglioramenti in relazione al rapporto costo - efficacia); 5) molteplicità degli strumenti di azione (non si tratta di creare nuovi strumenti ma di attivare in modo efficace quelli già esistenti, dagli strumenti volontari a quelli normativi, dagli interventi su scala locale fino alle azioni a livello internazionale).

03

03 Sperimentazione di una lana isolante a matrice biopolimerica in fibra caseinica applicata per l'isolamento termo-acustico in edilizia

Sinòpsi L'obiettivo della seguente ricerca è la sperimentazione di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina per la realizzazione di un pannello isolante termico ed acustico prodotto con detta fibra. Nel presente capitolo è stata condotta una attenta analisi delle caratteristiche microstrutturali e macrostrutturali dei polimeri, dei copolimeri e dei biopolimeri. Sono stati approfonditi, inoltre, gli aspetti morfologici, chimici e fisici dei biopolimeri di derivazione organico-naturale e quali sono i possibili impieghi in un mercato sempre più maggiormente vocato alla sostenibilità ecologica dei processi e dell'intero ciclo di vita di un materiale. L'analisi ha opportunamente mitizzato l'importanza del ruolo che ricoprono i biopolimeri nell'immediato futuro e nel loro impiego nei diversi settori che vanno dal packaging all'agricoltura, dall'industria elettrica a quella dei trasporti, dal design alle costruzioni. Tutti questi settori, che rappresentano i modelli di mercato maggiormente diffusi, sono anche tra i maggiori responsabili dell'impatto ambientale e dei potenziali danni ambientali prodotti dall'intero ciclo di trasformazione delle materie prime a partire dalla loro estrazione, passando per il trasporto e trasformazione in energia e prodotti finiti fino ai possibili danni che produce la loro definitiva eliminazione o smaltimento. Per tale motivo, le moderne industrie hanno virato la propria attività produttiva verso modelli di sviluppo economico ecosostenibili. La Green Economy, infatti, valuta l'impatto che le azioni umane e dei relativi processi di produzione hanno sull'ambiente, cercando di innescare un modello virtuoso che permetta di gestire al meglio le risorse, ottimizzando quanto più possibile la produzione, accrescendo il PIL e diminuendo drasticamente le emissioni di CO₂ nell'ambiente preservando, quindi l'ecosistema e la biodiversità. Tra i diversi settori, oggetto di approfondimento della seguente ricerca, è l'architettura

ra e l'industria delle costruzioni.

Nella nascente bioedilizia, un nuovo modo di approcciarsi al mercato che si distingue per i suoi principi sostenibili e che ha saputo dare un contributo notevole alla Green Economy e quello della produzione e commercializzazione di materiali isolanti green. Nella storia, tali materiali sono considerati inquinanti poiché la maggior parte sono di derivazione fossile o contenenti materiali altamente tossici. Per tale motivo, trovano sempre maggior diffusione materiali biocomposti, come quelli derivanti da fibre di legno, dalla canapa, dal kenaf, dal cotone, dalla lana, dal lino e addirittura da alghe marine e scarti di fico d'india.

Oggetto d'indagine del seguente capitolo è la sperimentazione di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina che ha come dato, l'analisi di una fibra tessile storica, il Lanital, una fibra italiana commercializzata tra il 1937 e il Dopoguerra per far fronte alle Sanzioni Economiche dell'Italia Fascista del 1935.

La nuova fibra sperimentata in laboratorio, dai connotati propriamente naturali e sostenibili, si inserisce nel vasto panorama dei materiali isolanti, offrendo, mediante validazione scientifica, una efficace alternativa ai materiali isolanti convenzionali impiegati per l'isolamento termico ed acustico dell'involucro architettonico.

Saranno, quindi, analizzate le proprietà del nuovo materiale e opportunamente paragonate con i valori rinvenuti dalla letteratura tecnico-scientifica e dall'analisi conoscitiva delle fibre caseiniche quali il Lanital e la Merinova. Sempre mediante analisi di laboratorio, saranno validati i dati, indispensabili per la prototipazione e/o la brevettazione per invenzione industriale, costituenti il *diktat*, il complesso di condizioni imposte per procedere alla creazione di prodotti industriali finiti, prossimi - o quasi - ad una eventuale immissione sul mercato.

3.1. La nuova frontiera dei biopolimeri a base biologica

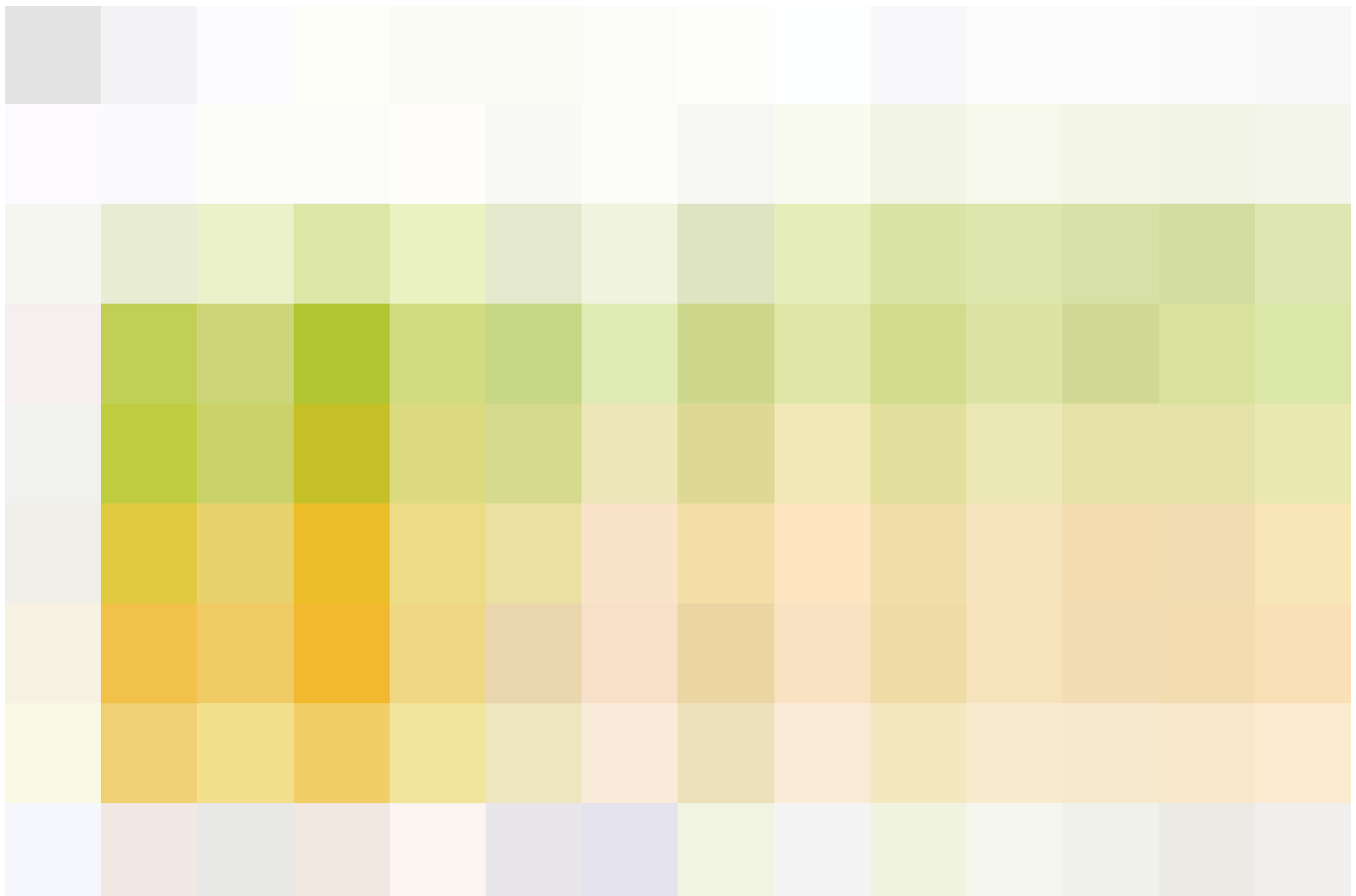
Generalità

Oggi, il mercato dei biopolimeri (o “bioplastiche”) è ancora un mercato di nicchia, principalmente incentrato sul packaging e all’agricoltura con un tasso di sviluppo esponenziale del 340%. L’obiettivo è la fornitura di materiali simili alle plastiche convenzionali, ma con il vantaggio di ridurre la dipendenza da risorse fossili e di ridurre le emissioni di gas serra. Attualmente le bioplastiche rappresentano circa l’1% di circa 360 milioni di tonnellate di plastica prodotta ogni anno. Tuttavia, con l’aumentare della domanda di biopolimeri e delle loro diverse applicazioni, il mercato è in continua crescita. Secondo gli ultimi dati di mercato raccolti dall’*European Bioplastics Association* (EUBP) in collaborazione con l’Istituto di ricerca *Nova-Institute*, la capacità di produzione globale di bioplastiche dovrebbe aumentare da circa 2,11 milioni di tonnellate nel 2019 a circa 2,43

milioni di tonnellate nel 2024 (fig.3). I biopolimeri o le bioplastiche sono una grande famiglia di materiali e sostanze diverse, con proprietà e applicazioni differenti. Il confisso “*bio-*” sta ad indicare polimeri o plastiche che presentano una base biologica e biodegradabile o entrambe le proprietà. La base biologica suggerisce la derivazione dei polimeri dalle biomasse, quali piante, mais, canna da zucchero, etc.; biodegradabile, invece, indica il processo chimico di biodegradazione, durante il quale i microrganismi convertono il materiale in sostanze naturali come acqua, biossido di carbonio e compost.

2. La *Posidonia oceanica* appartenente alla famiglia delle lignocellulosiche per la produzione di biopolimeri o bioplastiche impiegati negli imballaggi.
3. Capacità produttive globali di biopolimeri o bioplastiche dal 2019 al 2024, in “Report”, European Bioplastics Association (EUBP), Berlino, Febbraio 2020.

2



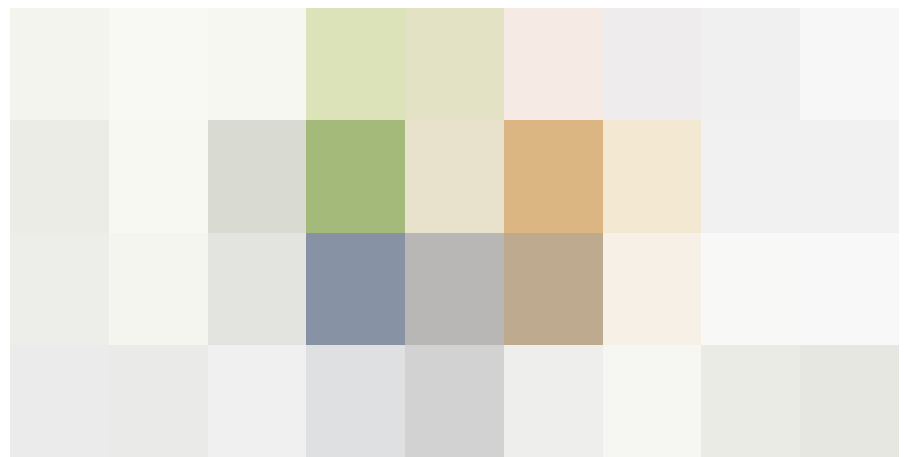
3

Tipologie tradizionali e innovative dei biopolimeri

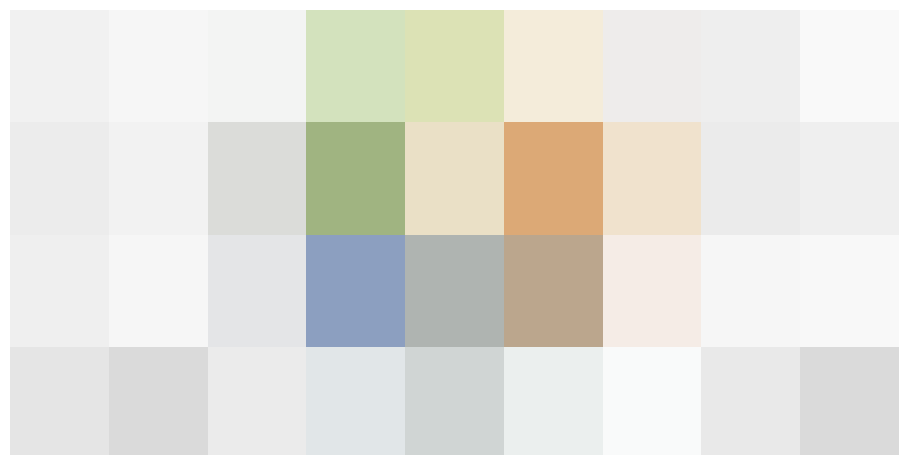
Secondo l'European Bioplastics Association (EUBP) esistono tre tipologie di biopolimeri o bioplastiche:

- *Polimeri a base biologica (o parzialmente a base biologica), non biodegradabili:* come polietilene a base biologica (PE), polipropilene (PP), polietilene tereftalato (PET), biopolimeri prestazionali a base tecnica, come per esempio i poliammidi (PA) o politrimetilentereftalato (PTT);
- *Polimeri a base biologica e biodegradabili:* come acido polilattico (PLA), poliidrossialcanoati (PHA), polibutilene succinato (PBS), miscele di origine vegetale (pectina, cellulose, amido, etc.), miscele di origine animale (chitina, caseina, sieroproteine, etc.);
- *Polimeri a base fossile e biodegradabili:* come il polibutilene adibato tereftalato (PBAT).

I polimeri a base biologica non biodegradabili, rappresentano oltre il 44% (quasi 1 milione di tonnellate) della capacità di produzione globale di bioplastiche (fig.4), mentre i polimeri a base biologica biodegradabili, rappresentano oltre il 55,5% (oltre 1 milione di tonnellate) della capacità di produzione globale delle bioplastiche (fig.5). Si prevede che la produzione di polimeri biodegradabili aumenterà di 1,33 milioni nel 2024, grazie anche alla crescita del PHA. Sono innumerevoli le intenzioni di aumentare la capacità di produzione di tali polimeri, integrandone di nuovi, come il polietilene furanoato (PEF) destinato a sostituire il PET in quanto si configura al 100% a base biologica e con caratteristiche fisiche e meccaniche migliori. I polimeri a base biologica e biodegradabili, come il polipropilene (PP) e i poliidrossialcanoati (PHA), invece, mostrano i più alti livelli di crescita destinati a sestuplicarsi entro il 2024. Nel 2019, infatti, il polipropilene è entrato nel mercato con un forte potenziale di crescita in vari di settori.



4



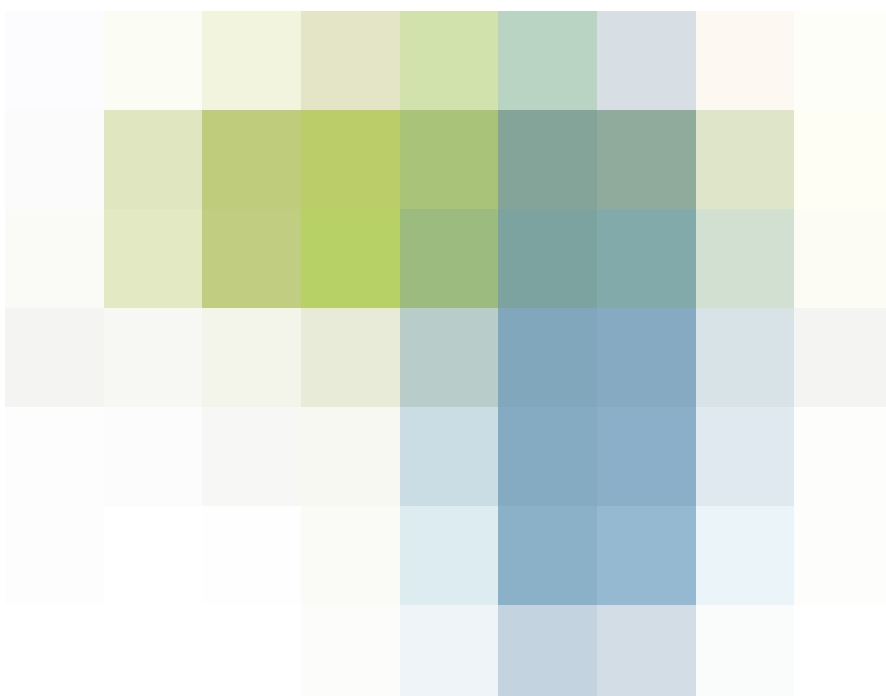
5

4. Capacità produttive globali di biopolimeri o bioplastiche nel 2019, in "Report", European Bioplastics Association (EUBP), Berlino, Febbraio 2020.
5. Capacità produttive globali di biopolimeri o bioplastiche nel 2024, in "Report", European Bioplastics Association (EUBP), Berlino, Febbraio 2020.

Il grafico in (fig.6), mostra un sistema di coordinate in cui si descrivono le tipologie più comuni di biopolimeri e il relativo grado di biodegradabilità. Come detto esistono i polimeri a base biologica, non biodegradabili, come polietilene (PE), polipropilene (PP) e il polivinilcloruro (PVC), che possono essere anche prodotti da risorse rinnovabili come il bioetanolo, ottenendo il Bio-PE, il Bio-PP e il Bio-PVC già in produzione su larga scala, i poliammidi a base biologica (PA), poliesteri (PTT, PBT), poliuretani (PUR) e i poliepossidi, utilizzati come fibre tessili, schiume, involucri, tubi, etc. L'altra tipologia è rappresentata, invece, dai polimeri a base biologica e biodegradabili, costituiti da miscele di amido e poliesteri quali l'acido polilattico (PLA) o poliidrossialcanoato (PHA), che sono in sviluppo negli ultimi anni su scala industriale anche grazie all'introduzione di nuovi monomeri a base biologica (succinico, butandiolo, propano diolo, etc.) e che promettono di innovare il potenziale delle bioplastiche, producendo innovativi materiali. Per concludere, i polimeri a base fossile, biodegradabili, rappresentano la prima generazione di biopolimeri, ancora prodotti mediante processi di produzione petrolchimica, di cui esistono versioni parzialmente rivisitate in chiave biologica.

Economia circolare e sviluppo di processi sostenibili dei biopolimeri

La produzione dei biopolimeri è alla base della visione della Commissione Europea, che accoglie con favore il passaggio da un'economia lineare ad una economia circolare, esortando i legislatori a prendere in considerazione misure che catalizzino il processo di sviluppo sostenibile della bioeconomia europea. Le bioplastiche si adattano perfettamente al concetto di economia circolare, allontanandosi dall'economia lineare caratterizzata dal processo di "creazione-utilizzazione-eliminazione" a favore del processo di "creazione-utilizzazione-riciclo". Per garantirlo è indispensabile concentrarsi sia sul *ciclo tecnico* che sul *ciclo biologico* per la produzione di nuovi materiali sostenibili, supportati da un quadro politico che migliori l'efficienza della gestione dei rifiuti affrontando le barriere legali e di mercato che ostacolano la diffusione di bioplastiche. Il piano d'azione per lo sviluppo delle bioplastiche dovrebbe, inoltre, garantire agli Stati membri dell'UE pari accesso sia alle materie prime biologiche a prezzi sostenibili (affinché possano attrarre investimenti da società globali), sia fornire strumenti di supporto logistico alle industrie che utilizzano biomasse.



6. Sistema di coordinate dei biopolimeri, in "Scheda informativa", European Bioplastics Association (EUBP), Berlino, Luglio 2018.



7

7. Sistema circolare dei biopolimeri secondo la Direttiva Europea 2008/98/EC, Waste Framework Directive, in European Bioplastics Association (EUBP), "Bioplastics and the circular economy" Berlino, Aprile 2016.

La Direttiva Europea 2008/98/EC, Waste Framework Directive, ha definito una gerarchia di cinque processi per il trattamento dei rifiuti (fig.7):

- *Prevenzione, minimizzazione e riutilizzo*: la gestione dei rifiuti richiede l'utilizzo di processi e materiali che minimizzano l'uso delle risorse e massimizzano le prestazioni funzionali del prodotto. Le materie plastiche risultano idonee, a parità di resistenza e funzionalità, ad essere impiegate più volte.
- *Riciclaggio meccanico*: la maggior parte delle bioplastiche prodotte oggi è riciclabile meccanicamente. I polimeri a base biologica sono identici fisicamente e chimicamente ai loro corrispettivi a base fossile, con l'unica differenza che i polimeri a base biologica presentano una impronta di carbonio inferiore e possono subire più flussi di riciclaggio.
- *Riciclaggio biologico*: noto anche come riciclaggio organico, rappresenta una opzione "circolare" di "fine vita" per i prodotti plastici biodegradabili e compostabili, sfruttando l'abbinamento di processi biologici quali la *digestione anaerobica* (da parte di microrganismi) e il *compostaggio* (bio-ossidazione e umificazione di materie organiche). Il processo di biodegradazione di un impianto di compostaggio industriale converte la plastica in biossido di carbonio, acqua, residui organici stabilizzati (in presenza di ossigeno), e biomasse e metano (in assenza di ossigeno);
- *Riciclaggio chimico*: si intende il processo che prevede l'utilizzo di tecnologie in grado di convertire la plastica in materie prime, quali *monomeri*, *oligomeri* e *idrocarburi* che possono essere impiegati per produrre polimeri simili agli originali.
- *Recupero energetico*: se le diverse tipologie di riciclaggio (meccanico, biologico e chimico) non sono possibili, la migliore opzione secondo la gerarchia del trattamento dei rifiuti, è l'incenerimento dei rifiuti di bioplastica, in grado di generare energia parzialmente rinnovabile mediante il recupero di calore. La quota rinnovabile del materiale bioplastico rilascia la stessa quantità di anidride carbonica originariamente sottratta all'ambiente chiudendo, così, il ciclo naturale del carbonio.

Campi di applicazione e settori di mercato dei biopolimeri

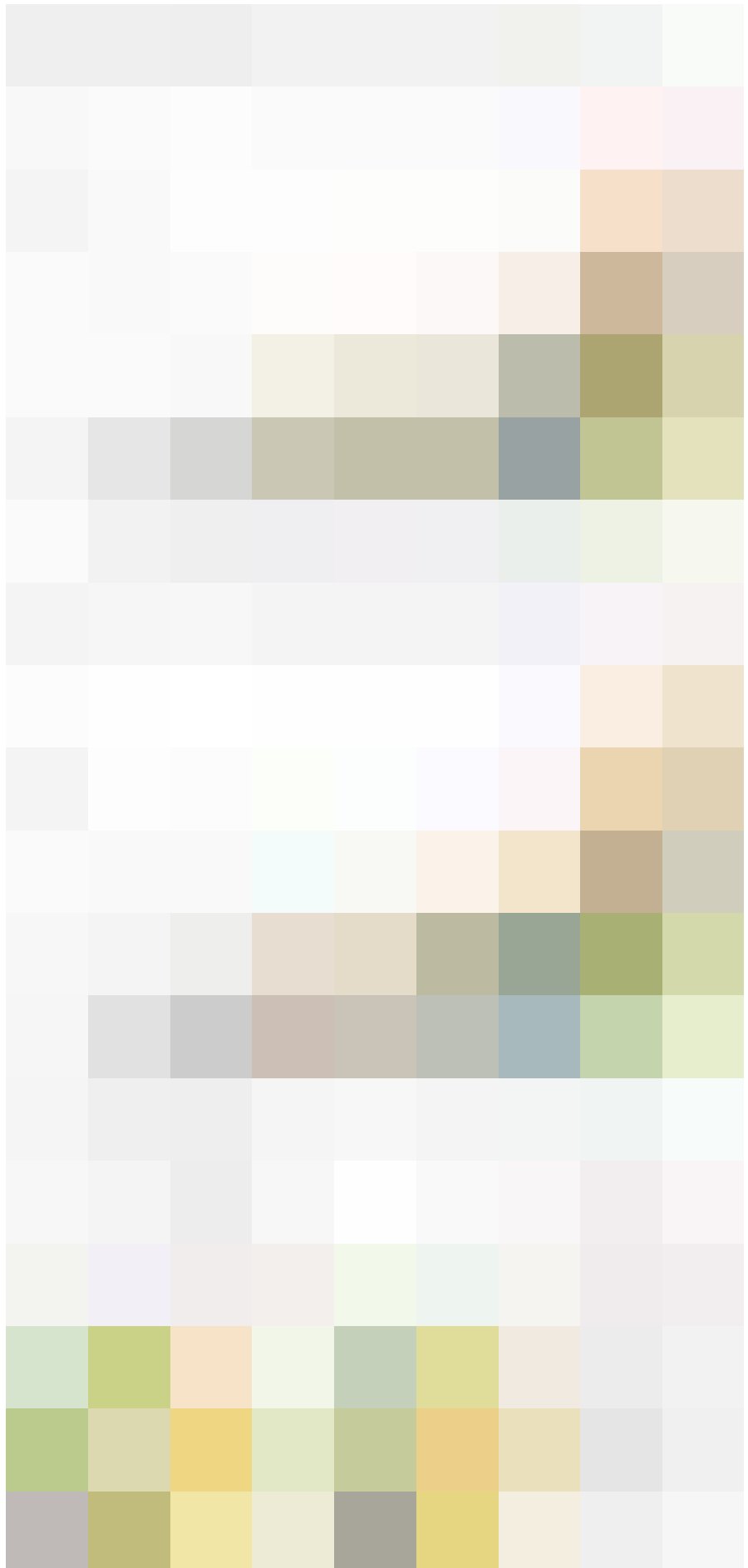
I biopolimeri e le bioplastiche sono presenti in un numero crescente di mercati* come imballaggi, prodotti per la ristorazione, elettronica di consumo, agricoltura, tessile e numerosi altri segmenti. Il packaging, comunque, è il settore più importante con oltre il 53% (circa 1,14 milioni di tonnellate) del mercato totale delle bioplastiche nel 2019.

L'innovatività del settore, la sensibilizzazione verso nuovi modelli di crescita sostenibile e alla diffusa consapevolezza dell'impatto sull'ambiente e alla necessità di ridurre la dipendenza dalle risorse fossili, stanno portando ad una costante diversificazione dei segmenti ed alla introduzione - anche significativa - di nuovi, come l'edilizia e il settore automobilistico (fig.8).

La crescita esponenziale è dimostrata dalla presenza di bioplastiche in alternativa alla quasi totalità delle plastiche convenzionali le quali proprietà meccaniche, fisiche e chimiche restano immutate, a vantaggio di una considerevole riduzione dell'impronta di carbonio e con una sostenibile gestione dei rifiuti mediante innovativi processi di riciclaggio meccanico, biologico e chimico.

Anche il crescente numero di materiali, applicazioni e prodotti, hanno permesso la nascita di un numero sempre maggiore di produttori, convertitori e utenti, supportati da significativi investimenti finanziari e politici sia nella produzione che nella commercializzazione.

In particolare l'adozione della direttiva sulla riduzione delle materie plastiche monouso (detta anche "*Direttiva SUP - Single Use Plastics*"), l'introduzione di "*Regimi di responsabilità estesa del produttore (EPR)*", l'etichettatura obbligatoria per informare i consumatori sugli impatti negativi in caso di abbandono e la presentazione di un sistema di classificazione a livello europeo per gli investimenti sostenibili (definito come

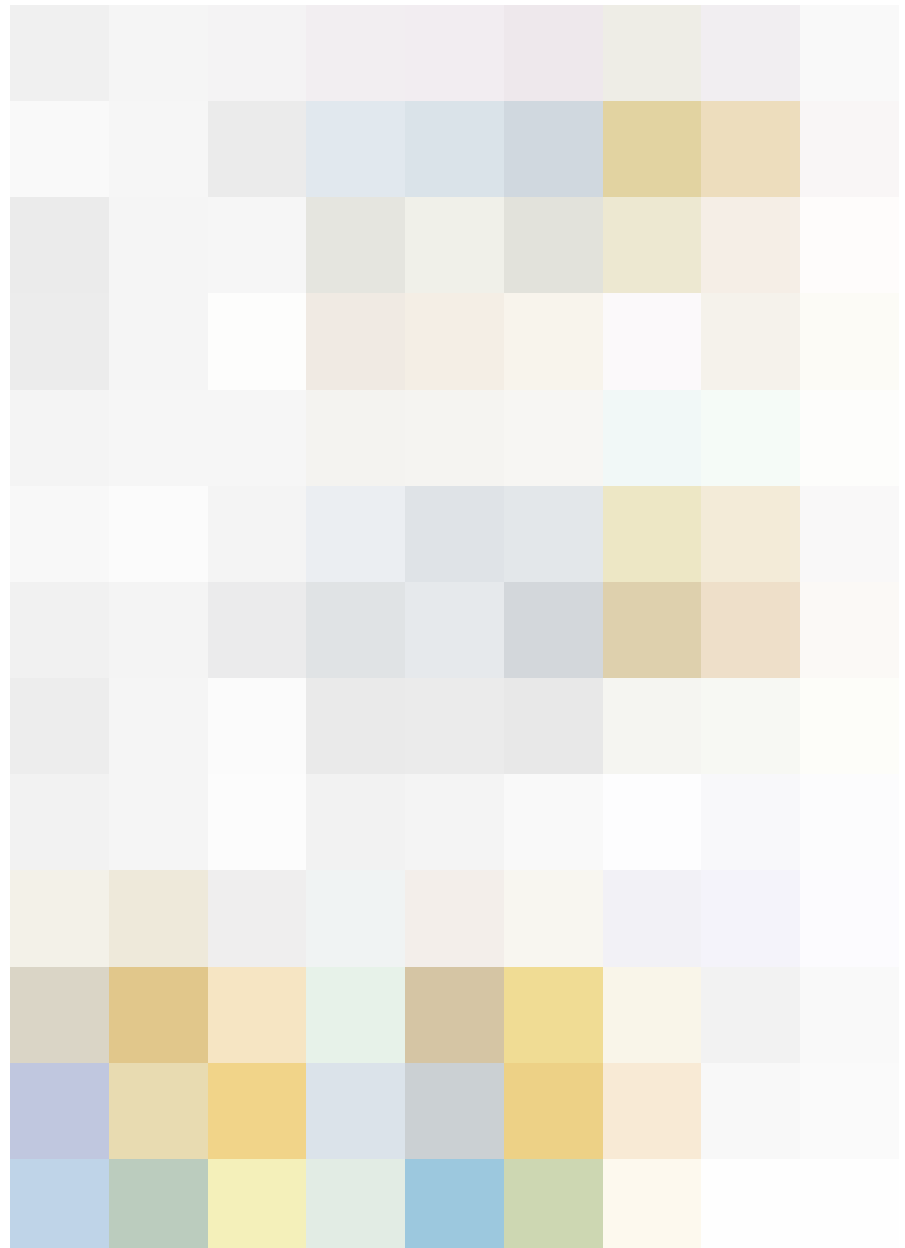


“Green Deal” o “EGDIP - European Green Deal Investment Plan”), hanno consentito una forte propulsione nell’adozione di nuovi modelli sostenibili circolari per la produzione e la commercializzazione di biopolimeri a base biologica e biodegradabili.

L’industria emergente delle bioplastiche, inoltre, ha il potenziale necessario per sviluppare un immenso impatto economico nei prossimi decenni. Secondo un’analisi del mercato del lavoro condotta da *Europa-Bio*, l’industria europea delle bioplastiche potrebbe sviluppare una forte crescita dell’occupazione. Infatti, rispetto nel 2013 in cui l’industria delle bioplastiche conta-

va circa 23.000 posti di lavoro in Europa, nel 2030 il dato potrebbe aumentare di oltre dieci volte, creando fino a 300.000 posti di lavoro altamente qualificati nel settore europeo dei biopolimeri.

L’Europa rappresenta il più importante hub dell’intero settore delle bioplastiche e il più efficiente campo di ricerca e sviluppo di innovativi materiali. Un quarto della capacità di produzione globale delle bioplastiche si trova in Europa; tuttavia, in vista dell’effettiva produzione di bioplastica e dello sviluppo delle capacità regionali, l’Asia continua a imporsi come principale centro di produzione con il 45% di bioplastiche prodotte (fig.9).



- 8. Capacità di produzione globale di biopolimeri nel 2019 e nel 2024 per segmenti di mercato, in “Report”, European Bioplastics Association (EUBP), Berlino, Febbraio 2020.
- 9. Capacità di produzione globale di biopolimeri nel 2019 e nel 2024 per area geografica, in “Report”, European Bioplastics Association (EUBP), Berlino, Febbraio 2020.

Applicazione dei biopolimeri nel settore dell'edilizia

Nel settore dell'edilizia, i materiali polimerici sono particolarmente diffusi e si collocano al secondo posto dopo il settore del *packaging* per capacità di produzione globale (fig.10). Il contributo fornito dai materiali polimerici si è concretizzato attraverso la produzione di numerosi prodotti, quali sigillanti, resine, isolanti, elementi di chiusura, serramenti, solo per citarne alcuni - tutti accomunati per la notevole leggerezza, facilità e rapidità di posa in opera ed estrema lavorabilità.

Le tipologie di polimeri utilizzati sono le *termoplastiche* (a cui appartengono materiali polimerici come il polietilene - PE, il polietilene tereftalato - PET, il polipropilene - PP, il polistirene - PS e il polivinilcloruro - PVC), le *termoindurenti* (resine epossidiche e fenoliche) e gli *elastomeri* (gomme naturali, sintetiche e silossaniche). Il materiale polimerico maggiormente utilizzato nel settore dell'edilizia è il polivinilcloruro - PVC, impiegato diffusamente nel settore dei serramenti.

I materiali polimerici termoplastici maggiormente utilizzati in edilizia sono:

- Polietilene (PE): polimero dell'etilene; è forse la materia plastica più diffusa nel mondo. Il tipo ad alta densità (HD PE) è destinato alla produzione di serbatoi, tubazioni, guaine per l'isolamento di cavi elettrici; in grandi fogli è impiegato nell'impermeabilizzazione di bacini;
- Polipropilene (PP): polimero del propilene; è conosciuto commercialmente come *meraklon* (fibra tessile) e *moplen* (oggetti rigidi). È ampiamente utilizzato nell'edilizia per produrre tubazioni di scarico e condotti per impianti;
- Policarbonato (PC): copolimero di bisfenolo e acido carbonico. Il 20% della sua produzione è destinata all'edilizia, sotto forma di manufatti trasparenti e resistenti all'urto: lucernai, lastre alveolari (*honeycomb*), pareti trasparenti per serre e vetrate industriali;

10. Capacità di produzione globale di biopolimeri nel 2019 per segmenti di mercato ed in particolare nel settore dell'edilizia e costruzioni.



- Polimetilmetacrilato (PMMA): polimero del metile; è tra le materie plastiche di più antica produzione (1928). Conosciuto commercialmente come *plexiglass*, *perspex* e *acriloyd*, ha gli stessi impieghi del policarbonato, con proprietà di trasparenza e di durabilità, ma anche costi inferiori;
- Polistirene (PS): polimero dello stirene; è utilizzato nell'edilizia per pavimentazioni resilienti e, nella *forma estrusa* (XPS) o *espansa* (EPS), come isolante;
- Polivinilcloruro (PVC): polimero del cloruro di vinile; è presente sul mercato dal 1930. La presenza di cloro migliora la sua reazione al fuoco. Il 47% della sua produzione è destinata all'edilizia, sotto forma di tubazioni, guaine per il rivestimento di cavi elettrici, profilati per finestre, persiane, tapparelle, porte, pavimenti resilienti, rivestimenti murali;
- Polivinilacetato (PVA): polimero dell'acetato di vinile; è impiegato prevalentemente per la fabbricazione di adesivi e vernici.

I *materiali polimerici termoindurenti* maggiormente utilizzati in edilizia sono:

- Poliuretani (PU): si ottengono per reazione tra isocianati e alcoli e trovano impiego nella produzione di vernici e adesivi. Nella versione espansa (PUR) sono usati come isolanti;
- Poliesteri (PET e PBT): il *polietilentereftalato* (PET) e il *polibutilentereftalato* (PBT) derivano dalla condensazione di un acido organico e di un alcol. In edilizia trovano impiego nella produzione di tappeti e moquette, colle e vernici protettive per metalli e, soprattutto, di materiali compositi;
- Resine epossidiche (EP o epoxy): si ottengono per reazione tra bisfenolo ed epicloridrina. Stabili e durevoli, sono impiegate nella

produzione di vernici e collanti, materiali compositi, pavimenti resilienti e malte per iniezioni nel recupero di murature degradate;

- Resine fenoliche (PF): copolimeri di fenolo e aldeide formica (formaldeide); possono essere termoplastiche o termoindurenti in funzione delle cariche aggiunte. Nella forma espansa sono usate come isolanti. Solide o liquide a temperatura ambiente, si usano per produrre prese e interruttori, laminati plastici e vernici;
- Resine melamminiche (MF) e resine ureiche (UF): copolimeri di formaldeide, di melammina e urea; trovano tipico impiego nei laminati plastici (formica) e nei collanti.

I *materiali polimerici elastomerici* maggiormente utilizzati in edilizia sono:

- Gomme naturali: la più nota gomma naturale è il caucciù, che si ricava dal lattice di un albero tropicale (*hevea brasiliensis*). L'elevata impermeabilità ai gas lo rende adatto, previa *vulcanizzazione* alla produzione di pneumatici e di camere d'aria. Con elevate aggiunte di zolfo si ottiene l'*ebanite*, gomma dura con cui si producono tubi, lastre e profilati. Con l'aggiunta di cariche di cloro (cloro-caucciù), è impiegato per produrre vernici impermeabilizzanti e ignifughe per la protezione del calcestruzzo e dell'acciaio.
- Gomme sintetiche: derivano dalla mescolanza di vari polimeri e hanno proprietà analoghe a quelle della gomma naturale, con migliore resistenza e ritorno elastico. *Neoprene* (*poliisopreno*) e *SBR* (*stirene butadiene rubber*) sono tra le più note;
- Gomme silossaniche o siliconi: il monomero di partenza non è derivato dal petrolio, ma dalla silice. Sono commercializzati in forma fluida (con funzione lubrificante), semifluida (con funzione sigillante) e solida¹.

Normativa ed etichettatura europea dei polimeri a base biologica

La logica della standardizzazione nel settore industriale è alla base per la definizione di criteri e linee guida per la produzione e la commercializzazione di prodotti, servizi e processi. L'obiettivo è facilitare la concorrenza e la crescita commerciale superando la barriera della diversificazione dei parametri e dei requisiti di qualità. Esistono due tipologie di validazione: la prima tipologia definisce i criteri metodologici e le procedure da seguire; la seconda tipologia, invece, ha la funzione di normare i criteri e i requisiti che un prodotto o materiale deve soddisfare affinché sia conforme allo standard. Sebbene non esista una legislazione generale a livello europeo che armonizzi specificamente le norme in materia di prodotti sostenibili, la Commissione Europea, i governi nazionali, i ministeri e gli istituti, hanno emesso una moltitudine di norme costituenti la base per la validazione di biopolimeri e bioplastiche a base biologica. I principali organismi di standardizzazione mondiale sono:

- ISO: *International Organization for Standardization*;
- CEN: *European Committee for Standardization*;
- ASTM: *American Society for Testing and Materials*.



11

Il CEN è l'ente di normazione riconosciuto ufficialmente dall'Unione Europea e sono, quindi, strettamente vincolanti per i paesi membri che hanno l'onere di trasferire ai singoli enti di normazione nazionali, consentendo ai produttori di interfacciarsi nel mercato europeo. Per quanto inerente la normativa e l'etichettatura delle materie plastiche e dei polimeri a base biologica, il Technical Committee Working Group (TC) del CEN, ha sviluppato

diversi standard per la misurazione del contenuto rinnovabile di materiali polimerici a base biologica, quali:

- La EN 16640 - "*Prodotti a base biologica - Contenuto di carbonio di origine biologica - Determinazione del contenuto di carbonio di origine biologica usando un metodo basato sul radiocarbonio 14C*": descrive come misurare l'isotipo di carbonio 14C (metodo con il contatore a scintillazione liquida - LSC; metodo con spettrometria di massa con acceleratore - AMS; metodo a ionizzazione beta (BI)). A seconda della quantità di carbonio a base biologica, è possibile calcolare il contenuto di biomassa di una sostanza ed eseguire successivamente certificazioni ed etichettature. In Italia, la norma è armonizzata con la UNI 16640:2017;
- La EN 16785-1:2015: descrive i requisiti per la determinazione del contenuto biologico di un dato prodotto utilizzando l'analisi al radiocarbonio e l'analisi elementare. Lo standard fa riferimento a EN 16640 per quanto riguarda il carbonio-14. Per gli scopi di EN 16785, il termine "biologico" significa "derivato da biomassa". Un prodotto a base biologica è un prodotto parzialmente o totalmente composto da materiali derivati da biomassa. Lo standard è applicabile a qualsiasi prodotto solido, liquido o gassoso che contenga carbonio ed è perciò utilizzabile su una vasta gamma di prodotti;
- La EN 16785-1:2018 - "*Determinazione del contenuto a base biologica usando il metodo del bilancio dei materiali*": descrive un metodo di bilancio dei materiali per determinare il contenuto rinnovabile di un prodotto a base biologica.
- La EN 13432:2002 - "*Requisiti di compostabilità e biodegradazione*": descrive che un materiale per definirsi compostabile deve degradarsi almeno del 90% in 6 mesi se sottoposto a un ambiente ricco di anidride carbonica,;

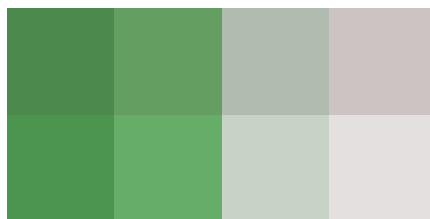
deve avere bassa concentrazione di metalli pesanti additivati al materiale, avere valori di pH, concentrazione di solidi volatili, concentrazione di azoto, fosforo, magnesio e potassio e contenuti salini entro i limiti stabiliti.

Tra le principali etichette che si riferiscono al contenuto di materie plastiche a base biologica sono, ad esempio, la “DIN-Geprüft Bio-based”, dell’ente certificatore “DIN CERTCO”, con sede in Germania e che comprende tre livelli di qualità indicanti il contenuto di base biologica di un prodotto: Biobased 20-50%, Biobased 50-85% e Biobased >85% ed è valido cinque anni;



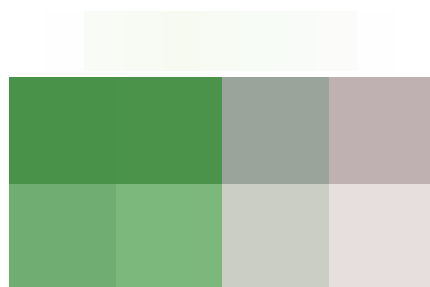
12

“OK biobased”, un metodo di indagine che definisce la percentuale di materie prime rinnovabili determinante (% bio-based) e che diversamente da una LCA (Life Cycle Assessment) può essere calcolato e misurato scientificamente e, infine,



13

il sistema di certificazione “Ok compost home” del certificatore belga “Vinçotte” (ora “TÜV AUSTRIA Belgio”), il primo a seguire lo standard EN 13432 sulla compatibilità domestica di alcuni prodotti compostabili.



14

Esistono altri due comitati CEN che si occupano di sviluppare gli standard per i prodotti a base biologica in risposta al “Mandato M/430 - norme e specifiche tecniche per biopolimeri e biolubrificanti”: questi comitati sono il CEN/TC 19 “Gaseous and liquid fuels, lubricants and related products of petroleum, synthetic and biological origin”, il CEN/TC 41 e il CEN/TC 249 “Plastics” che comprendono tutti i temi relativi le materie plastiche e i polimeri a base biologica, quali terminologia, valutazioni del ciclo di vita, calcolo del contenuto biobased, etc. Il Comitato Tecnico CEN 249 si occupa di tutti gli standard relativi alle plastiche ed è responsabile dello sviluppo degli standard dedicati ai biopolimeri promulgando specifiche tecniche relative all’industria biobased, quali:

- CEN/TR 15932:2010 - “Plastics - Recommendation for terminology and characterisation of biopolymers and bioplastics”;
- CEN/TS 16137:2011 - “Plastics - Determination of bio-based carbon content”;
- CEN/TS 16295:2012 - “Plastics - Declaration of the bio-based carbon content”;
- CEN/TS 16398:2012 - “Plastics - Template for reporting and communication of bio-based carbon content and recovery options of biopolymers and bioplastics - Data sheet”.

Come già detto, le bioplastiche non sono un singolo materiale, ma una grande famiglia di materiali, la maggior parte dei quali materiali innovativi e con proprietà e funzionalità diverse. Una tale varietà e complessità non è di semplice interpretazione ed analisi. In termini di economia circolare, questi standard offrono una prima base per la valutazione delle bioplastiche e per fornire una valida comunicazione sulle richieste corrispondenti - un prerequisito per il successo delle performance del mercato.

12. Certificazione DIN CERTCO con percentuale di contenuto a base biologica.

13. Certificazione “Ok biobased”.

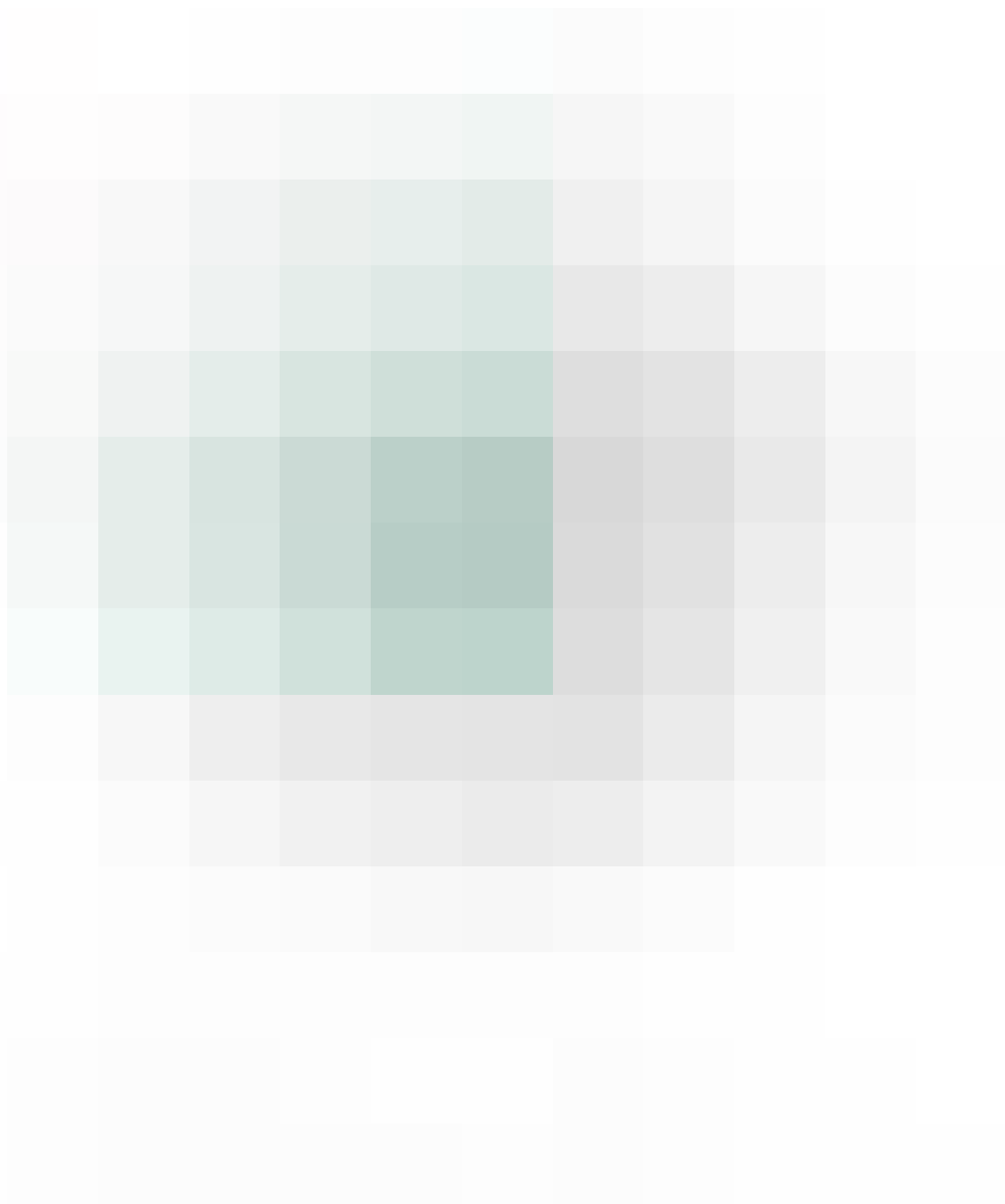
14. Certificazione “Ok compost home” del certificatore belga “Vinçotte” (ora “TÜV AUSTRIA Belgio”).

3.2. Dai polimeri ai biopolimeri. Verso l'integrazione in architettura del concetto di "Material Ecology"

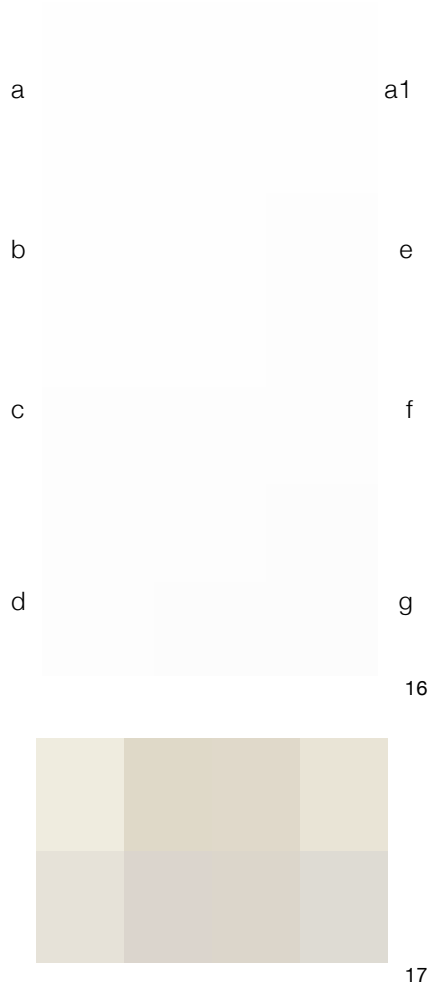
Storicamente, le prime materie plastiche utilizzate erano di origine naturale, come il caucciù, la cellulosa (impiegata per la produzione delle prime plastiche come la *Parkesina*, la *Celluloide*, la *Bakelite*, etc.) e altri componenti naturali come la caseina che nel 1897 portò alla produzione della *Galatite*. Nel 1947, venne brevettato il *Rilsan (Poliammide 11)*, il primo biopolimero non biodegradabile della

storia, introdotto nel mercato per le sue eccellenti proprietà meccaniche e chimiche. Negli Anni '90 sono sviluppate le prime bioplastiche a base fossile e a base biologica che sono ancora oggi tra le più comuni, come il PLA, i PHA o ancora gli ammidi plastificati che hanno potuto sfruttare i rapidi progressi della "chimica verde" e della valorizzazione delle biomasse. Il grafico mostra il processo evolutivo dei diversi elementi costitutivi i polimeri a base biologica (materia prima, intermedi, monomeri e polimeri) che saranno esaminati singolarmente (fig.15).

15. Processo evolutivo di alcuni polimeri a base biologica, in "Market and Trend Reports", Skoczinski P., Chinthapalli R., Carus M., Baltus W., Guzman D., Käb H., Raschka A., Ravenstijn J. (a cura di), "Bio-based Building Blocks and Polymers – Global Capacities, Production and Trends 2019 – 2024, Nova Institute, Gennaio 2020



L'architettura dei polimeri



I polimeri (dal greco *poly* + *meros*, molte parti), sono molecole a lunga catena sintetizzate legando chimicamente (legami covalenti) unità molecolari più semplici, i *monomeri* (dal greco *mono* + *meros*, singola parte). L'architettura delle macromolecole polimeriche sono diverse, variando da catene lineari e ramificate a strutture a pettine, "a scala" e "a stella". Ulteriori variazioni della struttura sono ottenute introducendo legami covalenti crociati tra le varie catene polimeriche (fig.16). Nella struttura di una catena polimerica è possibile distinguere delle unità che si ripetono lungo una direzione, indicate come unità monomeriche. Si parla di *omopolimero* quando le unità costituenti la catena sono identiche tra loro, in quanto derivati dallo stesso monomero. Si parla, invece, di *copolimero* quando due o più monomeri danno origine ad una catena che contiene unità differenti² (fig.17). Una catena polimerica, quindi, non è caratterizzata solamente dalla sua composizione chimica. Esistono, infatti, altre due variabili importanti che definiscono le proprietà di un polimero: la *lunghezza* e l'*architettura*. La *lunghezza* delle catene può essere indicata attraverso due parametri:

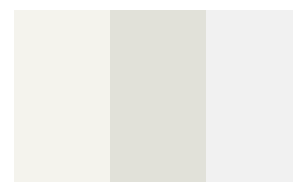
- il grado di polimerizzazione, ovvero il numero di unità monomeriche presenti in ogni singola catena;
- massa molecolare.

L'*architettura* delle catene, invece, può essere classificata in due distinte categorie:

- *Catene non reticolate*: a seconda che siano o meno presenti segmenti di catena che si dipartono dalla catena principale, si parla di catene *lineari* o *ramificate*. Tale architettura definisce i cosiddetti *polimeri termoplastici*, ovvero quelli che dopo essere stati fusi diventano sufficientemente fluidi da poter essere modellati in forme che restano immutate quando vengono raffreddate;
- *Catene reticolate*: le catene non

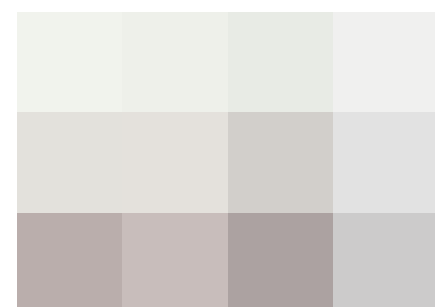
sono separabili a causa dei legami covalenti che fungono da ponte tra le diverse catene. Questi legami di 'reticolazione' sono ottenuti tramite reazioni chimiche condotte contemporaneamente o successivamente alla reazione di polimerizzazione e sono legami forti, aventi cioè la stessa energia di quelli presenti lungo la catena. L'energia di legame è necessaria per la dissociazione del legame chimico tra due atomi e si misura in kcal/mole³. Tale architettura definisce i *polimeri termoindurenti* che presentano un grado di reticolazione molto elevato, motivo per cui, una volta raffreddati, si induriscono irreversibilmente e non possono essere rimodellati.

In un materiale polimerico le catene non si presentano come entità isolate, ma all'interno di uno stesso elemento sono presenti segmenti di struttura appartenenti a catene differenti (fig.18). Per tale motivo, i polimeri allo stato



18

solido hanno la tendenza a essere composti sia da zone a *struttura semicristallina ordinata (cristalliti)* sia da zone a *struttura amorfa disordinata*. Nei polimeri semicristallini, oltre a zone amorse, vi sono zone in cui è presente un ordine nella disposizione delle catene nello spazio (fig.19). La disposizione ordinata di segmenti di catene dà origine a strutture planari, comunemente indicate come "*lamelle*", nelle quali si realizza una disposizione ordinata di segmenti di catena.



19

16. Schematizzazione delle tipologie di architetture di una molecola polimerica: a) lineare; b) ramificata; c) pettine; d) scala; e) stella; f) rete con legami crociati; g) dendritica. Il dettaglio (a1) rappresenta una porzione della molecola in cui gli atomi di carbonio, legati da legami covalenti costituiscono la struttura della molecola polimerica.
17. Schematizzazione della struttura di un omopolimero e di un copolimero, Frassine R., Levi M., Marano C., Rink M., "Struttura e proprietà dei materiali polimerici", in Del Curto B., Marano C., Pedeferrri M. (a cura di), "Materiali per il Design", Casa Editrice Ambrosiana, Rozzano (Milano), Settembre 2015, pag.243.
18. Struttura di un polimero con sovrapposizione di catene differenti, in Frassine R., Levi M., Marano C., Rink M., "Struttura e proprietà dei materiali polimerici", in Del Curto B., Marano C., Pedeferrri M. (a cura di), "Materiali per il Design", Casa Editrice Ambrosiana, Rozzano (Milano), Settembre 2015, pag.248.
19. Struttura di polimeri allo stato solido, Ivi, pag.248.

Polimeri amorfi

Come già detto, i polimeri amorfi presentano una struttura disordinata a lungo raggio. I polimeri altamente amorfi sono spesso chiamati *polimeri vetrosi*. A causa della mancanza di zone cristalline che disperdano la luce, i polimeri amorfi sono trasparenti. Inoltre, essi sono tipici polimeri 'molliti', sia per quanto riguarda la loro alta flessibilità sia per la mancanza di resistenza meccanica. Quando vengono riscaldati, i polimeri amorfi sono trasformati da uno stato vetroso duro a uno stato molle, flessibile e gommoso. La temperatura alla quale avviene questa transizione viene detta *temperatura di transizione vetrosa* (T_g) (fig.20).

I materiali gommosi, invece, devono avere bassi valori di temperatura di transizione vetrosa in modo da comportarsi da *elastomeri* (*polimeri elastici*). Se la temperatura si abbassa al di sotto del valore di temperatura di transizione vetrosa, il materiale viene convertito in un solido vetroso rigido e si perdono le proprietà dell'elastomero. Il polistirene (PS), il policarbonato (PC), il polimetilmetacrilato (PMMA), il polivinilcloruro (PVC) sono tipologie di polimeri amorfi a temperatura ambiente nel momento in cui le loro proprietà e la loro morfologia restano immutate proprio perché la temperatura ambiente è minore delle rispettive temperature di transizione vetrosa. Se la temperatura ambiente risulterà maggiore della temperatura di transizione vetrosa, si parlerà di *polimeri amorfi gommosi*, come il caso del *butadiene-co-stirene* (SBR).

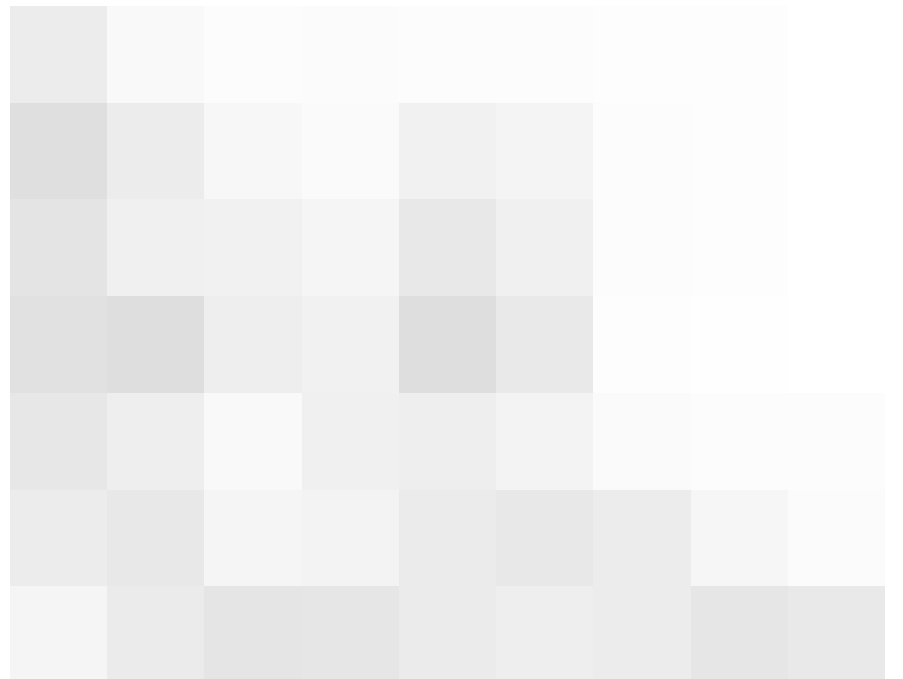
$$T_{amb} < T_g \text{ (polimeri amorfi vetrosi)}$$

$$T_{amb} > T_g \text{ (polimeri amorfi gommosi)}$$

La temperatura alla quale il polimero diviene fluido, aumenta all'aumentare della lunghezza delle catene e quindi della massa molecolare. Essa, infatti, può essere correlata con il *grado di reticolazione*, ovvero i legami intermolecolari per unità di volume. Se il grado di reticolazione aumenta, anche il modulo del ma-

teriale elastico aumenta nel campo di temperature superiori a quella di transizione. Tali fattori influenzano in modo significativo, non solo la morfologia del polimero amorfo, ma anche il comportamento meccanico di ciascuno. Nei polimeri amorfi vetrosi ($T_{amb} < T_g$), il materiale presenta un comportamento fragile, quindi un modulo e sforzo di rottura elevati e modulo deformativo modesto; nei polimeri amorfi gommosi ($T_{amb} > T_g$), invece, il materiale tenderà a snervare per scorrimento, con una riduzione dello sforzo massimo e un aumento della deformazione a rottura (fig.21).

- 20. Schematizzazione dell'andamento del modulo elastico di Young in relazione alla temperatura di transizione vetrosa (T_g) di un polimero amorfo.
- 21. Schematizzazione del comportamento meccanico dei polimeri amorfi al variare della temperatura.



20



21

Per temperature nettamente superiori alla temperatura di transizione vetrosa T_g , i polimeri si presentano con morfologia gommosa, motivo per cui il modulo di Young è molto basso e non sussiste, quindi, il fenomeno di snervamento. Le relative deformazioni a rottura, inoltre, sono molto più elevate dei precedenti casi. Nei polimeri amorfi vetrosi, prima di arrivare al punto di rottura, se si rimuove il carico, il recupero della deformazione sarà totale. In prossimità della temperatura di transizione vetrosa T_g , il materiale mostrerà un recupero parziale della deformazione; mentre nel caso dei polimeri amorfi gommosi, il recupero della deformazione è totale solo nel caso di un polimero reticolato (fig.22).



I polimeri amorfi non reticolati, definiti anche polimeri termoplastici trovano impiego strutturale solo nel campo di temperature inferiori alla temperatura di transizione vetrosa T_g in cui l'elemento è in grado di

mantenere la propria forma quando soggetto all'applicazione di un carico anche in tempi prolungati. Al di sotto della temperatura di transizione vetrosa, detta di *infragilimento*, che corrisponde al campo di variazione tra T_g e i -20°C , il materiale polimerico termoplastico perde buona parte della sua tenacità a frattura. A temperature superiori ($T_g+20^\circ\text{C}$), invece, essi trovano applicazioni non strutturali come adesivi, modificanti per bitumi, etc., in quanto non mantengono la propria forma sotto l'applicazione di un carico (fig.22). Nei polimeri amorfi reticolati, invece, l'applicazione strutturale è possibile anche nello stato gommoso, ossia a temperature superiori alla temperatura di transizione vetrosa (fig.22).

Una tipologia di polimeri amorfi reticolati sono le *gomme* o *elastomeri*, caratterizzati da una temperatura di transizione vetrosa inferiore alla temperatura ambiente e da un recupero totale e istantaneo della deformazione a seguito della rimozione del carico applicato. Questo tipo di comportamento è, come detto, ottenuto dalla struttura dei polimeri amorfi reticolati chimicamente e dalla struttura dei copolimeri a blocchi, le cosiddette gomme termoplastiche. Per reticolazione chimica si intende l'insieme di reazioni chimiche che portano alla formazione di legami covalenti tra le diverse catene polimeriche. Il processo di reticolazione comporta la trasformazione di un polimero costituito da catene singole, soggette solo a deboli forze di legame intercatena, in un polimero in cui le singole catene non sono più distinguibili, in quanto legate tra loro da forti legami covalenti. La reticolazione, ostacolando lo scorrimento relativo tra le catene, impedisce l'insorgere di fenomeno di "flusso plastico" del materiale e ha come conseguenza la scomparsa della zona di comportamento "fluida"⁴. Uno dei metodi di reticolazione è il processo di *vulcanizzazione* delle gomme che consiste nel riscaldamento del polimero in presenza di zolfo che crea un 'ponte' tra due distinte catene molecolari, migliorando notevolmente le caratteristiche fisiche e meccaniche.

22. Schematizzazione della curva di carico e scarico di un polimero amorfo.

I principali polimeri amorfi

I principali polimeri amorfi sono:

- Polivinilcloruro (PVC): esistono due tipologie: il *PVC non plastificato* e il *PVC plastificato*. La prima è un polimero amorfo vetroso con una temperatura di transizione di 80°C, in cui a temperatura ambiente mostra un comportamento tenace. Il PVC non plastificato, invece, è ottenuto con l'aggiunta di sostanze a bassa massa molecolare che ne riducono la temperatura di transizione vetrosa. Con l'eventuale aggiunta di plastificanti, come per esempio il *diottilftalato*, il polivinilcloruro assume la morfologia e le caratteristiche di un materiale gommoso. Il PVC viene prodotto dalla reazione del cloro con l'etilene per formare il *dicloroetano*, trasformato in cloruro di vinile, monomero unito con il processo di polimerizzazione che forma una polvere bianca che, mescolata agli additivi, conferisce al PVC le sue tipiche caratteristiche.
- Polimetilmetacrilato (PMMA): le caratteristiche principali del PMMA sono l'elevata trasparenza e l'ottima resistenza ai raggi UV, motivo per cui trova impiego principalmente come valido sostituto del vetro, di lenti intraoculari, lastre trasparenti, sanitari ed insegne luminose. Il PMMA ha un comportamento a frattura di tipo fragile, ma la sua deformabilità è comunque superiore a quella del polistirene. A temperatura di 60°C il polimero non presenta più un comportamento fragile, in quanto il meccanico di snervamento diventa di scorrimento. Tuttavia, essendo questa temperatura relativamente prossima alla temperatura di transizione vetrosa, l'affidabilità del materiale per applicazioni strutturali risulta particolarmente limitata. Il PMMA è ottenuto dal monomero di partenza, il *metilestere dell'acido 2-metilpropenoico*, prodotto dall'*acetone* o da *etene*, monossido di carbonio e *metanolo*. La reazione avviene per reazione di addizione.
- Polistirene (PS): è il secondo polimero amorfo più diffuso, dopo il polivinilcloruro (che occupa circa il 65% del mercato totale), grazie al costo ridotto, soprattutto nella sua versione più diffusa, quella del polistirene espanso (sigla XPS ed EPS) caratterizzato da una buona resistenza al fuoco e agli acidi ed una bassa conduttività termica ed è pertanto utilizzato come isolante termico. Si presenta in forma di schiuma bianca, oppure sferette o *chips*. Le caratteristiche negative sono una bassa resistenza all'incisione, una scarsa resistenza agli agenti chimici (inerte rispetto a molti agenti corrosivo e solubile nei solventi organici clorurati) e una estrema fragilità. Il polistirene è ottenuto attraverso tre stadi del processo di *polimerizzazione*, quali ottenimento dell'*etilbenzene*, l'ottenimento del *feniletene* (monomero) e la polimerizzazione di quest'ultimo che, mediante una *reazione di addizione radicalica*, forma una catena lineare polimerica ad alto peso molecolare.
- Policarbonato (PC): è un polimero vetroso caratterizzato da un'elevata temperatura di transizione vetrosa (150°C). Ha una buona trasparenza e una buona resistenza alla fiamma, ma tende a ingiallire se esposto ai raggi ultravioletti e possiede una modesta resistenza all'abrasione. A temperatura ambiente snerva per scorrimento, mostrando quindi comportamento tenace. La tenacità, tuttavia, tende a diminuire in presenza di intagli, per spessori elevati, alle basse temperature e in presenza di alcune sostanze, come ad esempio le benzine⁵. I policarbonati hanno la caratteristica comune di contenere nella loro catena polimerica il gruppo carbonile -CO- legato con gruppi aromatici attraverso atomi di ossigeno. Il policarbonato è impiegato nel settore dell'edilizia per la fabbricazione di lastre e profilati trasparenti, nel settore elettronico per la fabbricazione di componenti di elettrodomestici e nel packaging per la fabbricazione di film e pellicole.

Polivinilcloruro (PVC)

Unità ripetitiva (C2 H3 Cl)_n

Tipologia: amorfo
Temperatura di transizione vetrosa: 80°C
Densità: 1,4 g/cm³

Proprietà meccaniche, chimiche e fisiche

Resistenza meccanica: alta (55 MPa)
Resistenza chimica: media
Resistenza alla fiamma: alta
Resistenza termica: bassa
Altro: leggerezza, idrorepellenza, impermeabile, stabilità, economicità, versatilità.

Tecniche di trasformazione

Calandratura, estrusione, iniezione-soffiaggio, metallizzazione, stampaggio, espansione, termoformatura, rivestimento.

Principali settori di applicazione:

Edilizia e costruzioni: 47%
Imballaggio: 16,8%
Tessile: 6,4%
Altro: 29,8%

Applicazioni comuni

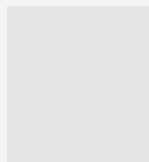
Serramenti, tubazioni, isolanti, profilati, piastrelle per pavimenti, bottiglie, binari di vinile.

Applicazioni del polimero riciclato

Stuoie di plastica, membrane, recupero energetico (termovalorizzazione).

Polistirene (PS)

Unità ripetitiva (C8 H8)_n



Tipologia: amorfo
Temperatura di transizione vetrosa: 100°C
Densità: 1,04 g/cm³

Proprietà meccaniche, chimiche e fisiche

Resistenza meccanica: bassa
Resistenza chimica: bassa
Resistenza alla fiamma: bassa
Resistenza termica: alta
Altro: leggerezza, isolante, anigroscopico, rigidità, trasparenza, lavorabilità.

Tecniche di trasformazione

Calandratura, estrusione (sigla XPS ed EPS), iniezione, stampaggio, espansione, termoformatura.

Principali settori di applicazione:

Edilizia e costruzioni: 53%
Imballaggio: 45%
Altro: 2%

Applicazioni comuni

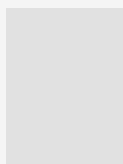
Pavimentazioni resilienti, isolante termico, materiale da imballaggio, utensili monouso.

Applicazioni del polimero riciclato

Imballaggi, custodie, r-EPS.

Polimetilmetacrilato (PMMA)

Unità ripetitiva (C5 O2 H8)_n



Tipologia: amorfo
Temperatura di transizione vetrosa: 105°C
Densità: 1,18 g/cm³

Proprietà meccaniche, chimiche e fisiche

Resistenza meccanica: media
Resistenza chimica: bassa
Resistenza alla fiamma: alta
Resistenza termica: media
Resistenza ai raggi UV: alta
Altro: leggerezza, trasparenza, infrangibilità, elevata efficienza luminosa.

Tecniche di trasformazione

Estrusione (sigla "XT"), colatura (sigla "GS"), termoformatura.

Principali settori di applicazione:

Edilizia e costruzioni: 35%
Arredamento e Design: 30%
Pubblicità/visual merchandising: 30%
Altro: 5%

Applicazioni comuni

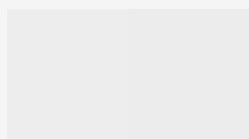
Pannelli rigidi trasparenti, vasche da bagno, barriere infrangibili, arredamento, lenti, fibre ottiche.

Applicazioni del polimero riciclato

PMMA rigenerato con proprietà invariate.

Policarbonato (PC)

Unità ripetitiva (C16 H14 O3)_n



Tipologia: amorfo
Temperatura di transizione vetrosa: 150°C
Densità: 1,20 g/cm³

Proprietà meccaniche, chimiche e fisiche

Resistenza meccanica: media
Resistenza chimica: media
Resistenza alla fiamma: media
Resistenza termica: media
Resistenza ai raggi UV: bassa
Altro: trasparenza, elevata tenacità, elevato indice di rifrazione, leggerezza, versatilità, stabilità dimensionale.

Tecniche di trasformazione

Estrusione, stampaggio.

Principali settori di applicazione:

Elettrico ed elettronico: 38%
Lastre: 20%
CD, DVD: 12%
Auto: 10%
Altro: 20%

Applicazioni comuni

Lastre trasparenti, caschi, oblò, barriere infrangibili, lenti, tubazioni, camme e ingranaggi.

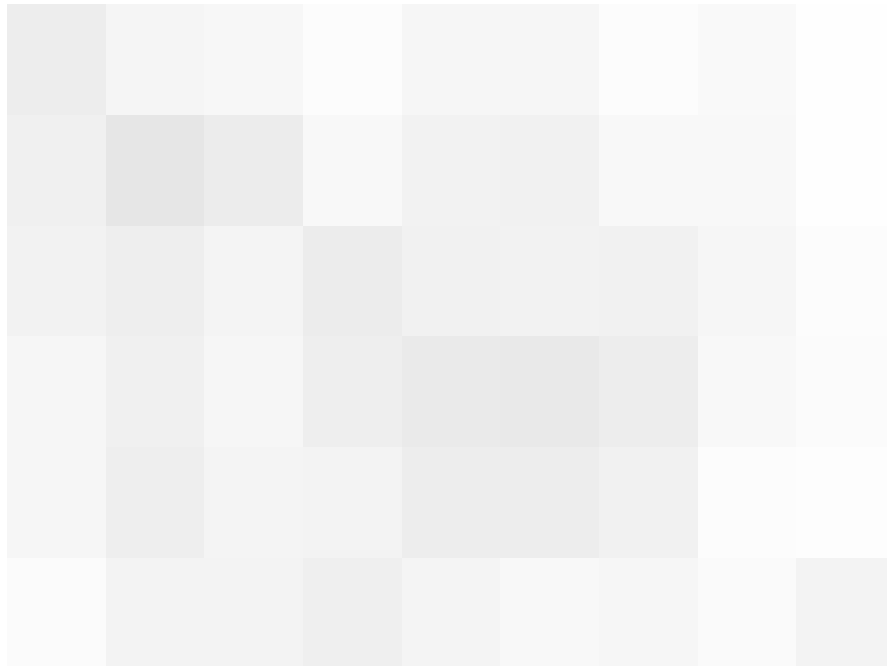
Applicazioni del polimero riciclato

Limitate.

Polimeri semicristallini

Nei polimeri con struttura regolare e compatta e con intense forze intermolecolari, come i legami idrogeno, si trovano spesso alti gradi di cristallinità. La temperatura alla quale fondono i cristalli corrisponde alla *temperatura di transizione di fusione* (T_m) di un polimero. Quando aumenta il grado di cristallinità di un polimero, anche la sua temperatura di transizione di fusione aumenta ed esso diviene più opaco a causa della dispersione della luce dovuta alle zone cristalline. Con l'aumento della cristallinità, vi è anche un corrispondente aumento della rigidità (modulo elastico) e della durezza.

Un polimero semicristallino può essere considerato come l'insieme di una fase amorfa con temperatura di transizione vetrosa T_g e di una fase cristallina con temperatura di fusione T_m , l'effetto della temperatura sullo stato del materiale può essere dedotto dalla sovrapposizione degli effetti della temperatura sul materiale amorfo e sul materiale cristallino. All'aumentare della temperatura, si passa, pertanto, da uno stato in cui si distinguono le due fasi cristallina e amorfa vetrosa ($T < T_g$), a uno stato fluido in cui non si ha più distinzione tra le due fasi ($T > T_m$), passando per uno stato in cui si distinguono ancora una fase amorfa gommosa o fluida e una fase cristallina ($T_g < T < T_m$) (fig.23). Per tale motivo, si può prevedere che l'andamento del modulo di elasticità di un polimero cristallino in funzione della temperatura sarà diverso da quello di un materiale amorfo. Per temperature inferiori alla temperatura di transizione vetrosa della fase amorfa T_g , il modulo ha



24

valori dell'ordine del GPa. Per temperature comprese tra T_g e la temperatura di fusione T_m , il modulo sarà compreso tra quello di un vetro+cristallo e quello di una gomma, in funzione della percentuale di cristallinità presente nel materiale. Per temperature superiori alla temperatura di fusione T_m , il materiale è fluido e non è più possibile misurare il suo valore di modulo con una normale prova di trazione⁶. Dal grafico si evince come il modulo dei materiali semicristallini a temperatura ambiente risulta diverso a seconda che sia $T_{amb} < T_g < T_m$ o $T_g < T_{amb} < T_m$; in quest'ultimo caso il valore di modulo dipende del grado di cristallinità (fig.24).

Non è sicuro che tutti i polimeri possano cristallizzare in quanto esistono due fattori che influiscono sulla 'cristallizzabilità' di una molecola: la sua *regolarità di costituzione* e la sua *regolarità di configurazione*.

23. Stato delle fasi di un polimero semicristallino al variare della temperatura.

24. Schematizzazione dell'andamento del modulo elastico di Young in relazione alla temperatura di un polimero semicristallino.



25. Schematizzazione della regolarità di costituzione e di configurazione di una molecola polimerica.

26. Comportamento meccanico dei polimeri semicristallini al variare della temperatura.



25

La presenza di atomi o di gruppi di atomi ordinati lungo una catena definisce la costituzione regolare di tutti gli omopolimeri. Il requisito della regolarità di configurazione, invece, avviene quando atomi o gruppi di atomi si dispongono nello spazio con una certa regolarità e ripetizione lungo la struttura della catena polimerica. Tale requisito è sempre soddisfatto nei polimeri la cui unità ripetitiva è simmetrica (come il polietilene). Nel caso di asimmetria, il requisito non è sempre verificato come, per esempio, nel polipropilene, la cui unità ripetitiva è asimmetrica, ma esistono dei catalizzatori che assicurano l'ottenimento di una struttura regolare. Sono, dunque, possibili due diverse configurazioni del polimero: il PP *isotattico* e il PP *sindiotattico*.

Nel polimero isotattico, il gruppo CH_3 è presente sempre dalla stessa parte della catena polimerica, mentre nel polimero sindiotattico il gruppo metilico ha una disposizione alternata rispetto alla catena principale (fig.25).

Nel caso di regolarità di configurazione, il polimero è detto *stereoregolare*.

Nel caso, invece, venga a mancare uno e entrambi i requisiti di regolarità richiesti per la cristallizzazione, il polimero risulterà amorfo allo stato solido (come ad esempio è il caso del polipropilene atattico che possiede regolarità di costituzione, ma è privo di regolarità di configurazione)⁷.

Per quanto inerente il comportamento meccanico-elastico dei polimeri semicristallini, a temperatura superiore a quella di transizione vetrosa ($T_g < T < T_m$), il materiale presenta un comportamento tenace, con deformazioni elevate prima della rottura. All'aumentare della temperatura, la rigidità diminuisce progressivamente; al di sopra della temperatura di transizione vetrosa, infatti, i polimeri semicristallini si deformano in modo plastico (transizione duttile-fragile) fino alla T_m in cui il comportamento è di tipo fluido. Al contrario, a temperature inferiori a quella di transizione vetrosa, il materiale è rigido, con modulo elevato e con la tendenza allo snervamento per *crazing*, tramutandosi in un comportamento estremamente fragile (fig.26).

È possibile dedurre come i diversi polimeri semicristallini differiscano significativamente in termini di resistenza allo snervamento (massimo della curva di carico) e di sforzo di rottura, mentre le deformazioni a rottura sono sempre elevate. Questo comportamento fa sì che tali polimeri si pongono come materiali tenaci a causa delle rilevanti quantità di lavoro meccanico necessario per provocare la rottura⁸.



26

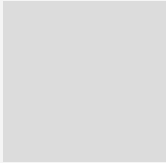
I principali polimeri semicristallini

I principali polimeri semicristallini sono:

- Polietilene (PE): rappresenta uno dei polimeri di massa maggiormente commercializzati, insieme al PVC, al PS e al PP. Sono commercializzati diversi tipi di polietilene (HDPE-polietilene ad alta densità; LDPE-polietilene a bassa densità; MDPE-polietilene a media densità; LLDPE-polietilene lineare a bassa densità; UHMWPE-polietilene ad altissima massa molecolare), che differiscono per la morfologia lineare della catena polimerica o per la massa molecolare. Ha una ottima resistenza agli agenti chimici e un comportamento tenace, ma è significativamente sensibile alla degradazione per esposizione alla radiazione ultravioletta. Tali caratteristiche influiscono sul grado di cristallinità allo stato solido (direttamente proporzionale alla densità) e sulla viscosità allo stato fluido (inversamente proporzionale all'indice di fluidità, definito come la quantità di polimero fuso che fuoriesce da un mezzo capillare in un tempo di dieci minuti a una determinata temperatura e pressione.
- Poliammidi (PA): costituiscono una tipologia di polimeri comunemente classificati nel gergo commerciale con il nome di *nylon*, poliammide sintetizzata dalla DuPont e commercializzata a partire dal 1938. Esistono diverse tipologie indicate con le sigle "PA m + 1" (ad esempio "PA6") in relazione alla natura dell'unità monomerica, dove "m" indica il numero di atomi di carbonio *alifatici* (legati ad atomi di idrogeno presenti nella stessa catena polimerica). Le caratteristiche meccaniche delle poliammidi sono influenzate dalla presenza di gruppi ammidici che incidono notevolmente sull'assorbimento d'acqua. Quest'ultima provoca una diminuzione progressiva della temperatura di transizione vetrosa e quindi del comportamento meccanico del materiale, che risulta essere più tenace in presenza di acqua assorbita. Il principale mercato delle poliammidi PA6 e PA6,6 è il tessile, con limitato impiego nel settore dei trasporti, dell'elettronica e dell'arredamento.
- Polipropilene (PP): anch'esso tra i polimeri semicristallini più diffusi nel mercato, presenta una ottima resistenza agli agenti chimici, ma è particolarmente sensibile alla degradazione per esposizione ai raggi ultravioletti. Il suo comportamento meccanico varia in relazione alla temperatura: a temperatura ambiente presenta un comportamento tenace, mentre a basse temperature si infragolisce. In relazione al grado di cristallinità e della massa molecolare, esistono diversi tipi di polipropilene. Il grado di cristallinità può essere variato mediante il grado di isotatticità della catena polimerica o la percentuale di co-monomero, grazie all'impiego di catalizzatori stereospecifici. Grazie alla sua alta cristallinità, il polipropilene isotattico ha maggior resistenza meccanica e maggiore stabilità dimensionale termica del polipropilene atattico⁹. I principali settori di applicazione sono quelli automobilistico ed elettronico.
- Polietilentereftalato (PET): insieme al polibutilentereftalato (PBT), appartengono ai polimeri comunemente indicati come poliestere, caratterizzati dalla presenza del gruppo estereo (-CO-O-). Il materiale cristallizza con difficoltà, motivo per cui è impiegato prevalentemente per la produzione di fibre, bottiglie e film, ovvero lavorazioni che facilitano il processo di cristallizzazione mediante l'orientamento in direzioni prestabilite delle molecole del polimero. Tale processo permette, quindi, di migliorare sensibilmente le caratteristiche meccaniche del materiale. Sia il PET, sia il PBT, possono essere impiegati in altri settori e articoli tecnici soltanto se additivati con opportune cariche minerali oppure rinforzati con materiali fibrosi (come ad esempio la fibra di vetro).

Polietilene (PE)

Unità ripetitiva (C2 H4)n



Tipologia: semicristallino
 Temperatura di transizione vetrosa: -100°C
 Densità: 0,915 - 0,960 g/cm³

Proprietà meccaniche, chimiche e fisiche

Resistenza meccanica: media
 Resistenza chimica: alta
 Resistenza alla fiamma: bassa
 Resistenza termica: bassa
 Resistenza ai raggi UV: bassa
 Altro: resistenza agli urti, all'abrasione, saldabilità, stabilità dimensionale, lavorabilità.

Tecniche di trasformazione

Estrusione, iniezione-soffiaggio, metallizzazione, stampaggio, espansione, termoformatura.

Principali settori di applicazione:

Imballaggio: 62%
 Tubazioni e profili: 2%
 Agricoltura e costruzioni: 10%
 Altro: 26%

Applicazioni comuni

Bottiglie, guide di scorrimento, taglieri, apparecchi per l'industria chimica, pellicole.

Applicazioni del polimero riciclato

Contenitori, imballaggi di qualità inferiore.

Polipropilene (PP)

Unità ripetitiva (C3 H6)n

Tipologia: semicristallino
 Temperatura di transizione vetrosa: -10°C
 Densità: 0,90 - 0,91 g/cm³

Proprietà meccaniche, chimiche e fisiche

Resistenza meccanica: media
 Resistenza chimica: alta
 Resistenza alla fiamma: bassa
 Resistenza termica: alta
 Resistenza ai raggi UV: bassa
 Altro: idrofobo, saldabilità, lavorabilità, stabilità dimensionale, resilienza.

Tecniche di trasformazione

Estrusione, soffiaggio, stampaggio e iniezione, termoformatura.

Principali settori di applicazione:

Alimentare: 55%
 Imballaggio: 30%
 Auto: 5%
 Altro: 10%

Applicazioni comuni

Paraurti, plance, vasche, film, tappeti, tessuti, elementi di arredo.

Applicazioni del polimero riciclato

Imballaggi, custodie, pallet industriali, cassette.

Poliammidi (PA)

Unità ripetitiva (CO-NH)

Tipologia: semicristallino
 Temperatura di transizione vetrosa: 60°C
 Densità: 1,02 - 1,14 g/cm³

Proprietà meccaniche, chimiche e fisiche

Resistenza meccanica: alta
 Resistenza chimica: media
 Resistenza alla fiamma: alta
 Resistenza termica: media
 Resistenza ai raggi UV: alta
 Altro: igroscopicità, idrofilia, resistenza all'usura, stabilità termica, resilienza, flessibilità.

Tecniche di trasformazione

Estrusione, colatura, stampaggio a iniezione.

Principali settori di applicazione:

Tessile: 85%
 Trasporti: 5%
 Elettronica: 3%
 Arredamento: 2%
 Altro: 5%

Applicazioni comuni

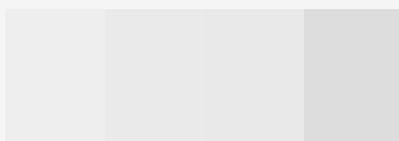
Fibre, ingranaggi, componenti meccanici.

Applicazioni del polimero riciclato

Fibre riciclate con proprietà quasi o del tutto invariate.

Polietilentereftalato (PET)

Unità ripetitiva (C10 H8 O4)n



Tipologia: semicristallino
 Temperatura di transizione vetrosa: 80°C
 Densità: 1,38 g/cm³

Proprietà meccaniche, chimiche e fisiche

Resistenza meccanica: alta
 Resistenza chimica: alta
 Resistenza alla fiamma: bassa
 Resistenza termica: media
 Resistenza ai raggi UV: bassa
 Altro: trasparenza, elevata tenacità, leggerezza, versatilità.

Tecniche di trasformazione

Estrusione, stampaggio a iniezione, stampaggio inietto compressione, soffiaggio.

Principali settori di applicazione:

Alimentare: 76%
 Altro: 24%

Applicazioni comuni

Fibre, film, bottiglie, contenitori, elementi di arredo, tubi, etichette.

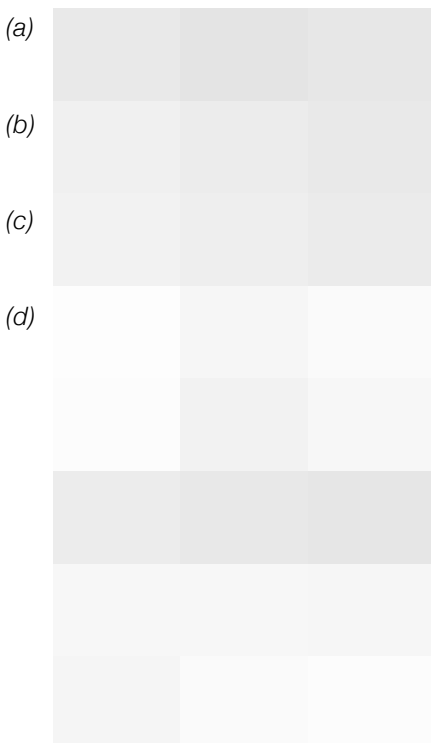
Applicazioni del polimero riciclato

Tappeti, cinturini, contenitori non alimentari.

Copolimeri e compositi

Quando due monomeri vengono polimerizzati insieme, si ottiene un *copolimero*. Ne è un esempio il nylon 66, la prima fibra di sintesi prodotta a partire dal 1934 dai chimici della "E.I. DuPont de Nemours & Company". Essa è chiamata così perché viene sintetizzata da due differenti monomeri, ciascuno contenente sei atomi di carbonio (il nylon 6 o *caprolattame*). Si distinguono quattro diverse tipologie di copolimeri:

- *Copolimeri casuali (a)*: i vari monomeri si dispongono casualmente nella catena molecolare;
- *Copolimeri alternati (b)*: i monomeri si susseguono lungo la catena molecolare in modo alternato;
- *Copolimeri a blocchi (c)*: in cui lungo la catena molecolare, ai blocchi di un certo monomero, fa seguito un blocco costituito da un altro monomero;
- *Copolimeri a innesto (d)*: in cui si distingue una catena principale costituita solo da unità monomeriche di un tipo, dalla quale dipartono ramificazioni costituite da unità monomeriche di tipo diverso.



La polimerizzazione per l'ottenimento di copolimeri, è un processo indispensabile per ottenere materiali con caratteristiche prestazionali migliori. Ne è un esempio il copolimero derivante dallo stirene e dal butadiene. Il polistirene puro, infatti, è un materiale fragile e trasparente; il polibutadiene, invece, è una gomma sintetica molto elastica e resistente. Il copolimero a blocchi che si ottiene tra i due monomeri prende il nome di *polistirene ad alto impatto*, un materiale plastico durevole, tenace e trasparente. Inoltre, da una diversa formulazione dei due monomeri, si ottiene la gomma *stirene-butadiene* (SBR), impiegata principalmente per la produzione di ruote per automobili.

Esiste, inoltre, la possibilità di creare infinite composizioni di due o più polimeri; tale operazione prende il nome di *miscela* o *compositi*. È di particolare interesse dell'industria, infatti, la creazione di miscele che prevedono l'aggiunta alle matrici polimeriche (polimeri amorfi vetrosi o semicristallini) di una certa percentuale di polimero allo stato gommoso. Tali materiali presentano notevoli caratteristiche di tenacità e resilienza e che difatti trovano impiego in contesti in cui sono richieste sollecitazioni continue nel tempo. Uno tra questi è l'ABS, ottenuto dalla miscelazione del copolimero stirene-acrilonitrile (SAN) con il polibutadiene (PB). Il SAN è un copolimero casuale amorfo, impiegato per le sue buone caratteristiche di trasparenza e di resistenza chimica, mentre il PB è un polimero amorfo che si trova allo stato gommoso. L'ABS trova come principali settori applicativi, quello dell'elettronica e informatica (produzione di case, involucri di computer e telefoni), quello dell'automobilismo (componenti dell'abitacolo), fino alla produzione di oggetti di arredo e giocattoli. Nelle miscele sono presenti due casi distinti: i due omopolimeri sono *miscibili* (il materiale risultante è omogeneo, costituito da una sola fase e, dunque, una temperatura T_g), oppure *immiscibili* (il materiale risultante non è omogeneo, bifasico e caratterizzato da due T_g).

27. Schematizzazione della struttura dei copolimeri ottenibili a partire da due monomeri distinti A e B: a) copolimeri casuali; b) copolimeri alternati; c) copolimeri a blocchi; d) copolimeri a innesto.

L'impatto sulla biologia e l'ecologia

La chimica organica rappresenta il fondamento della vita di tutti gli organismi viventi. La vita può essere interpretata come una reazione chimica immensamente complessa che si svolge in laboratori atti a fornire risposte a quesiti di natura infinitamente microscopica. Molti dei composti organici che costituiscono l'organismo sono polimeri (o biopolimeri) come, per esempio, la cellulosa del legno, le fibre naturali (come il cotone e la seta), le proteine e i carboidrati degli alimenti, gli acidi nucleici dei nostri geni. Esempi di biopolimeri sono, difatti, il DNA, la molecola dell'informazione genetica - la molecola che determina se un uovo fecondato diventa un uomo o un'ape; l'RNA e le proteine, le molecole che inducono trasformazioni biochimiche, i polisaccaridi¹⁰.

Nella seguente ricerca di tesi risulterebbe impossibile o particolarmente arduo la trattazione di tutti i biopolimeri di interesse biologico, motivo per cui la ricerca stringe il campo di azione alla varietà di biopolimeri di interesse biotecnologico il cui effettivo utilizzo pratico afferrisce al settore industriale e commerciale, con particolare rilevanza rivolta verso il settore tessile. Gli uomini dapprima hanno utilizzato i biopolimeri, o polimeri naturali come indumenti, coprendosi con pelli di animali e pellicce. Più tardi hanno imparato a filare le fibre naturali in filati e a tessere i filati in indumenti. Oggi molti dei nostri indumenti sono fatti da polimeri sintetici (nylon, poliestere, poliacrilonitrile, etc.), di derivazione fossile. Numerose aziende, però, mosse dal sensibile problema ambientale mostrano un crescente interesse verso le cosiddette "bio-fibre", derivanti da biopolimeri a base di acidi di mais, zuccheri e addirittura alghe marine. È, inoltre, in costante crescita il perfezionamento e la ricerca di filati alternativi, provenienti dal bambù, fibre di cocco, juta, canapa, sisal e tele naturali. Ovviamente utilizzare materiali e fibre di origine biologica significa ridurre

notevolmente l'impatto ambientale a diversi livelli e non meramente nel suo ciclo finale rappresentato dall'uso del prodotto. Dal punto di vista della coltivazione e della produzione si evita, infatti, l'uso di componenti chimici e tossici dannosi per l'ambiente; ad esempio dal punto di vista delle materie prime, utilizzare i biopolimeri significa attingere a risorse rinnovabili, quindi illimitate; dal punto di vista dello smaltimento, i materiali ottenuti da risorse biologiche sono materiali per lo più biodegradabili, di conseguenza non creano problemi relativi a tale aspetto¹¹.

Anche il settore dell'edilizia e delle costruzioni ha, da qualche anno, introdotto nuovi materiali a matrice naturale, soprattutto nel sistema dell'isolamento termico e acustico. Sono sempre più innumerevoli i materiali isolanti prodotti a partire da materie prime naturali o di derivazione residuale come fibre di juta, di canapa, cocco, kenaf, lino, etc., catalizzati dalla continua ricerca di settore e dalla costante sperimentazione nel ricercare nuove forme e composizioni materiche. Sono esempi alcuni materiali isolanti prodotti a partire da una pianta endemica, tipica del Mar Mediterraneo, la Posidonia; o, ancora, materiali isolanti prodotti dalla pianta del fico d'india, opportunamente essiccata e trattata con leganti.

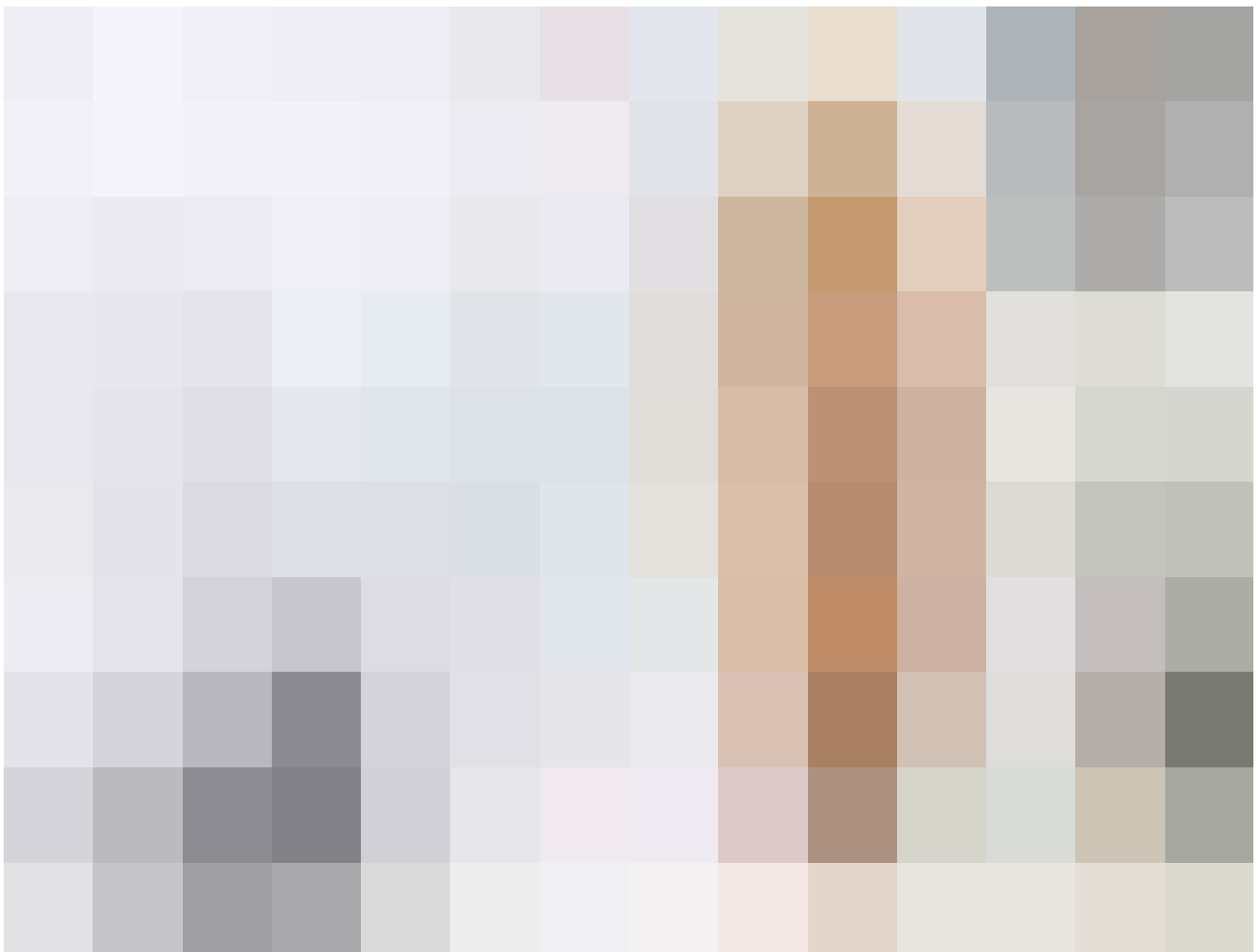
È chiaro come tale processo è sempre più ottemperato da una crescente innovazione legata sia agli aspetti di sostenibilità dell'intero ciclo di vita di un materiale, sia al concetto di *green economy*, di normazione ed ai mutevoli sviluppi di mercato di un determinato prodotto in un particolare segmento di utilizzazione. A partire da queste considerazioni, si propone una ricerca di tesi vocata all'analisi di tale condizione storico-ambientale approfondendo, quindi, lo studio dei biopolimeri e sperimentando nuove soluzioni tecnologiche che vedono l'accostamento ai materiali da costruzione tradizionali, materiali innovativi *-bio* a partire da materie prime naturali facilmente reperibili.

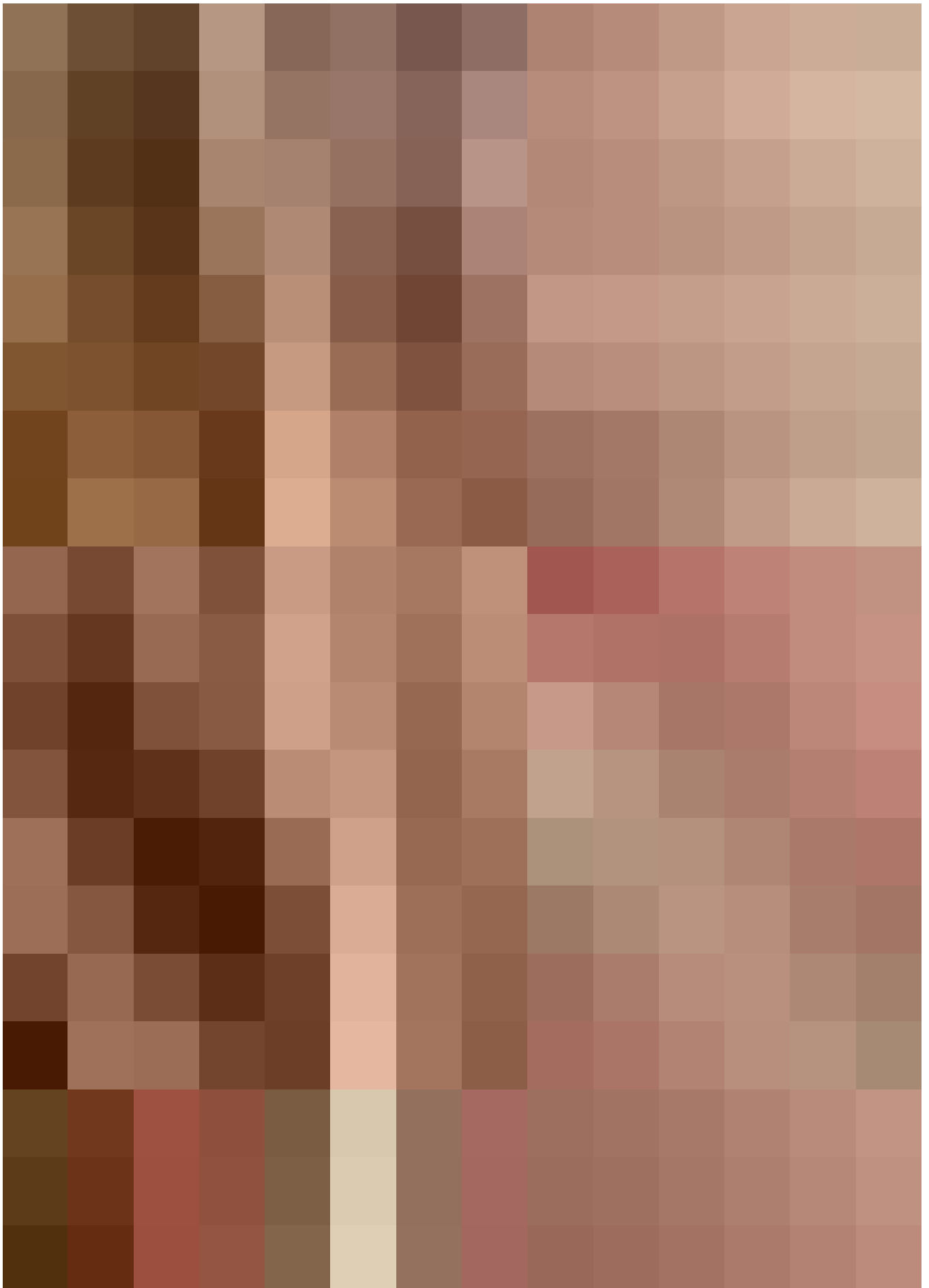
I biopolimeri. Verso l'integrazione in architettura del concetto di "Material Ecology"

Nel Maggio 2020, il gruppo studio del Dipartimento "The Mediated Matter Group" del Massachusetts Institute of Technology - MIT di Boston, capeggiato dall'architetto israelo-americana Neri Oxman, hanno presentato al MoMa di New York la mostra "Material Ecology". Alla mostra la poliedrica designer ha esposto otto progetti fra i più importanti della sua ventennale carriera, caratterizzati da futuristiche creazioni partendo da materiali organici che, attraverso processi di biologia sintetica, sono in grado di adattarsi e funzionare al mondo esterno in totale autonomia, proprio come esseri viventi. Progetti che all'attualità sono ancora allo stadio di prototipazione, ma che costituiscono le fondamenta per una nuova pratica di progettazione integrata e sostenibile non solo in

architettura, ma in innumerevoli settori, penalizzati dall'impiego di risorse non rinnovabili e inquinanti e da processi tradizionali oramai obsoleti. Aboliti i confini tra arte, scienza, architettura e tecnologia, la *summae* della mostra è quello di fornire una visione futuristica tra filosofia e scienza e chiarire il processo come prodotto. Progetti in grado di offrire visioni di un futuro in cui gli oggetti sono ingegnerizzati da bachi da seta e infusi con melanina o batteri, di edifici in grado di rispondere alle variazioni di luce e temperatura, di manufatti architettonici e non in grado di 'invecchiare' in maniera organica e di ritornare alla natura a fine del loro ciclo di vita. Uno dei progetti più interessanti è senza dubbio la "Aguahoja", una struttura realizzata da gusci di gamberetti, esoscheletri di foglie, bucce di mela stampati in 3D, modellati in acqua e colorati con pigmenti naturali (figg.28-29).

- 28. Aguahoja, la struttura biopolimerica progettata e sperimentata tra il 2014 e il 2020, attualmente presente al Cooper Hewitt Smithsonian Design Museum di New York, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group.
- 29. Aguahoja, dettaglio del guscio realizzato con biomateriale composto da gusci di gamberetti, esoscheletri di foglie e bucce di mela, stampati in 3D, modellati in acqua e colorati con pigmenti naturali, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group





Il risultato è una materia-organismo composta da elementi biopolimerici che presentano proprietà sintonizzabili con varie proprietà meccaniche, ottiche, olfattive e persino gustative. Questi polimeri rinnovabili e biocompatibili sfruttano la potenza dei cicli delle risorse naturali e possono essere materialmente programmati per decadere alla fine del ciclo di vita, con lo scopo di alimentare una nuova crescita. Infatti, cellulosa, chitosano, pectina e carbonato di calcio sono combinati in modo da produrre composti biodegradabili di diverse dimensioni che al termine del ciclo di vita programmato possono trasformarsi in acqua restituendo all'ecosistema naturale tutti gli elementi costitutivi. Quando le pelli di biopolimero vengono immerse in acqua, gli elementi a base di pectina si dissolvono rapidamente, consentendo agli elementi a base di cellulosa e chitosano di deformarsi e degradarsi in modo programmato. Lo scopo di fabbricare digitalmente i biopolimeri è sovvertire il ciclo industriale di sovrapproduzione e obsolescenza attraverso l'uso di materiali naturali e al tempo stesso rafforzare e proteggere gli ecosistemi, fornendo una nuova frontiera di progettazione e produzione.

Contrariamente alla maggior parte dei materiali sintetici, questa struttura reagisce con l'ambiente circostante, adattando la geometria, il comportamento meccanico e il colore in risposta alle fluttuazioni di calore, umidità e luce solare. Tale comportamento basato sul tempo è utilizzato come caratteristica di progettazione in grado di rilevare, informare l'utente e adattarsi alle mutevoli condizioni ambientali.

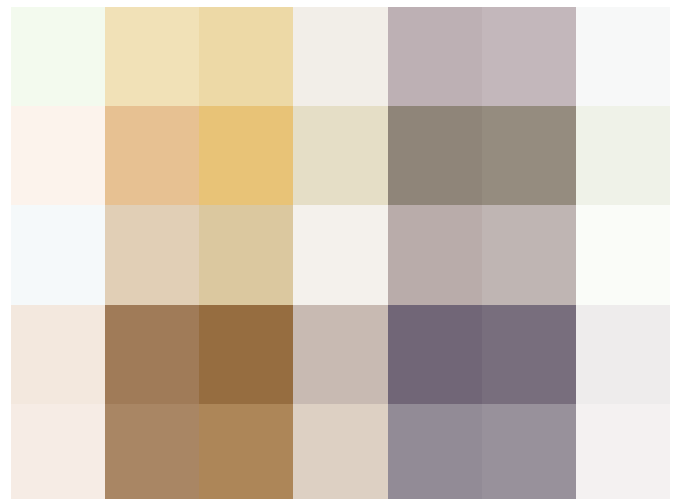
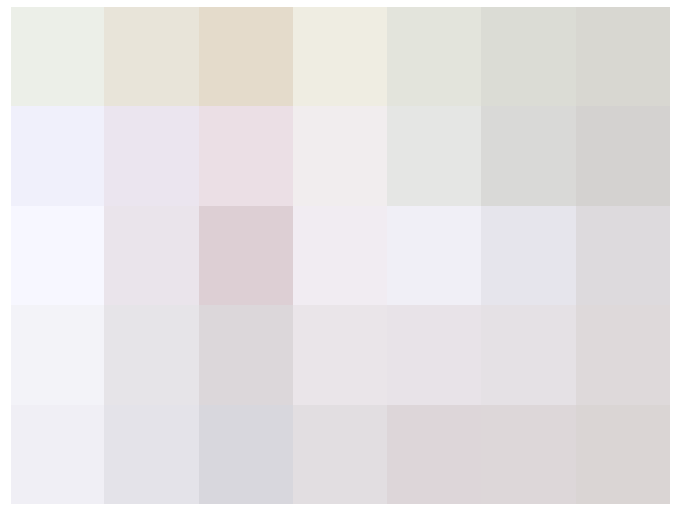
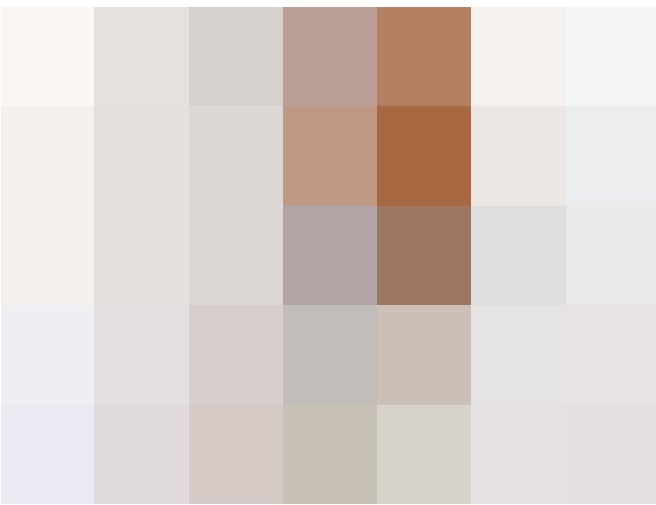
Tale approccio si rende indispensabile per affrontare l'impatto distruttivo del cambiamento climatico e delle pandemie su scala globale, eliminando (o almeno riducendo) i metodi di produzione basati su combustibili fossili e delle relative tecnologie di costruzione. Bisogna, invece, incentivare lo sviluppo e la distribuzione di piattafor-

me di produzione robotica in grado di utilizzare biopolimeri rinnovabili e biodegradabili per la progettazione e la produzione di strutture multiscala con geometrie complesse. La sostituzione dei prodotti in plastica con le loro controparti biopolimeriche, consentirà la biodegradazione o il decadimento dei prodotti e delle relative proprietà in un tempo prestabilito assicurando, durante l'intero ciclo di vita di resistere alla prova del tempo e dei cambiamenti climatici.

"Le strutture sono costituite da un unico sistema materiale derivato dalla chitina – il polimero rinnovabile più abbondante nell'oceano e il secondo polimero più abbondante sul pianeta. Gusci di artropodi vengono trasformati in chitosano per formare una soluzione acquosa di proprietà variabile. Una volta stampati, i costrutti sono ricavati dalla forma attraverso i modelli di evaporazione dati dalla disposizione geometrica degli elementi strutturali e dalla distribuzione gerarchica delle proprietà dei materiali. Segue poi, la corrugazione controllata. Ogni componente trova la sua forma al contatto con l'aria e si biodegrada al contatto con l'acqua. La materia vivente sotto forma di cianobatteri viene rivestita e impregnata su campioni di chitosano per consentire la funzionalizzazione superficiale e conferire proprietà aggiuntive quali resistenza all'acqua e conduttività."

- Neri Oxman

30. Processi di produzione della struttura biopolimerica Aguahoja, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group.



Un altro interessante progetto del gruppo guidato da Neri Oxman, presentato anch'esso al MoMa, è il "Silk Pavilion", una cupola geodetica creata da bachi da seta che tessono parametricamente la struttura stessa della cupola (fig.31). È il primo caso di costruzione digitale e biologica allo stesso tempo, proponendo un metodo che unisce il filato biologico e il tessuto robotico. La struttura di base del padiglione è stata realizzata con ventisei pannelli poligonali realizzati con fili di seta stesi da una macchina a controllo numerico computerizzato (CNC). Una volta configurato, uno sciame di 6.500 bachi da seta è stato posizionato sul bordo inferiore del padiglione, dove hanno iniziato il loro lavoro filando toppe di seta e rinforzando localmente gli spazi tra le fibre di seta depositate dal CNC. La geometria del padiglione è stata creata utilizzando un algoritmo che posiziona un unico filo continuo attraverso le *patch* fornendo vari gradi

di densità (fig.32). La variazione di densità complessiva dei teli di seta è stata demandata al baco da seta stesso, impiegato come una metaforica "stampante" biologica nella creazione di questa struttura secondaria.

31. Bachi da seta che tessono le fibre precedentemente depositate dal CNC, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group.

32. La cupola geodetica, larga tre metri e realizzata in tre settimane, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group.

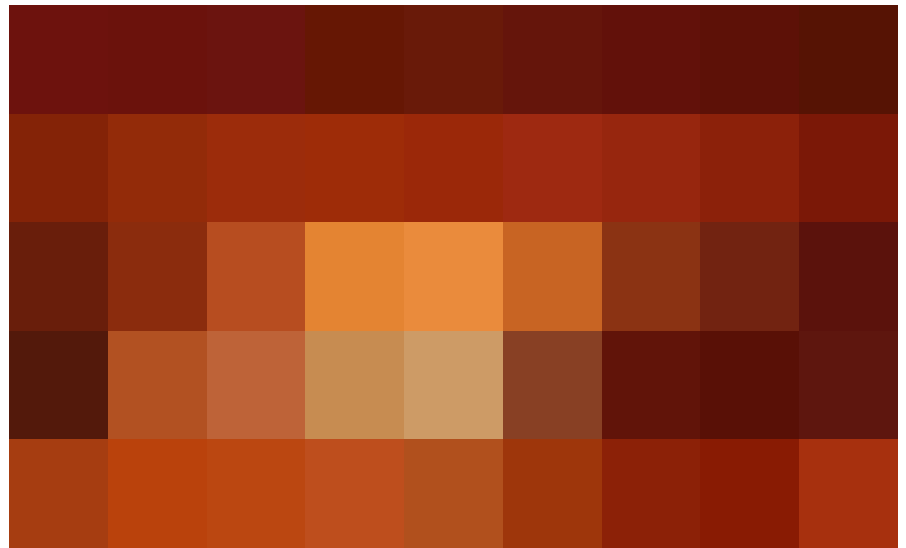


31

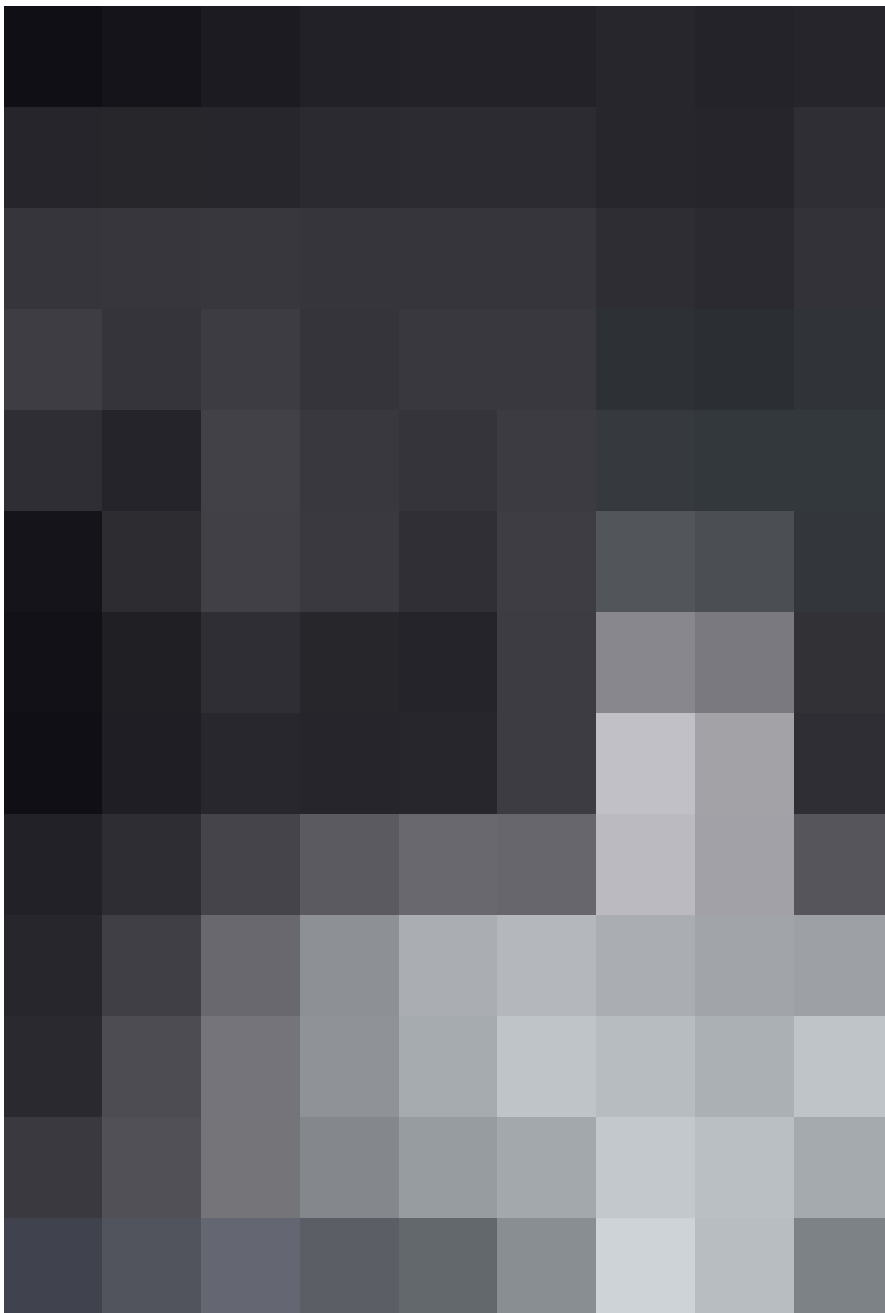


32

- 33. Dettaglio dell'ugello di allumina-zirconia-silice della piattaforma G3DP, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group.
- 34. Elemento finito in vetro stampato dalla piattaforma G3DP, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group.
- 35. Elemento finito in vetro stampato dalla piattaforma G3DP, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group.

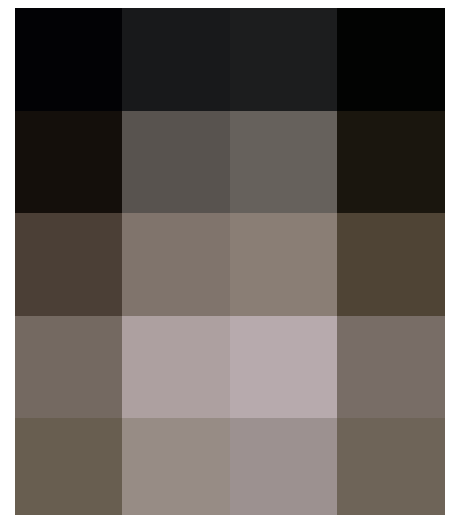


33



34

Anche materiali tradizionali come il vetro hanno goduto di una rivoluzione dei suoi processi. Il vetro, infatti, può essere stampato, formato, soffiato, placcato o sinterizzato e le sue qualità formali sono strettamente legate alle tecniche utilizzate per la sua formazione. In tal senso, il laboratorio di Boston ha sperimentato il processo "G3DP", una piattaforma di produzione additiva progettata per stampare vetro otticamente trasparente. La piattaforma si basa su un concetto a doppia camera riscaldata. La camera superiore funge da cartuccia del forno, mentre la camera inferiore serve per la ricottura della struttura. Il materiale fuso viene incanalato attraverso un ugello di allumina-zirconia-silice che estrude il vetro su un piatto mobile a controllo numerico che ne assicura la morfologia geometrica desiderata in fase di progettazione (figg.33-35).



35

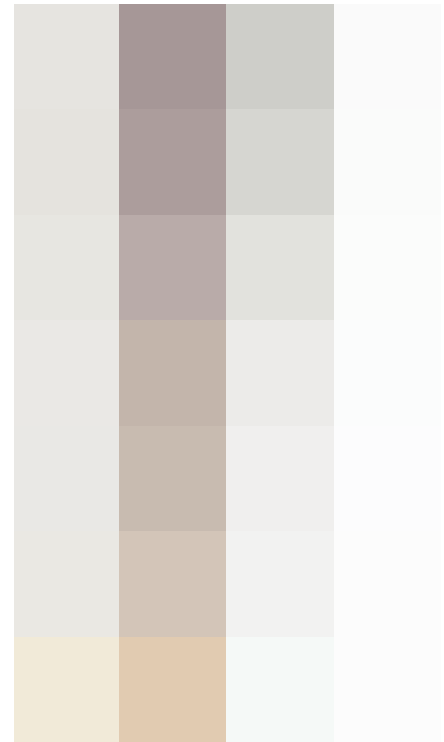
Molto più ardita è la proposta di Neri Oxman in merito all'utilizzazione della melanina in architettura, un composto chimico appartenente alle famiglie polimeriche del *poliacetilene*, delle *polianiline* e dei *polipirroli* e che conferisce, come ben noto, la naturale pigmentazione alla pelle dell'uomo e degli animali. La melanina, inoltre, rappresenta secondo Oxman l'unità nella diversità della vita sulla terra ed è chiaramente collegata alla sopravvivenza biologica nel corso dei secoli.

Il biopolimero viene sintetizzato attraverso una reazione tra un enzima di un fungo (chiamato *tirosinasi*), e il blocco sostitutivo della proteina *L-tirosina* (fig.36). Il pigmento può essere estratto da piume di uccello e nero di seppia, quindi purificato e filtrato in una serie di passaggi. Infine, viene fatta reagire con opportune specie batteriche che la rendono controllabile nello spazio e nel tempo in risposta ai cambiamenti nell'ambiente, in particolar modo della radiazione solare e della temperatura.

La ricerca sperimentale prende il nome di "Totems", installazione progettata per la mostra *Broken Nature: Design Takes on Human Survival* nell'ambito della XXII Triennale di Mi-

lano. Totems è costituito da una serie di oggetti - dalla piccola alla grande scala - caratterizzati da un mattone acrilico trasparente stampato in 3D entro cui è iniettata melanina liquida (fig.37). I biologi hanno notato che la melanina non protegge l'uomo solamente dalle radiazioni UV del sole, ma protegge anche i microrganismi da alte temperature, stress chimici e minacce biochimiche. A tal proposito il gruppo sta esplorando come i materiali a base biologica possono integrare edifici e oggetti nei sistemi viventi che li circondano, usando processi naturali per svolgere funzioni come la produzione di energia e il riciclaggio dei rifiuti.

La progettazione a grande scala, infatti, prevede una facciata biologicamente aumentata, una struttura di vetro a più livelli contenente melanina (figg.38-39). Come afferma Oxman, tali oggetti, dispiegati su scala architettonica e urbana, integreranno alla fine funzioni di 'barriera', come la protezione dagli impatti o dalle radiazioni solari, infondendo pelli di edifici con gradienti di concentrazione, nonché funzioni di 'mediazione' che coinvolgono l'ambiente esterno e interno, come la fotosintesi. In questo modo, le pelli progettate agiscono esattamente come la pelle biologica.



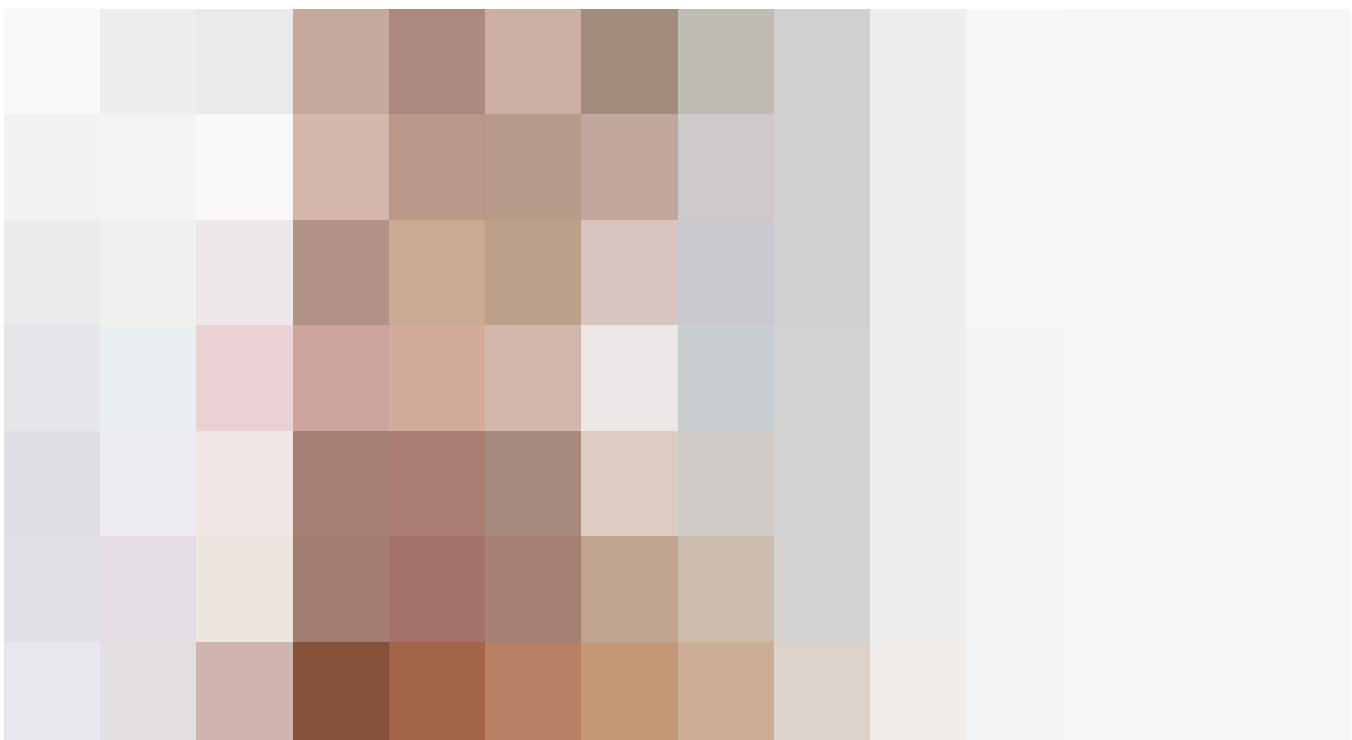
36

36. Sintesi chimica della melanina, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group.

37. Mattone acrilico stampato in 3D con iniettata melanina liquida, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group.

38. Proposta architettonica per una struttura di melanina ambientalmente rispondente, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group (Immagine: Luxigon).

39. Proposta architettonica © Neri Oxman and The Mediated Matter Group.



37



38

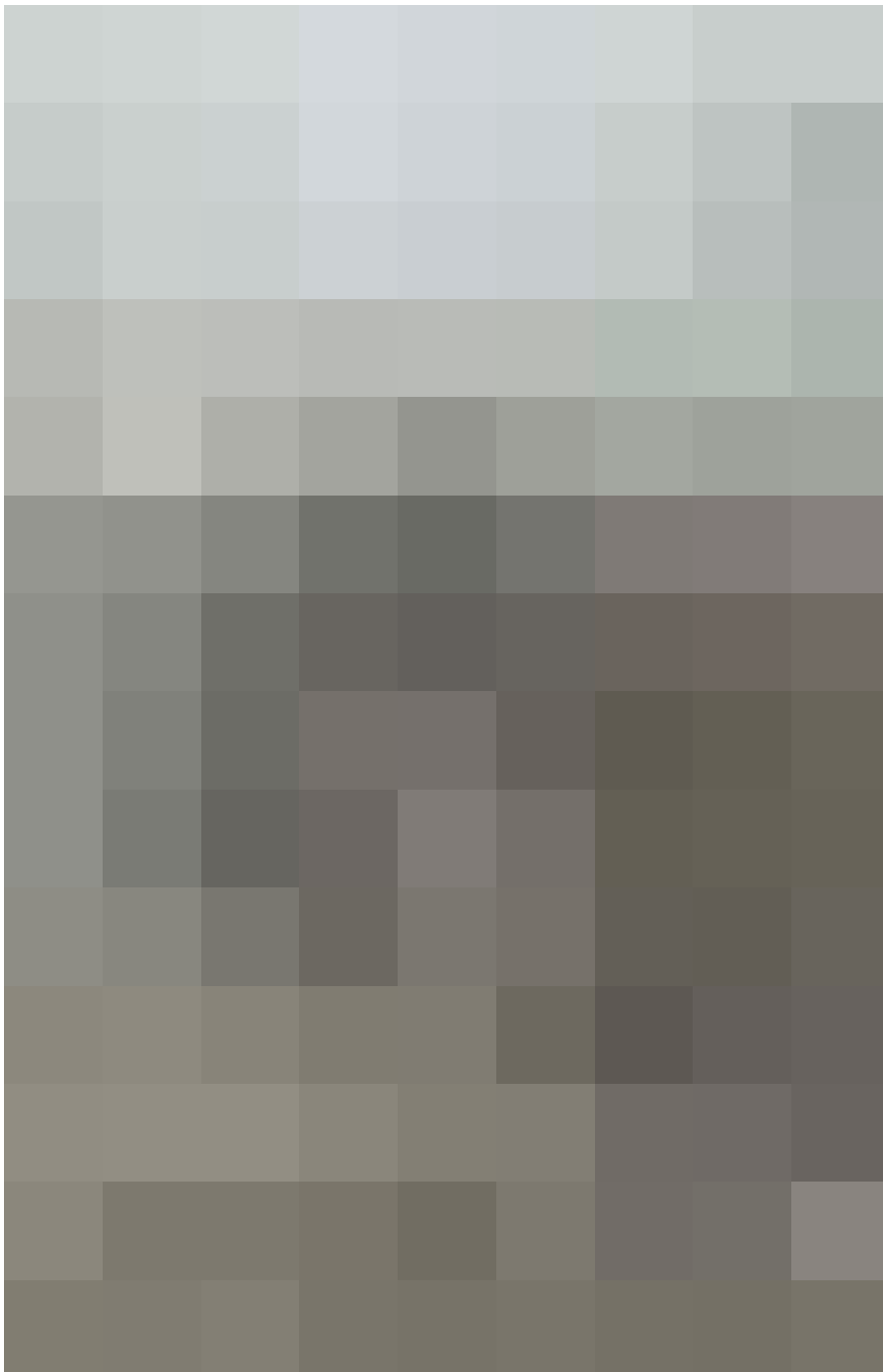


39

Sono innumerevoli le sperimentazioni integrate per la progettazione di dati geometricamente, materialmente e biochimicamente complessi. In tal senso, *Hibrid Living Materials* è un *framework* in crescita esponenziale, sempre più al centro di interessi che spaziano non solo nell'architettura, ma anche nella biologia, nella chimica e nell'ingegneria aerospaziale. L'obiettivo è univocamente determinato: fornire un approccio iterativo per la progettazione computazionale del comportamento

cellulare localizzato attraverso la fabbricazione di materiali che incorporano strumenti di produzione digitale e tecniche della biologia sintetica.

Ad oggi, i campi dei biopolimeri e dei biomateriali hanno fatto grandi progressi verso la creazione di gradienti di materiali e microambienti atti a creare substrati materialmente eterogenei in grado di modificare dinamicamente le proprie caratteristiche sfruttando l'integrazione di cellule e microrganismi.



L'architettura dei biopolimeri

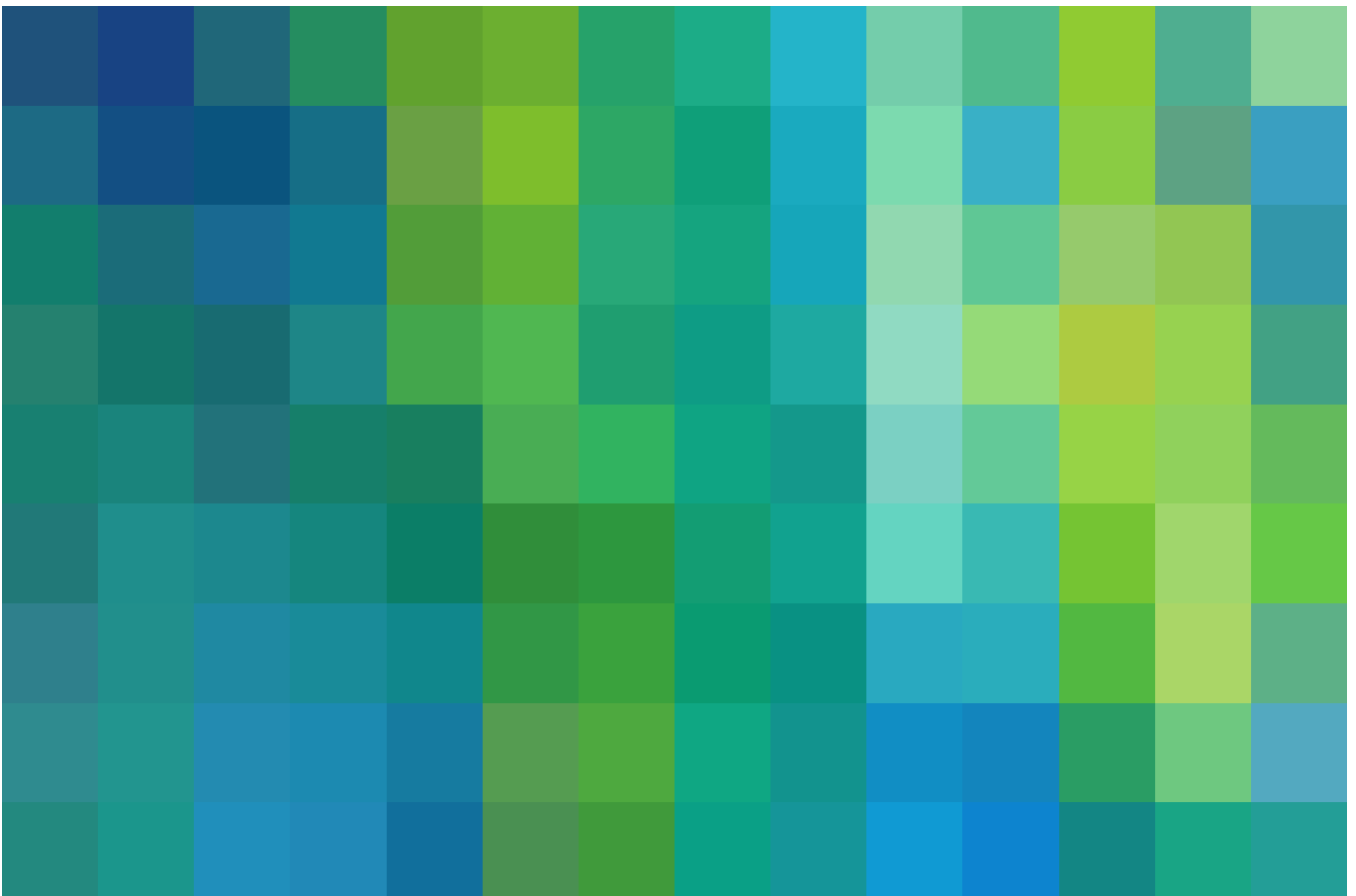
I biopolimeri sono polimeri ottenuti attraverso processi biologici, che conferiscono al prodotto finale una elevata biodegradabilità. Dal punto di vista scientifico possono essere definiti come polimeri a base biologica derivati dalla biomassa o prodotti a partire da monomeri a base organica e possono essere considerati delle alternative sostenibili per innumerevoli settori, dal packaging industriale al settore elettronico, dal settore dei trasporti a quello delle costruzioni. Lo scopo è migliorare l'efficienza delle risorse, riducendo i problemi ambientali associati alla produzione di scarti e rifiuti di imballaggio. Inoltre, il ruolo dei biopolimeri nell'agenda per l'efficienza delle risorse ambientali è quella di sostituire il carbonio fossile con carbonio a base vegetale. Il carbone biologico può essere trattenuto per decenni: in questo modo, non solo si rimuove CO₂ dall'atmosfera, ma si creano anche prodotti esportabili in grado di aiutare le industrie europee a mantenere il proprio vantaggio competitivo.

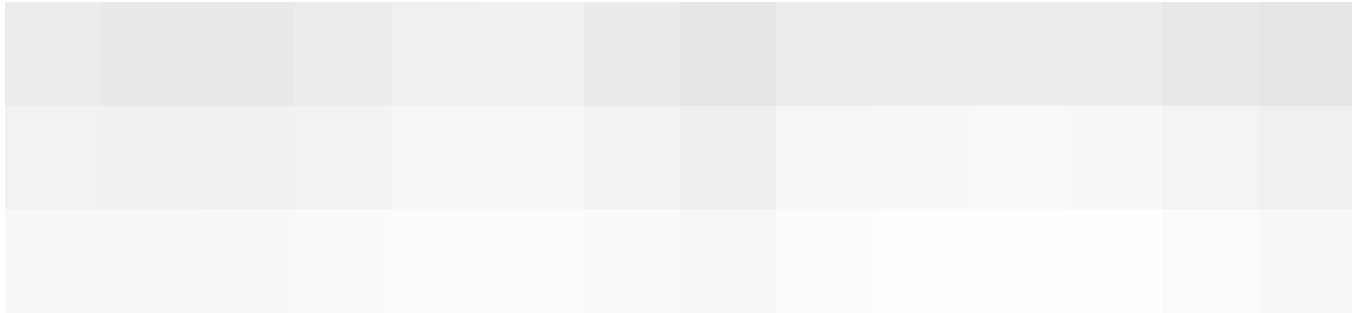
Come già detto nei paragrafi precedenti, l'European Bioplastics Association (EUBP) suddivide i biopolimeri in tre tipologie di biopolimeri o bioplastiche che rappresentano all'attualità le applicazioni più studiate:

- *Polimeri a base biologica (o parzialmente a base biologica), non biodegradabili* (PE, PP, PET, PA, PTT);
- *Polimeri a base biologica e biodegradabili*: (PLA, PHA, PBS, miscele di origine vegetale come pectina, cellulose, amido, etc., miscele di origine animale come chitina, caseina, sieroproteine, etc.);
- *Polimeri a base fossile e biodegradabili* (PBAT).

La base biologica suggerisce la derivazione dei polimeri dalle biomasse, quali piante, mais, canna da zucchero, etc.; biodegradabile, invece, indica il processo chimico di biodegradazione, durante il quale i microrganismi convertono il materiale in sostanze naturali come acqua, biossido di carbonio e compost.

41. Esempio di applicazione di lastre biopolimeriche per un prototipo di facciata architettonica.





42

I biopolimeri presentano caratteristiche simili ai polimeri convenzionali e le prestazioni funzionali dipendono dall'origine (vegetale, animale, microbica), dalla composizione, dalle proprietà fisiche e chimiche e dalle caratteristiche strutturali (proteine, carboidrati, lipidi, acidi nucleici, etc.) (fig.42). La composizione e la struttura dei biopolimeri può essere, quindi, progettata e generata da una diversa varietà di proteine, carboidrati o lipidi.

I particolati biopolimerici, infatti, possono essere fabbricati utilizzando diversi approcci fisico-chimici che richiedono una solida conoscenza dei principi di assemblaggio delle proprietà dei biopolimeri, come, ad esempio, la gelificazione, la segregazione e aggregazione di fase, la riduzione delle dimensioni e la rimozione dei solventi.

I particolati biopolimerici possono essere fabbricati da una varietà di diverse proteine e polisaccaridi, ad esempio proteine del siero di latte, caseina, gelatina, proteine di soia, amido, cellulosa e vari altri idrocolloidi. Inoltre, possono contenere altri componenti, come acqua, lipidi, minerali e zuccheri. Oltre alla composizione complessiva delle particelle di biopolimero è spesso importante controllare l'organizzazione spaziale dei diversi componenti (come la struttura omogenea, a dispersione o nucleo-guscio), nonché la natura delle interazioni molecolari che agiscono tra componenti (legami fisici o covalenti). Il tipo, la concentrazione, le interazioni e la posizione dei diversi componenti presenti all'interno di una particella di biopolimero possono alterare molte delle sue proprietà fisico-chimiche, tra cui densità, indi-

ce di rifrazione, reologia, sensibilità ambientale, e quindi le sue caratteristiche funzionali, come stabilità alla separazione gravitazionale, proprietà ottiche, reologia di massa, etc.

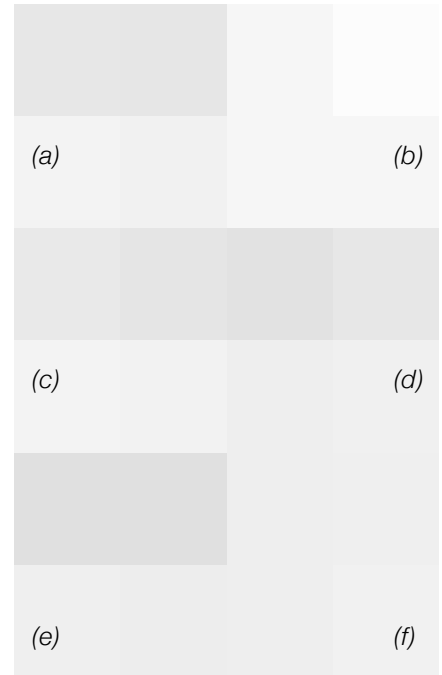
La selezione di particolari proteine e polisaccaridi per formare particelle di biopolimeri dipenderà da una serie di fattori:

- la capacità dei biopolimeri di assemblarsi in particelle;
- gli attributi funzionali richiesti nelle particelle formate come la loro dimensione, struttura, carica, permeabilità e stabilità alle condizioni ambientali e di soluzione;
- il costo, la facilità d'uso e la consistenza degli ingredienti del biopolimero e delle operazioni di lavorazione.

I biopolimeri possono essere creati con un'ampia gamma di dimensioni, forme e strutture interne a seconda della natura degli elementi di base e dei processi utilizzati. La maggior parte dei biopolimeri hanno una forma sferica, sebbene siano possibili anche altre forme, come sferoidi, fibre o grappoli (fig.43). Il diametro medio delle particelle di biopolimero è tipicamente compreso tra 0,01 e 1000 μm^{12} .

La struttura interna di un biopolimero, invece, può essere:

- *omogeneo*: costituito da un singolo tipo di biopolimero o da una combinazione di biopolimeri miscelati tra loro in modo che possano considerarsi omogenei;
- *nucleo-guscio*: costituito da una particella biopolimerica distinta in due fasi, con una delle fasi che forma il guscio. Esso



43



44

42. Classificazione dei biopolimeri in relazione all'origine e alla struttura molecolare.

43. Classificazione dei biopolimeri in relazione alla forma. Le sfere rappresentano aggregati di particelle o fasi separate, mentre le linee continue rappresentano polisaccaridi o proteine lineari: a) complesso molecolare; b) nanofibre e nanotubi; c) sferica con rete di biopolimeri; d) sferica piena; e) core-shell; f) sferoide.

44. Struttura interna dei biopolimeri: a) omogeneo; b) nucleo-guscio; c) eterogeneo.

può variare nella sua composizione, spessore e struttura, e può essere a uno o più strati;

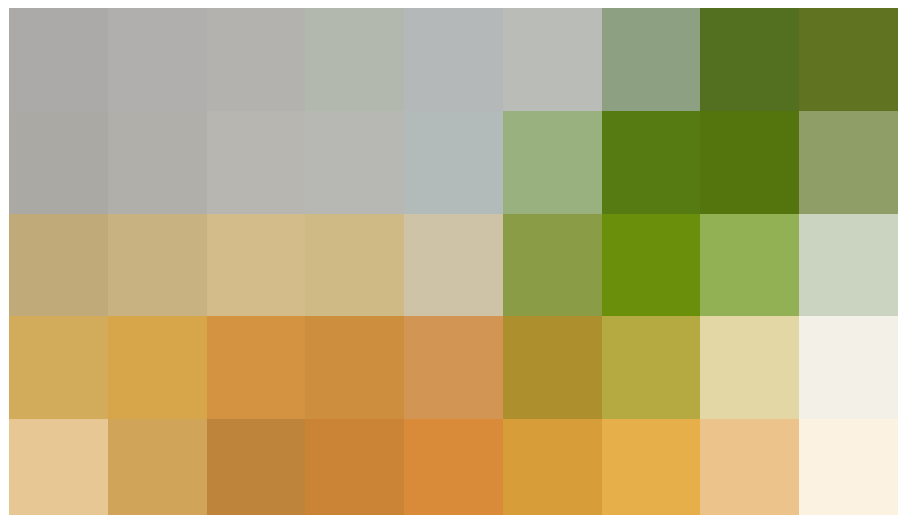
- *eterogeneo*: costituito da una particella biopolimerica costituita da due o più fasi discrete, con una o più fasi disperse. Ad esempio, la fase dispersa può essere rappresentata da una rete di molecole biopolimeriche aggregate e disperse in acqua o, in alternativo, da goccioline lipidiche, particelle solide o bolle d'aria disperse all'interno di una fase idrogel (fig.44).

La struttura interna della particella di biopolimero può svolgere un ruolo importante nel determinare le sue caratteristiche funzionali, come l'efficienza dell'incapsulamento, la capacità di carico, la permeabilità, l'integrità, etc. A loro volta, queste caratteristiche fisico-chimiche determinano il modo in cui altre specie molecolari interagiscono con la particella, come i coefficienti di partizione di equilibrio, i coefficienti di diffusione e le caratteristiche di permeabilità. Inoltre, le proprietà fisico-chimiche delle particelle determinano la massa fisico-chimica dell'intero sistema, come l'aspetto (le proprietà ottiche dipendono dall'indice di rifrazione delle particelle), la consistenza (le proprietà reologiche dipendono dalla porosità delle particelle) e la stabilità (la velocità di sedimentazione dipende dalle particelle densità). È quindi importante essere in grado di definire, misurare e controllare le proprietà fisico-chimiche delle particelle di biopolimero

in modo che esibiscano i particolari attributi funzionali richiesti.

L'integrità di una particella di biopolimero determina la sua capacità di mantenere la sua composizione e struttura in un dato insieme di condizioni ambientali. In molte applicazioni è importante che una particella di biopolimero conservi la sua integrità, ma poi si biodegradi in un'altra serie di condizioni. Ad esempio, un materiale isolante biopolimerico applicato per l'isolamento termico e acustico di un edificio, dovrà garantire durante la propria vita utile uno standard qualitativo e quantitativo delle prestazioni richieste. Esso dovrà essere prestazionalmente costante e morfologicamente stabile nel tempo per poi garantire, in fase di dismissione, una certa biodegradabilità. Il meccanismo coinvolto dipende dal tipo di componenti biopolimerici presenti, dalla natura delle interazioni che tengono insieme questi componenti (come legami elettrostatici, idrogeno, idrofobici, di van der Waals o covalenti) e dalle condizioni ambientali prevalenti (pH, forza ionica, temperatura, agitazione o attività enzimatica).

Quindi, la progettazione razionale di particelle di biopolimero con attributi funzionali specifici, richiede la conoscenza degli elementi di base utilizzati per assemblarsi (proteine e polisaccaridi), delle forze che tengono insieme questi elementi costitutivi (fisici e covalenti) e dei principi fisico-chimici utilizzati.



45. La struttura interna delle particelle di biopolimero e le sue proprietà fisico-chimiche, determinano la massa fisico-chimica dell'intero sistema, come l'aspetto, la consistenza e la stabilità, in www.ditf.de.

I biopolimeri di condensazione delle proteine

Come già detto, i tre tipi di biopolimeri presenti in natura sono le proteine, i carboidrati (polisaccaridi) e gli acidi nucleici.

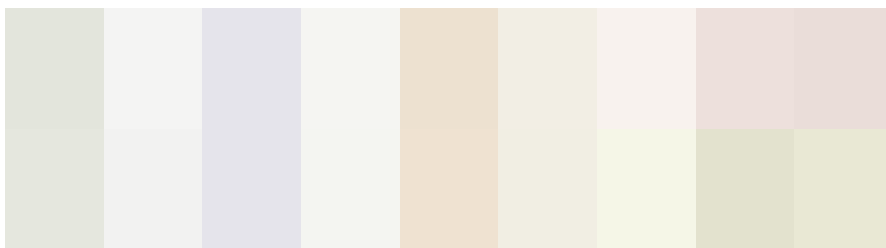
Le molecole proteiche sono polimeri di condensazione di venti diversi aminoacidi naturali distinti in base alle catene laterali. Una molecola formata da due o più aminoacidi si definisce *peptide*. Il legame $-CO-NH-$ si chiama *legame peptidico (carboammidico)*. Una proteina tipica è costituita da una *catena polipeptidica* di oltre un centinaio di residui congiunti da legami peptidici e susseguentisi secondo un ordine rigoroso. Quando sono presenti solo pochi residui di aminoacidi si parla di *oligopeptidi*.

La struttura primaria dei polipeptidi è la sequenza dei residui aminoacidi; la struttura secondaria si deve alla formazione di eliche e fogli; la struttura terziaria all'avvolgersi in unità compatte; la struttura quaternaria all'impacchettamento delle singole proteine in aggregati complessi¹³ (fig.46).



47

piante svolgono una funzione difensiva contro la predazione da parte di altre specie. Le proteine della coagulazione sanguigna proteggono il sistema vascolare dopo una ferita, gli anticorpi e gli antibiotici peptidici ci proteggono dalle malattie. Un gruppo di proteine, chiamate en-



(a)

(b)

(c)

(d)

46

Proteine e peptidi svolgono nei sistemi biologici molte funzioni importanti: alcuni svolgono ruoli di protezione, altri hanno una funzione strutturale. I capelli, le corna, le piume, la pelliccia degli animali e lo strato esterno della pelle sono costituiti da una proteina strutturale chiamata *cheratina*. Il *collagene*, un'altra proteina strutturale, è il maggior componente di ossa, muscoli e tendini. Esistono anche altre proteine che hanno funzioni protettive e di difesa. Per esempio, quelle del veleno dei serpenti e delle tossine delle

zimi, catalizza le reazioni chimiche che avvengono nei sistemi viventi ed anche alcuni ormoni, che regolano queste reazioni, sono peptidi¹⁴. Gli aminoacidi si distinguono per i loro gruppi collaterali, in particolare *ammine*, *carbossilati*, *idrossili*, *fenoli* e *solfidrili*. Il tipo, il numero e la sequenza degli aminoacidi lungo la catena polipeptidica determinano il peso molecolare, la conformazione, la carica elettrica, l'idrofobicità, le interazioni fisiche e la reattività chimica delle proteine¹⁵.

46. Classificazione strutturale delle molecole proteiche: a) struttura primaria - residui aminoacidi; b) struttura secondaria - n-elica; c) struttura terziaria - catena polipeptidica; d) struttura quaternaria - sub-unità associate.

47. Struttura delle molecole proteiche.

I biopolimeri di condensazione dei carboidrati

I carboidrati rappresentano la classe di composti biorganici più abbondante nel mondo biologico. La formula empirica dei carboidrati è $C_n(H_2O)_n$, ovvero quella dell'idrato di carbonio, da cui deriva la denominazione.

Ci sono due classi di carboidrati: i *carboidrati semplici* ed i *carboidrati complessi*. I carboidrati semplici sono i *monosaccaridi* (unità singole), mentre i carboidrati complessi contengono due o più unità saccaridiche unite insieme. I *disaccaridi* hanno due unità saccaridiche legate insieme, gli *oligosaccaridi* hanno da tre a dieci unità legate insieme ed i *polisaccaridi* hanno più di dieci unità unite insieme attraverso un legame glicosidico.

I più comuni polisaccaridi sono l'amido e la cellulosa. Il primo, che costituisce dal 10 al 25% circa della maggior parte degli amidi, è composto da catene di parecchie migliaia di unità di *glucosio* reciprocamente collegate; il secondo, invece, è un polimero che contiene il medesimo monomero (il glucosio) dell'amido, ma le unità della cellulosa sono collegate in modo diverso, e formano filamenti nastriformi, piani. Questi filamenti possono connettersi tramite legami a idrogeno in una struttura rigida. La cellulosa è il materiale organico delle piante, motivo per cui è il più abbondante del mondo, giacché la fotosintesi ne produce annualmente miliardi di tonnellate. La ricerca sui combustibili alternativi sfrutta gli enzimi per demolire la cellulosa della biomassa di rifiuto in glucosio, che si fa poi fermentare ricavando l'etanolo da utilizzare come combustibile.

Un altro polisaccaride, già analizzato nei precedenti capitoli, è la chitina, che costituisce il maggior componente strutturale dell'esoscheletro dei crostacei e degli insetti. Come la cellulosa, la chitina ha legami glicosidici, ma differisce per la presenza di un gruppo acetilamminico che conferisce notevole rigidità strutturale¹⁶.

I biopolimeri di condensazione dei lipidi

I lipidi sono una classe eterogenea di composti organici naturali, classificati in base a proprietà comuni di solubilità. I lipidi risultano insolubili in acqua, ma solubili nei solventi non polari aprotici, tra cui l'etere dietilico, il cloruro di metilene e l'acetone¹⁷. La solubilità dei lipidi in solventi non polari deriva dalla loro significativa componente idrocarburica, composto responsabile delle loro caratteristiche 'oleose' o 'grasse'.

I lipidi dipresentano sotto forma di acidi grassi, cere, grassi, oli e membrane. Gli acidi grassi sono acidi carbossilici aventi lunghe catene idrocarburiche, sintetizzati dall'acetato da cui dipendono le proprietà fisiche. Le cere sono esteri formati da un acido grasso a lunga catena e alcoli a lunga catena. Per esempio, la cera delle api, il materiale di cui sono costituiti gli alveari, è costituita da un acido carbossilico a ventisei atomi di carbonio e da un alcol da 30 atomi di carbonio. Le cere sono molto comuni negli organismi viventi. Le piume degli uccelli sono ricoperte di una cera che le rende idrorepellenti, così come alcuni insetti e frutti in cui si servono della cera come protezione contro parassiti e minimizzare l'evaporazione dell'acqua. I grassi, scientificamente chiamati *triacilgliceroli* (chiamati anche *trigliceridi*), sono composti nei quali i tre gruppi del glicerolo sono esterificati con acidi grassi. I triacilgliceroli liquidi sono chiamati oli, derivanti tipicamente dai frutti di alcune piante, come il mais, la soia, le olive e le arachidi. Un'altra classe di lipidi è rappresentata dai *terpeni*; essi possono essere idrocarburi o possono contenere ossigeno ed essere alcoli, chetoni o aldeidi. Da alcuni secoli i terpeni sono utilizzati come spezie, profumi o farmaci (mentolo, geraniolo, zingiberene, etc.). Infine, anche le vitamine A, D, E, K sono lipidi, così come gli steroidi, sono composti non polari, classificati come lipidi¹⁸.

3.3. Sperimentazione di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina

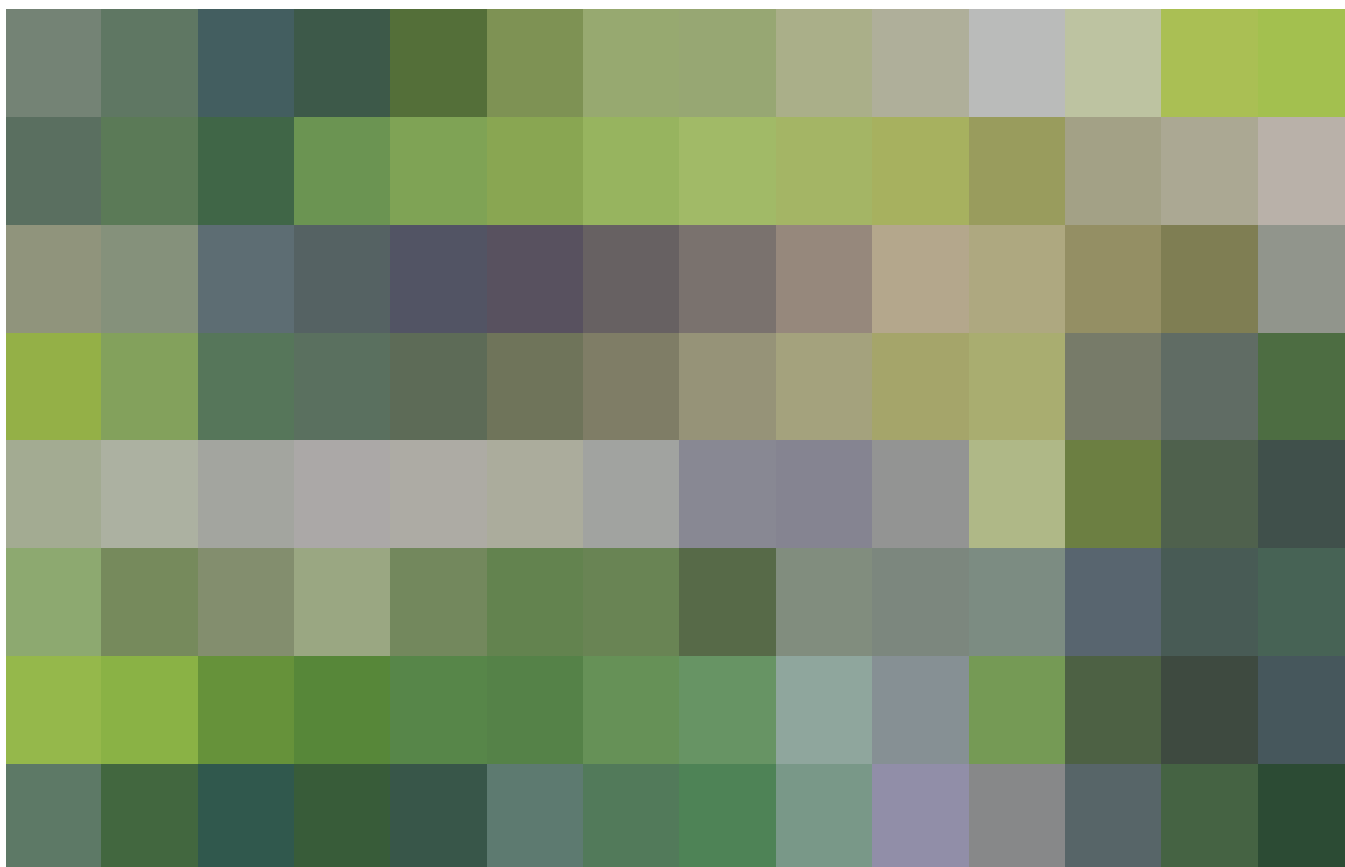
Generalità

Nel paragrafo precedente è stata condotta una attenta analisi delle caratteristiche microstrutturali e macrostrutturali dei polimeri, dei copolimeri e dei biopolimeri. Sono stati approfonditi, inoltre, gli aspetti morfologici, chimici e fisici dei biopolimeri di derivazione organico-naturale e quali sono i possibili impieghi in un mercato sempre più maggiormente vocato alla sostenibilità ecologica dei processi e dell'intero ciclo di vita di un materiale. L'analisi ha opportunamente mitizzato l'importanza del ruolo che ricoprono i biopolimeri nell'immediato futuro e nel loro impiego nei diversi settori che vanno dal packaging all'agricoltura, dall'industria elettrica a quella dei trasporti, dal design alle costruzioni. Tutti questi settori, che rappresentano i modelli di mercato maggior-

te diffusi, sono anche tra i maggiori responsabili dell'impatto ambientale e dei potenziali danni ambientali prodotti dall'intero ciclo di trasformazione delle materie prime a partire dalla loro estrazione, passando per il trasporto e trasformazione in energia e prodotti finiti fino ai possibili danni che produce la loro definitiva eliminazione o smaltimento. Per tale motivo, le moderne industrie hanno virato la propria attività produttiva verso modelli di sviluppo economico ecosostenibili. La Green Economy, infatti, valuta l'impatto che le azioni umane e dei relativi processi di produzione hanno sull'ambiente, cercando di innescare un modello virtuoso che permetta di gestire al meglio le risorse, ottimizzando quanto più possibile la produzione, accrescendo il PIL e diminuendo drasticamente le emissioni di CO₂ nell'ambiente preservando, quindi, l'ecosistema e la biodiversità. Tra i diversi settori, oggetto di approfondimento della seguente ricerca, è l'architettura e l'industria delle costruzioni.

48. Green Economy in edilizia.





49

49. Edificio sostenibile a Singapore.

Raccontare l'industria delle costruzioni al vaglio della sostenibilità, significa interrogarsi su comfort, energia e sul benessere abitativo dell'ambiente urbano e domestico. La sostenibilità del costruito, catalizzato da una mirata legislazione *green*, rappresenta un requisito improrogabile, in quanto la capacità di limitare l'impatto ambientale si lega indissolubilmente alla qualità del manufatto edilizio, o meglio architettonico. Un *trend* virtuoso che, vista la centralità del progetto architettonico, coinvolge non solo il mondo della progettazione, ma l'intera filiera edilizia, dal mercato dei materiali da costruzione agli installatori, alle aziende, alle nuove figure lavorative dell'industria 4.0. (project manager, B.I.M. specialist, ingegnere energetico, bioinformatico e geoinformatico, esperto di marketing ambientale, designer eolico e fotovoltaico, mecatronico green, installatori di impianti termici a basso impatto, etc.),

Nella nascente bioedilizia, un nuovo modo di approcciarsi al mercato che si distingue per i suoi principi sostenibili e che ha saputo dare un contri-

buto notevole alla Green Economy e quello della produzione e commercializzazione di materiali isolanti *green*. Nella storia, tali materiali sono considerati inquinanti poiché la maggior parte sono di derivazione fossile o contenenti materiali altamente tossici. Per tale motivo, trovano sempre maggior diffusione materiali biocomposti, come quelli derivanti da fibre di legno, dalla canapa, dal kenaf, dal cotone, dalla lana, dal lino e addirittura da alghe marine e scarti di fico d'india.

Oggetto d'indagine del seguente capitolo è la sperimentazione di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina che ha come dato, l'analisi di una fibra tessile storica, il *Lanital*, una fibra italiana commercializzata tra il 1937 e il Dopoguerra (sostituito successivamente dalla *Merinova*) per far fronte alle Sanzioni Economiche dell'Italia Fascista del 1935. La nuova fibra sperimentata, dai connotati propriamente naturali e sostenibili, si inserisce nel vasto panorama dei materiali isolanti, offrendo, mediante validazione scientifica, una efficace alternativa ai materiali isolanti convenzionali.

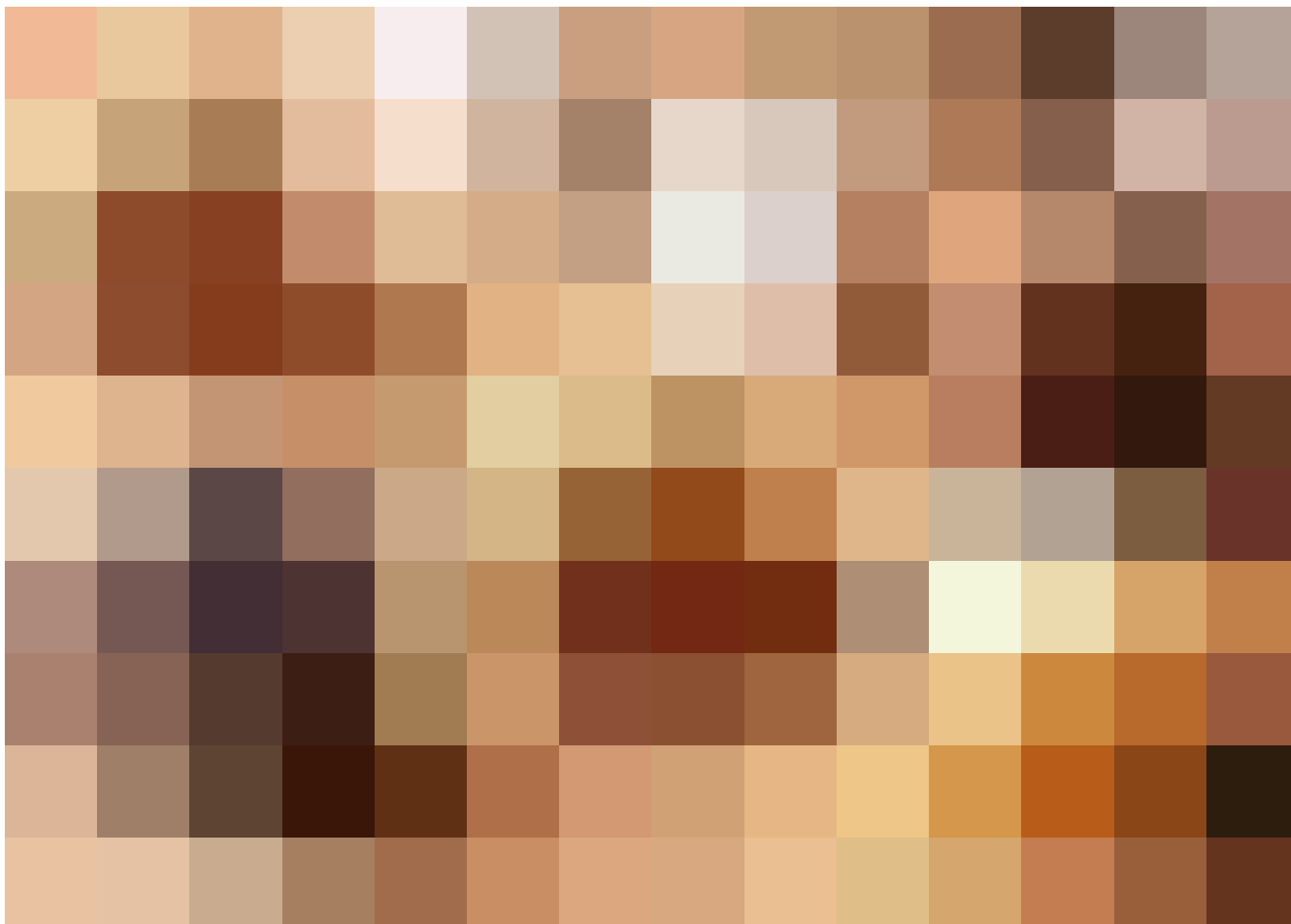
Classificazione merceologica delle fibre naturali e delle tecnofibre

Nella storia, l'uomo è sempre stato consapevole della importanza dell'isolamento termico della propria dimora. Villaggi trincerati preistorici realizzati con materiali vegetali come canna, paglia, lino o anche pelli d'animali, pellicce hanno rappresentato uno dei primordi di isolamento termico. Con lo sviluppo dell'agricoltura, materiali naturali come la terra e la pietra trovano largo impiego per la realizzazione dell'involucro abitativo. Viene sfruttata inconsapevolmente l'alta densità di tali materiali, generando un ritardo del trasferimento termico migliorando notevolmente il benessere abitativo sia in estate, sia in inverno. I materiali organici sono stati, dunque, i primi materiali impiegati per un efficiente isolamento termico, ma che presentavano l'inconveniente di non resistere per molto tempo. È così che nel XIX secolo sono stati

sviluppati materiali isolanti complementari più durevoli e performanti. Sono sviluppati materiali sempre più artificiali e sintetici, che con il processo di industrializzazione vengono riprodotti secondo standard prefissati, favorendo il processo di produzione, trasporto e posa in opera. Trovano ampia diffusione materiali isolanti come lana di roccia, fibra di vetro e materiali isolanti sintetici derivanti dall'utilizzo di materie fossili.

Con il processo di sensibilizzazione della attività umana sulla terra e della crescente risposta di una economia sostenibile, materiali naturali e tradizionali sono oggetto di nuovi studi sperimentali, per migliorare non solo le caratteristiche prestazionali, ma di favorire la diffusione di materiali sostenibili ed ecocompatibili. In un vasto campionario di materiali sostenibili, quelli oggetto di rinnovato studio, sono i tradizionali materiali a matrice fibrosa che, a seconda della loro origine, si dividono in *naturali* e *tecnofibre*.

50. Materiali isolanti di origine naturale e sintetica.

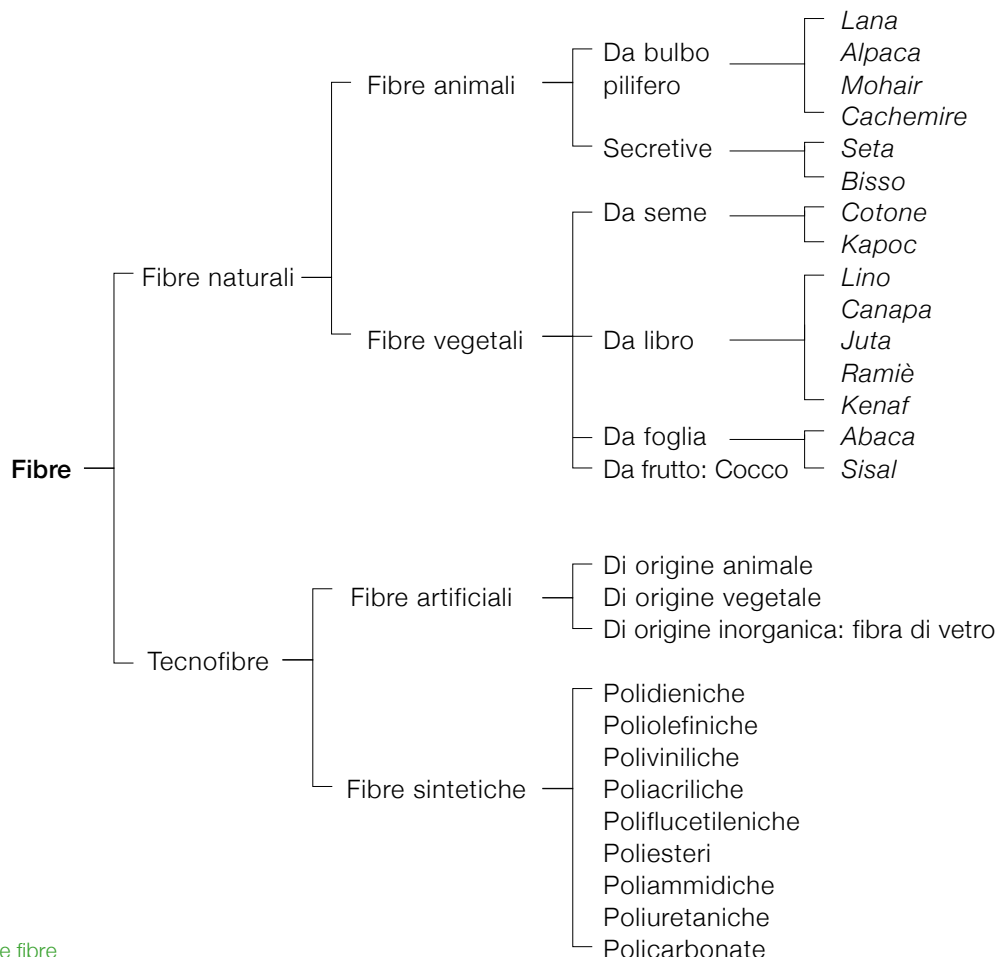


Le fibre naturali si trovano in natura sotto forma di filamenti più o meno lunghi. Le tecnofibre, invece, sono ottenute artificialmente partendo da materie prime polimeriche di origine naturale, oppure da polimeri sintetici ottenuti da materie prime non polimeriche mediante reazioni chimiche di polimerizzazione.

Le *tecnofibre* si dividono in *artificiali* e *sintetiche*. Le *tecnofibre artificiali* possono essere ricavate da *polimeri di origine vegetale* (viscosa, cupro, acetato, fibre polisoniche, fibre alginiche), da *proteine animali* (caseina, albumina, etc.) e da *filamenti inorganici* (metalli, di vetro, di roccia, etc.).

Le *fibre naturali* si dividono in *animali* e *vegetali*. Le *fibre naturali animali* sono le *lane* (peli dei velli di pecora, capra, cammello, lama, etc.), e le *sete*, cioè quelle fibre costituite da filamenti prodotti da alcuni insetti (seta di ragno, seta tussah) o da alcuni molluschi (bisso o seta marina). Le *fibre naturali vegetali*, sono fibre cellulosiche che a seconda della tipologia di pianta da cui si ricavano, vengono distinte in *fibre da semi* (cotone, kapoc), *fibre da libro* o *stelo* (lino, canapa, juta, etc.), *fibre da foglie* (sisal, manila, alfa, etc.) e *fibre da frutto* (cocco, fichi d'india, etc.).

Le *tecnofibre sintetiche*, infine, sono ottenute da composti chimici semplici per polimerizzazione e successiva filatura del polimero (olefine, derivati vinilici, derivati acrilici, fenoli, ammidi, aldeidi, derivati stirenici, etc.)¹⁹.



51. Classificazione merceologica delle fibre naturali e delle tecnofibre.

Classificazione chimica delle fibre naturali e delle tecnofibre

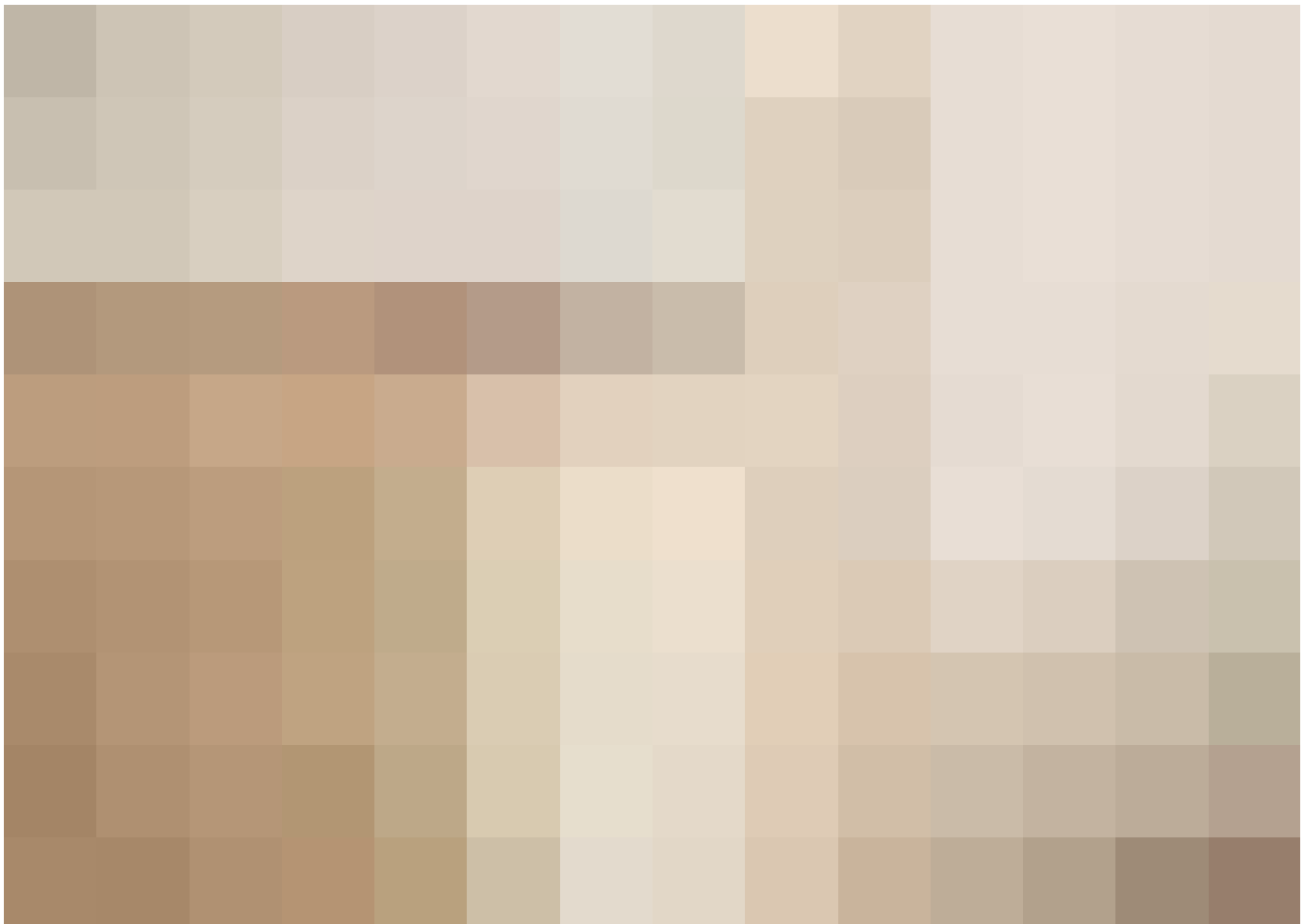
In merito alla composizione chimica, i materiali fibrosi hanno un vasto campionario per la maggior parte rinveniente dalle macromolecole organiche, ma non mancano anche composti minerali e derivati dai metalli.

Come già affrontato nello studio dei biopolimeri, le *fibre naturali di origine animale* (lana, velli di capre e di camelidi, etc.), sono composti essenzialmente da una proteina, la *cheratina*, caratteristica delle parti di rivestimento protettivo degli animali; anche i filamenti secreti dal baco da seta e dagli altri animali serigeni, sono invece composti da un'altra proteina detta *fibroina*.

Le *fibre naturali di origine vegetale*, invece, sono composte da cellulosa, in alcuni casi pura (cotone), in altri mescolata a sostanze incrostanti quali la *lignina*, la *pectina* e le *emicellulose* (lino e canapa).

In merito alle *fibre artificiali*, è necessario distinguere quelle di *origine animale*, derivate da proteine animali come la caseina del latte (in seguito saranno approfondite le fibre autarchiche del Lanital e della Merinova, oggetto della sperimentazione della presente tesi) e quelle di *origine vegetale*, ottenute da proteine estratte dai semi del mais, dell'arachide, della soia o dalla cellulosa trattata. In quest'ultimo caso si possono ricavare fibre derivate dalla cellulosa rigenerata (viscosa, cupro, fibre polisoniche, etc.), o da cellulosa esterificata (acetato). Sempre tra le fibre artificiale di origine vegetale sono, inoltre, da ricordare le fibre alginiche, derivate dall'acido alginico presente nelle alghe (è il caso della posidonia oceanica, impiegata come materiale isolante) come alginato di sodio e le fibre di gomma ottenute per coagulazione del lattice estratto (un esempio particolare è quello ottenuto attraverso il procedimento di coagulazione del lattice estratto dall'*Hevea brasiliensis*).

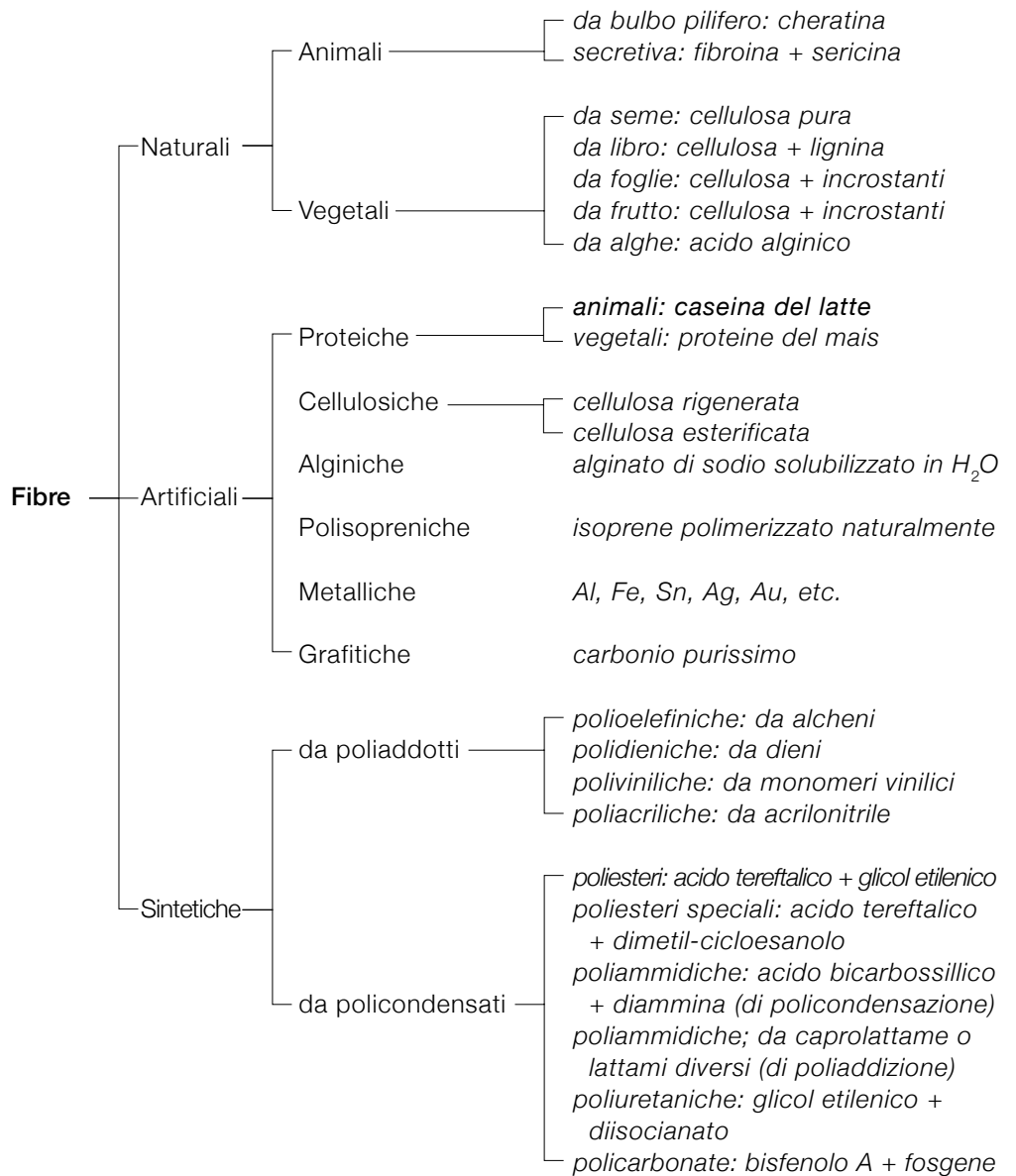
52. Materiali isolanti fibrosi di origine naturale.



Infine, le più comuni *fibre artificiali di origine minerale* sono: le fibre di vetro composte da silice (SiO_2) addizionata o con carbonato di sodio, Na_2CO_3 (vetri sodici), o con acido bórico, H_3BO_3 , e borace, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (fibre al boro); le fibre di roccia, le fibre di amianto (oggi totalmente eliminata per la sua tossicità), vetri cellulari e silicati; le fibre metalliche composte da alluminio, stagno, argento, etc., normalmente ricoperte con resine artificiali o sintetiche e le fibre grafitiche, composte da grafite e grafene,

minerale che rappresenta uno degli stati allotropici del carbonio e che si pone, per le eccezionali caratteristiche, come materiale del futuro.

Le fibre sintetiche vengono classificate sulla base della loro natura chimica specificata dalla famiglia di appartenenza dei polimeri che le costituiscono: poliolefiniche, poliviniliche, poliacriliche, poliammidiche, poliesteri, polidieniche, poliuretaniche ed elastomeriche ottenute da gomme sintetiche²⁰.



Struttura macromolecolare delle fibre naturali e delle tecnofibre

Le fibre naturali e le tecnofibre possono considerarsi per la maggior parte di natura organica e costituite da polimeri e biopolimeri. La tematica è stata ampiamente esaminata nel presente capitolo, ma risulterebbe maggiormente esaustiva se declinata in funzione della struttura macromolecolare delle fibre naturali e sintetiche.

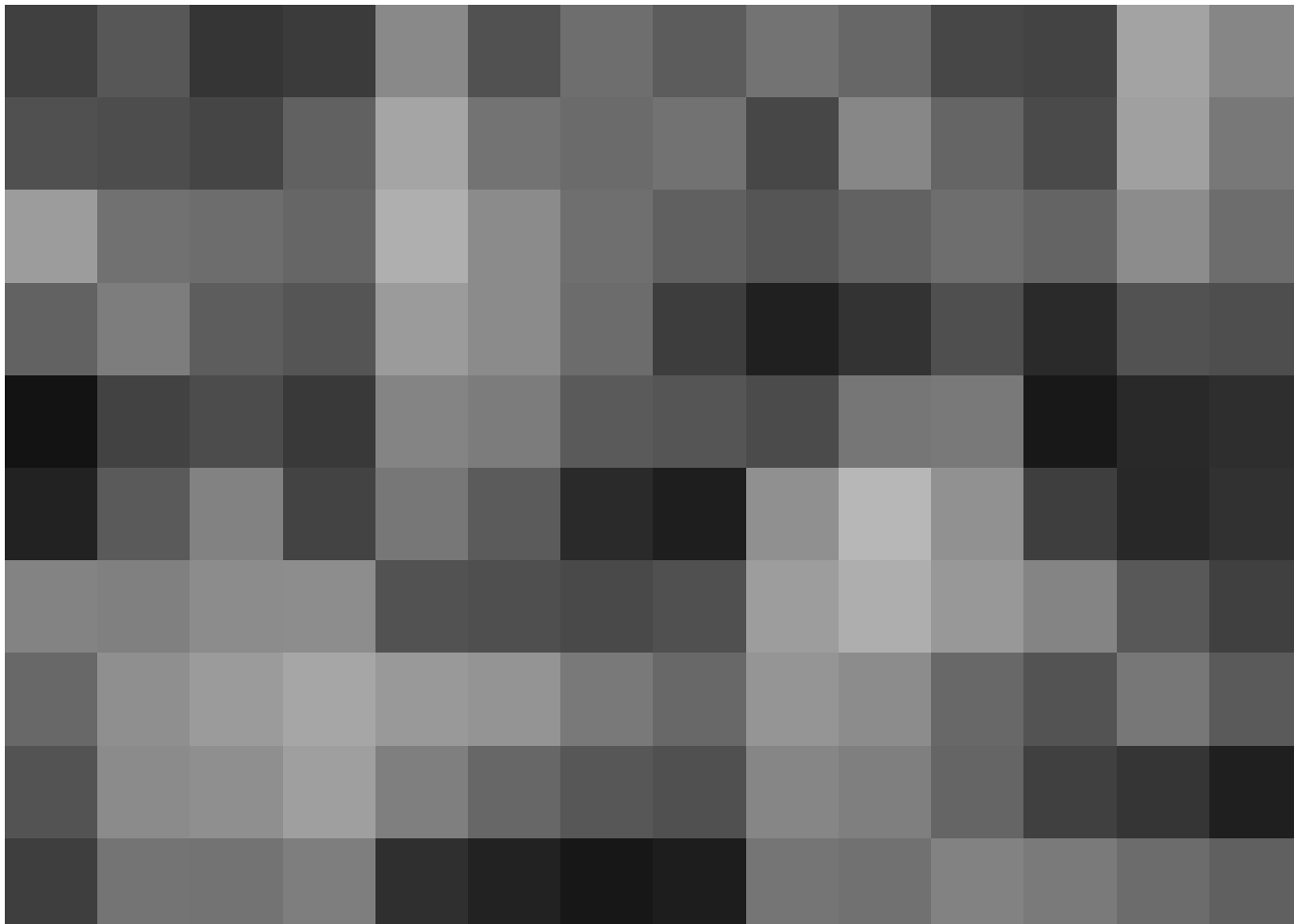
Come già detto, con il termine *polimero* si intende una sostanza macromolecolare costituita da raggruppamenti di molecole che si ripetono in egual misura; tali raggruppamenti sono definiti *unità strutturali* o *ripetitive* o *monomeriche*, uniti fra loro con due o più legami covalenti. È bene ricordare che un polimero può essere costituito dall'unione di monomeri uguali (*omopolimero*), oppure da monomeri di due o più tipi diversi (*copolimero*).

Nel caso delle fibre, la condizione più

frequente è quella del copolimero in cui le diverse unità ripetitive possono essere distribuite casualmente nella macromolecola (*copolimeri casuali*), distribuite con alternanza di lunghe sequenze di ciascuna unità ripetitiva (*copolimeri a blocchi*), distribuite secondo una sequenza di una unità strutturale in cui sono innestate ramificazioni costituite da unità monomeriche di tipo diverso (*copolimeri a innesto*), oppure distribuite secondo una struttura ripetitiva con monomeri alternati (*copolimeri alternati*).

Le macromolecole di un polimero presentano caratteristiche chimiche e morfologiche simili, ma presentano in genere masse molecolari differenti. Infatti, un polimero viene caratterizzato da una massa molecolare media o da un grado di polimerizzazione, cioè dal numero di unità strutturali che costituiscono mediamente le macromolecole. Il grado di polimerizzazione, inoltre, influisce nelle proprietà fisiche, chimiche e meccaniche del polimero.

54. Struttura polimerica della seta, in Peacock E.E., "Il deterioramento biologico delle fibre tessili in contesti archeologici. Implicazioni per le scelte di conservazione", in atti di convegno "Intrecci vegetali e fibre tessili da ambiente umido: analisi, conservazione e restauro" organizzato dall'Ufficio Beni Archeologici della Provincia autonoma di Trento, Trento, 2003.



La morfologia macromolecolare di un polimero è distinta in tre diverse strutture:

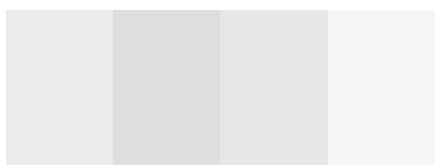
- *polimeri lineari*: costituiti da lunghe catene di unità strutturali bifunzionali;
- *polimeri ramificati*: costituiti da lunghe catene di unità bifunzionali con l'inserimento di alcune unità trifunzionali alle quali sono ancorate delle catene più corte;
- *polimeri reticolati o tridimensionali*: costituiti da un reticolo a maglie irregolari formate e collegate fra loro da unità strutturali tri-tetrafunzionali con presenza o meno anche di unità bifunzionali²¹.

Le fibre sono costituite essenzialmente da polimeri lineari (in alcuni casi da strutture leggermente ramificate), cioè da lunghe catene polimeriche formate da atomi uniti da forti legami covalenti. Le diverse catene polimeriche tendono a legarsi fra loro con legami trasversali che nella maggior parte dei casi sono deboli legami intermolecolari come le forze di Van der Waals, i *legami dipolari* e a *ponte di idrogeno*; sono nelle proteine si trovano forti legami trasversali di tipo chimico quali *ponti salini* o *legami cistinici*²². La formazione di legami trasversali intercatena è favorita dall'allineamento delle catene che è a sua volta stabilizzato e favorito dalla formazione di questi legami. Questo allineamento porta a un ordinamento tridimensionale delle catene polimeriche con formazione di *cristalliti* (o *zone cristalline*) nella fibra. La diffrazione ai raggi X dei polimeri fibrosi ha messo, infatti, in evidenza elementi di simmetria relativi a un certo grado di cristallinità, con zone cristalline inglobate in zone amorfe (fig.55). Le lunghe catene polimeriche, possono, dunque, attraversare le diverse zone del polimero con segmenti disordinati nelle zone amorfe e altri segmenti ordinati nei cristalliti. L'ordinamento delle catene e della cristallinità è favorita dalla struttura lineare delle sue catene e dipende dalla storia termica del polimero. Nei copolimeri ramificati, invece, la cristallinità è molto bassa,

mentre nei copolimeri reticolati o tridimensionali è pressoché nulla.

La struttura lineare, inoltre, favorisce anche il processo di produzione della fibra; il polimero, infatti, nel passaggio attraverso la trafilatura o filiera, denominato estrusione, viene sottoposto a notevoli sollecitazioni meccaniche che agiscono lungo la fibra orientando longitudinalmente i cristalliti. Le catene, allineandosi, favoriscono un ulteriore ordine nella struttura con notevole rinforzo della fibra. La cristallinità e l'orientamento delle catene polimeriche, favorendo la formazione di legami intercatena, aumentano la resistenza allo scorrimento delle catene polimeriche e influenzano le caratteristiche meccaniche delle fibre che da questo scorrimento dipendono, come la tenacità che viene aumentata o la flessibilità che viene, per contro, diminuita.

Le zone amorfe della fibra, anche se hanno subito un certo orientamento, sono quelle fisicamente più deboli e chimicamente più reattive. Infatti, sono le zone più solubili, le prime che reagiscono con i reattivi chimici e che interagiscono con i solventi, e sono anche i punti dove il colorante effettua il primo 'aggrappaggio' per penetrare nella fibra. Tale struttura, cristallizzata e amorfa, è un requisito indispensabile per impiegare una fibra. Una cristallinità elevata, infatti, se da un lato aumenta la tenacità, la rigidità e la stabilità chimica, dall'altro ne rende difficile la tingibilità e ne diminuisce la flessibilità, il comportamento all'acqua e l'allungamento. L'orientamento molecolare è sempre parallelo all'asse fibroso, in maniera quasi perfetta per le tecnofibre, nelle quali il processo produttivo di estrusione orienta le macromolecole nel verso della lunghezza e in maniera meno precisa nelle fibre naturali. Per esempio, l'orientamento molecolare nel cotone è elicoidale; nel lino, invece, parallelo. Ciò contribuisce al diverso comportamento di queste due fibre rispetto alle prove meccaniche: il lino ha un'alta tenacità e un basso allungamento; il cotone, al contrario ha media tenacità e alto allungamento²³.



55

55. Cristalliti, in Quaglierini C., "Chimica delle fibre tessili", Zanichelli, Bologna, 2012, pag.6.

Proprietà delle fibre: caratteri morfologico-organolettici

Oggi è sempre più usuale utilizzare materiali isolanti fibrosi a vista per la realizzazione di controsoffitti, plafoni, contropareti, partizioni interne, rivestimenti, oggetti di arredo e design (fig.56). I caratteri morfologico-organolettici, infatti, giocano un ruolo essenziale in tal senso. La *lunghezza* e la *finezza* di una fibra naturale o artificiale sono molto importanti sia per la sua lavorazione sia per la qualità del prodotto finito. La lunghezza di una fibra naturale, nella manifatturiera tessile, viene misurata in millimetri, mentre la finezza (cioè il diametro della fibra), in micrometri. Normalmente le fibre più corte si hanno nel lino e nella canapa, mentre la lana ha delle fibre piuttosto lunghe. Un caso particolare è rappresentato dalla seta che è l'unica fibra naturale a essere prodotta a filo continuo. Nel settore dell'edilizia, a meno che la fibra non sia utilizzata per impieghi specifici, in cui è richiesta una notevole qualità della fibra, le dimensioni non sono dei parametri di importanza specifica, in quanto il materiale viene lavorato in rotoli, in pannelli o materiale sfuso e impiegati per l'isola-

mento di intercapedini o plafonature.

Le tecnofibre viceversa sono tutti in filo continuo e solo quando devono essere utilizzate 'in mischia' con fibre naturali vengono tagliate a una lunghezza prestabilita denominata *fiocco*.

Un altro parametro molto importante per i materiali fibrosi da impiegare per la realizzazione di elementi a vista, è la lucentezza, dovuta alla rifrazione e alla riflessione della luce sulla superficie della fibra stessa. Più la fibra presenta una superficie uniforme, più aumenta la sua lucentezza. Solitamente, le fibre naturali sono meno lucenti di quelle sintetiche; anche un elevato orientamento molecolare, e quindi di una elevata cristallinità, gioca un ruolo importante nella lucentezza finale. Altri parametri importanti per un materiale fibroso impiegato per la realizzazione di sistemi tecnologici a vista, possono essere la *sofficità*, la *morbidezza* e la *voluminosità*, tutti parametri desunti dall'industria tessile. Infatti, essi sono riassunti in un unico termine definito come "mano tessile" della fibra. Una fibra ha mano sostenuta se al tatto risulta rigida e poco soffice; ha, invece, una mano lenta se è morbida ed elastica alla pressione.

56. Sistemi fonoassorbenti a vista di una palestra realizzati con pannelli modulari in fibra (lana di legno) prodotti e commercializzati dall'azienda Celenit (ex Società Anonima S.A.F.F.A. di Milano), in www.celenit.com.



Proprietà delle fibre: caratteri fisico-meccaniche

Le caratteristiche più importanti di una fibra sono, dal punto di vista fisico, l'*igroscopicità*, la *stabilità termica*, il *comportamento nei confronti della combustione*, la *feltrabilità* e la *coibenza*; dal punto di vista meccanico, invece, sono la *tenacità*, l'*allungamento a rottura* e l'*elasticità*.

- L'*igroscopicità* è la capacità di una fibra di assorbire umidità dall'ambiente. Dipende dalla composizione chimica e dalla struttura della fibra ed è favorita dalla presenza di gruppi polari quali gli ossidrilici, carbonili, carbossilici e di zone amorfe. La fibra di lana e le fibre alginiche (non impiegate nel settore delle costruzioni, ma in quello tessile) sono le più igroscopiche. La lana, infatti, assorbe acqua fino al 33% del peso proprio.
- Il *comportamento al calore* e, quindi, della *stabilità termica*, nelle fibre naturali (sia vegetali che animali), non fondono ma si decompongono (per esempio il cotone a 120°C ingiallisce, a 140°C si decompone; la lana, invece, a 100°C diventa 'ruvida', a 130°C si decompone, a 200°C imbrunisce, a 300° carbonizza). Le tecnofibre che, come detto, sono costituite da polimeri lineari in parte cristallini e in parte amorfi, presentano tre temperature critiche alle quali subiscono cambiamenti di stato. Partendo da temperature molto basse, innalzando la temperatura del polimero si ha il passaggio delle parti amorfe da uno stato vetroso (rigido e fragile) a uno stato viscoelastico (gommoso) alla *temperatura di transizione vetrosa*; a temperatura più alta, le parti amorfe passano dallo stato viscoelastico allo stato semifluido alla *temperatura di rammollimento*; infine, si raggiunge la fusione delle parti cristalline alla *temperatura di fusione*. Alcune delle tecnofibre si decompongono, ma ciò avviene ad alte temperature e per la maggior parte di queste fibre la decom-

sizione si riscontra a temperature superiori a quella di fusione; solo per alcune, la fase di degradazione può avvenire a temperature inferiori completandosi rapidamente quando portate allo stato di fusione. Le fibre artificiali, sia cellulosiche sia proteiche, si degradano prima del raggiungimento della temperatura di fusione.

- Il *comportamento nei confronti della combustione* dipende dalla tipologia di fibra considerata. Le *fibre animali* bruciano lentamente con caratteristico odore di sostanza cornea bruciata e lasciano un residuo abbondante e carbonioso. Le *fibre vegetali* bruciano velocemente con fiamma viva e con caratteristico odore di carta bruciata. Le *fibre artificiali*, sia di natura cellulosica, sia di natura proteica (è il caso della presente sperimentazione indagata), si comportano come le fibre naturali, a seconda dell'origine. Le *fibre sintetiche* bruciano con fumo denso e acre e con fiamma verdognola; tendono a fondere e sono difficili da estinguere. Le *fibre minerali*, come il caso della lana di vetro, divengono prima incandescenti e poi fondono. Se non opportunamente trattati con sostanze ignifughe, i materiali isolanti fibrosi assumerebbero comportamenti alla combustione differenti a seconda della tipologia di fibra e all'Indice del Limite di Ossigeno - L.O.I., che misura la quantità minima di ossigeno necessaria a una fibra per poter bruciare. Partendo dal presupposto che nell'aria la percentuale di ossigeno è del 20-21%, risulta chiaro che le fibre che hanno un L.O.I. superiore al 21% non bruciano o quantomeno si autospegnono. La lana, per esempio, ha un indice del 25%; le fibre poliesteri, acriliche e poliammidiche, invece, hanno un indice del 20% (queste ultime, inoltre, rilasciano sostanze infiammabili). Viceversa, le fibre con un L.O.I. inferiore al 21% sono da considerare infiammabili (come per esempio il cotone - 18% e le fibre cellulosiche - 18-20%).

- La *feltrabilità* è una proprietà afferente il processo di produzione del materiale isolante (in pannelli rigidi o flessibili) che consiste nella compattazione delle fibre tra loro per effetto combinato del calore e dell'umidità.
- La *coibenza* è la proprietà dei materiali fibrosi a essere più o meno isolanti al calore. Dipende dal loro calore specifico e dalla conduttività termica. È utile ricordare che quest'ultima è data dal rapporto tra la quantità di calore che nell'unità di tempo attraversa l'unità di superficie. La coibenza non dipende solo dalla composizione chimica della fibra ma anche da fattori strutturali e da fattori fisici (igroscopicità, adsorbimento, etc.).
- La *tenacità* è una tra le più importanti proprietà fisiche che deve possedere una fibra. Essa indica il carico necessario per eseguire la rottura di una singola fibra. La tenacità dipende dall'orientamento molecolare e dalla cristallinità della fibra. Aumenta passando dalla lana al cotone fino al lino. Una fibra tenace come il lino, infatti, risulta particolarmente rigida e poco estensibile e perciò difficilmente lavorabile.
- L'*allungamento a rottura* esprime l'allungamento o deformazione percentuale subito dalla fibra prima di raggiungere il punto di rottura. Del campione della fibra considerata, sottoposta ad una sollecitazione di trazione, viene calcolato l'allungamento massimo prima della rottura della fibra stessa. Tale parametro, insieme alla tenacità, incide sulla stabilità dimensionale e sulla morfologia strutturale di un pannello isolante rigido o flessibile.
- La *resilienza* è la capacità che deve avere una fibra di opporsi all'immagazzinamento di energia meccanica e cioè di deformarsi senza subire un cambia-

57. Analisi di laboratorio per valutare le proprietà di elasticità, resilienza e allungamento di un campione di fibra naturale.



mento dimensionale. L'analisi viene eseguita sottoponendo la fibra per un dato periodo ad una pressione costante, dopodiché la resilienza, espressa in valore percentuale, è ricavata come rapporto tra l'altezza finale e l'altezza iniziale della fibra, per cento.

- L'*elasticità* è un'altra importante proprietà meccanica dei materiali fibrosi. Essa esprime la capacità della fibra a lasciarsi deformare in modo reversibile. Secondo la letteratura scientifica, se si sottopone una fibra a trazione con carichi gradualmente crescenti, all'inizio il rapporto tra carico applicato e allungamento prodotto è costante, la fibra si deforma in modo reversibile (deformazione elastica), poi, superato un certo carico, detto *limite di elasticità*, la fibra si snerva, subisce cioè una deformazione irreversibile (deformazione plastica). La curva cambia pendenza in corrispondenza del punto di flesso e la fibra arriva velocemente al punto di rottura. È importante considerare la pendenza iniziale delle curve carico-allungamento: maggiore è la pendenza, minore è l'allungamento della fibra per un carico applicato e perciò la pendenza è inversamente proporzionale alla sua deformabilità; minore è la pendenza, più la fibra risulterà elastica e quindi con un punto di flesso distante dall'origine. Da questa considerazione si possono ricavare altre due grandezze

meccaniche delle fibre: il *recupero elastico* e il *modulo di Young*. Il recupero elastico è l'attitudine di una fibra a riprendere le sue dimensioni originarie dopo essere stata sottoposta a trazione. Il modulo di Young, invece, è la misura dell'elasticità o della rigidità della fibra; dipende, infatti, dalla pendenza della curva carico-allungamento. Maggiore è il modulo di Young, più la fibra risulterà rigida e viceversa. In conclusione, è importante specificare che le proprietà delle fibre naturali, artificiali e sintetiche non sono costanti nel tempo, ma variano in funzione del grado di invecchiamento, della temperatura e dell'umidità. Una fibra usurata, per esempio, è meno tenace di una fibra appena prodotta. Così come una fibra sintetica perde gran parte della tenacità quando si supera la temperatura di transizione vetrosa (le zone amorfe divengono plastiche), si comporta cioè come quando si supera il limite di elasticità o snervamento. Infine, una fibra bagnata risulta meno tenace di quando è asciutta. La lana, per esempio, se è bagnata, perde il 20% della sua tenacità e aumenta notevolmente il suo allungamento percentuale (supera anche l'80% di allungamento). Tale comportamento è dovuto al fatto che l'acqua penetra nella fibra rompendo i legami a ponte di idrogeno intercatena. In questo caso le macromolecole possono scorrere le une sulle altre facilitate anche dalla presenza dell'acqua. Se non si supera il limite di snervamento la fibra, una volta asciugata, riacquista le proprietà iniziali. Da ciò emerge l'importanza di ripetere le prove meccaniche sulla fibra in varie condizioni di temperatura e di umidità (allo stato secco e allo stato bagnato). Le proprietà ottenute saranno indispensabili per la corretta ingegnerizzazione di un materiale isolante prodotto a partire dalle fibre naturali o artificiali, di cui saranno chiare tutte le caratteristiche micromolecolari e macromolecolari, microstrutturali e macrostrutturali²⁴.

58. Deformazione plastica di lino, seta e gomma, in Quaglierini C., "Chimica delle fibre tessili", Zanichelli, Bologna, 2012, pag.15.



Le fibre artificiali di origine vegetale, animale e inorganica

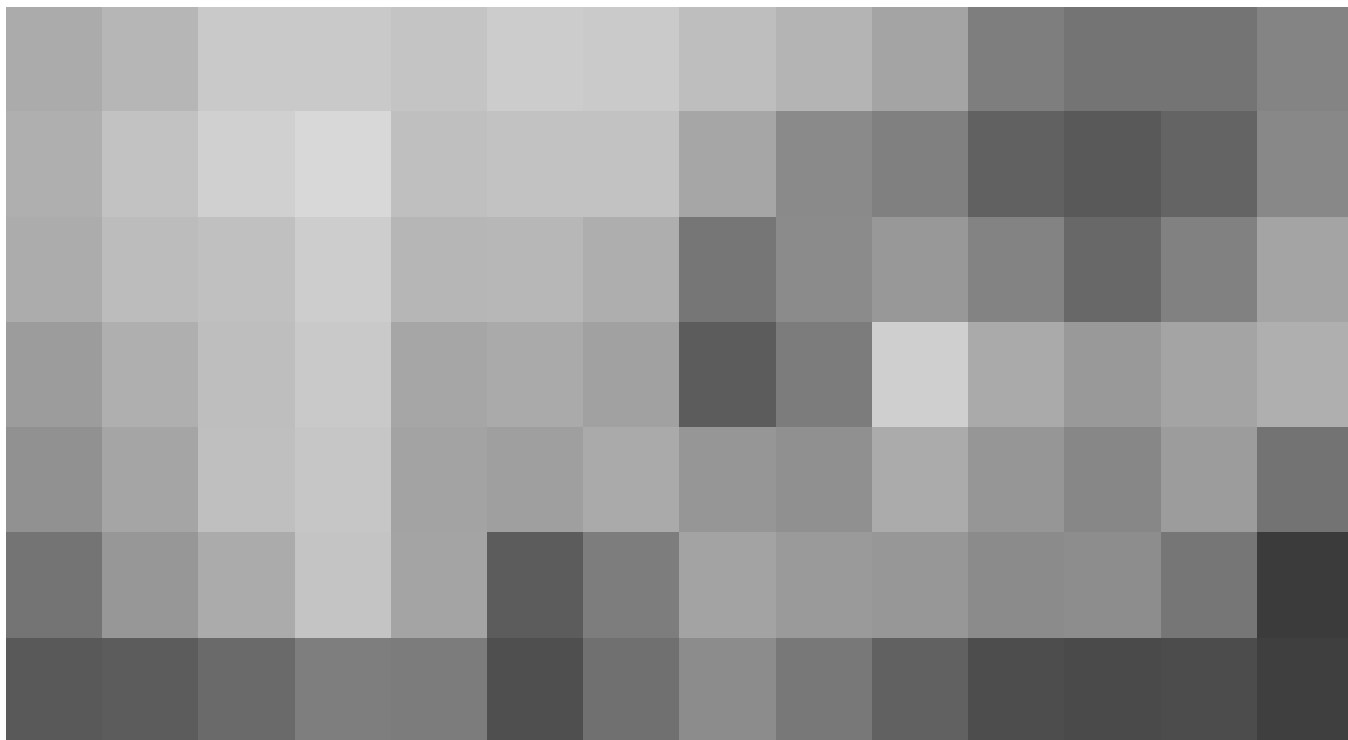
Come già detto, le fibre artificiali sono quelle prodotte partendo da polimeri, cioè lunghe catene lineari formate dalla ripetizione di raggruppamenti atomici, prodotte in natura e con origine vegetale, animale e minerale. L'aspetto artificiale è legato essenzialmente al processo chimico necessario per trasformare il materiale polimerico di origine naturale (come per esempio la cellulosa, la caseina, etc.) in molecole lineari, tali da ricavarne la fibra. Essa, infatti, viene trasformata per azione di reattivi chimici in una sostanza solubile in uno specifico solvente. Dopo la solubilizzazione si ottiene una massa fluida piuttosto densa, che può essere trasformata in filo per mezzo di apposite filiere (nel caso dell'industria tessile) o prodotta in fibra grezza (impiegata per esempio nell'industria delle costruzioni per l'isolamento termico dell'involucro edilizio). A seguito della solubilizzazione, il filamento (o la fibra), per allontanamento del solvente in corrente d'aria, o per rea-

zione con un apposito reattivo che funziona da coagulante, si trasforma in una fibra solida e tenace (e filabile, nel caso della manifatturiera tessile). Le fibre artificiali si dividono, a seconda dell'origine della materia prima, in vegetali, animali e minerali:

- *fibre di origine vegetale*: si distinguono in *cellulosiche*, *proteiche* e *alginiche*. Le *fibre cellulosiche* sono quelle ricavate dalla cellulosa e dai *linters di cotone* e si possono dividere, dal punto di vista chimico, in due classi: quelle costituite da cellulosa pura rigenerata e quelle formate da esteri cellulosici. Le *fibre proteiche vegetali*, invece, sono ottenute dalle proteine ricavate dai semi di arachide, di mais e di soia. Le *fibre alginiche*, infine, sono ricavate dall'acido alginico delle alghe marine.
- *fibre di origine animale*: sono quelle ricavate da proteine di origine animale, come la caseina del latte.
- *fibre di origine inorganica*: quali fibre di vetro, fibre metalliche, le fibre di carbonio.

59. Essiccatoi a matasse e filiere in bagno coagulante dello stabilimento industriale SNIA a Torviscosa. © Archivio storico digitale del Comune di Torviscosa.





60

60. Immagine storica della fabbrica della SNIA Viscosa a Torviscosa per la produzione della seta artificiale «Rayon». Gioiello dell'architettura del littorio, è realizzata con stilemi 'modernissimi' e avanguardie costruttive tipicamente italiana. © Archivio privato SNIA Viscosa.

Le fibre artificiali di origine vegetale sono costituite da cellulosa, pura o esterificata, rigenerata con processi chimici così da renderla morfologicamente simile alla fibra di cotone. Rispetto alle fibre naturali cellulose, hanno maggior purezza e regolarità del filamento, basso costo, maggiore resistenza chimica e fisica. Rispetto al cotone, però, hanno una minore resistenza meccanica, specialmente a umido, maggiore deformabilità e minore resistenza all'usura.

Le fibre artificiali di origine vegetale cellulose, prodotte per la prima volta verso la fine del secolo scorso vennero conosciute con la denominazione di *seta artificiale* per la sua lucentezza. Successivamente, per opposizione dei setaioli, la denominazione fu proibita e sostituita con *Raion* (dal francese «*rayon*», «raggio»), denotando la medesima caratteristica peculiare di brillantezza e lucentezza. I primi tentativi di realizzare la seta artificiale derivano dalla sperimentazione d'avanguardia dell'industria italiana di primo Novecento, in particolar modo di una virtuosa ditta: la «*Società di Navigazione Italo Americana - SNIA*» che a seguito dell'assorbimento nel 1920 della «*Società Viscosa*» di Pavia, della

«*Italiana Fabbriche Viscosa*» di Venaria e della «*Italiana Seta Artificiale*» di Cesano Maderno, cambierà il nome in «*Società Nazionale Industriale Applicazioni Viscosa - SNIA Viscosa*», divenendo una delle più importanti aziende italiane, e tra le prime a essere quotata in borsa nel 1922 e a raggiungere un capitale sociale pari ad un miliardo di lire. Con l'inasprirsi dei rapporti economici tra l'Italia fascista e la Società delle Nazioni per l'invasione dell'Etiopia, si sviluppò il problema dell'approvvigionamento della cellulosa, di cui l'Italia era tributaria dall'estero. Da qui il tentativo di utilizzare la *canna gentile* (*Arundo donax*), capace di consentire una produzione di Raion molto più elevato di quella proveniente dalle essenze vegetali già da tempo impiegate. Il brillante ingegno dell'industria italiana, coadiuvata alla costante ricerca e sperimentazione di prodotti complementari a quelli in uso nel mercato mondiale, ha portato l'Italia a raggiungere un posto di riguardo nella produzione mondiale della filiera tessile, propagandata con fierezza e remissività da pubblicità, cataloghi, mostre del periodo (figg.61-62). Altre fibre artificiali di origine vegetale sono il *cupro*, il *nitro*, la *viscosa*, l'*acetato*, etc.



61. Pubblicità firmata Cancelli dei tessuti Raion, Fiocco, Italviscosa prodotti dalla SNIA Viscosa. Quarta di copertina del Catalogo ufficiale della Fiera Campionaria di Milano del 1940, Aprile 1940. © Archivio storico Fondazione Fiera Milano.



62. Pubblicità dei tessuti dell'impero Sniafiocco e Lanital prodotti dalla SNIA Viscosa. Quarta di copertina del Catalogo ufficiale della Fiera Campionaria di Milano del 1940, Aprile 1937. © Archivio storico Fondazione Fiera Milano.

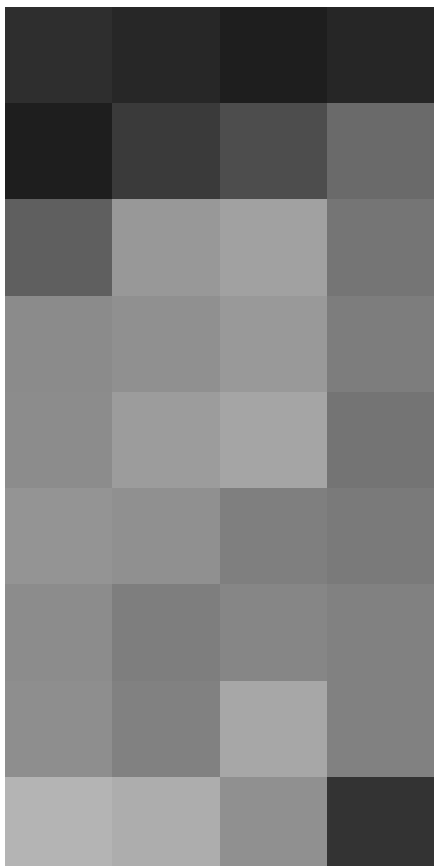
Il *Cupro*, sintetizzato nel 1892 da Fremery e Urban, è una fibra artificiale prodotta sfruttando la solubilità della cellulosa nella *soluzione ammoniacale di Schweitzer*. Come materie prime si impiegarono i *linters* e i cascami di cotone, altre volte la cellulosa ricavata dal legno, tutte disciolte in soluzione ammoniacale di CuSO_4 in NaOH . La solubilità della cellulosa nel liquido di Schweitzer è dovuta alla formazione di un complesso tra il rame ammoniacale e due molecole di celluloso. Nel processo di solubilizzazione si mantiene la miscela a bassa temperatura (minore di 5°C) e in continua agitazione per alcune ore fino a che la cellulosa non si è completamente solubilizzata. Nella miscela sono aggiunte sostanze facilmente ossidabili, affinché l'aria presente non agisca sulla cellulosa riducendone il grado di polimerizzazione, portando la massa ad avere una bassa viscosità. La fibra, una volta estrusa in filiere, è coagulata in un bagno acido di solforico diluito con glicerina o acqua, scindendo il complesso rame-celluloso (il rame viene recuperato dalla soluzione, mentre l'ammoniaca è

neutralizzata dall'acido solforico²⁵.

La *Viscosa* è un'altra fibra artificiale di origine vegetale che ha avuto il maggior sviluppo nella manifatturiera tessile sia per il basso costo delle materie prime e dei reagenti utilizzati per la produzione, sia per l'elevata versatilità della fibra ottenuta. La materia prima per la produzione della viscosa è, infatti l' *α -cellulosa*, chiamata anche *cellulosa nobile*, ricavata dai *linters* di cotone, importati dall'America. Con le Sanzioni Economiche all'Italia fascista e non potendo importare i *linters*, nacque l'esigenza di trovare delle materie prime alternative per ottenere cellulosa di buona qualità. Una fonte è il legno di conifere a lento accrescimento, che forniscono una cellulosa a fibra lunga e morbida. In prima linea, emblematico e avanguardistico fu il caso della già citata SNIA Viscosa, foriera di novità assolute nella sperimentazione di prodotti fibrosi derivanti da materie prime surrogate. Bene si presta il legno di pioppo e quello del faggio, da cui si ricava un'ottima cellulosa candida, senza impurità. Purtroppo queste piante

63. Pubblicità dei tessuti per l'autarchia prodotti dalla SNIA Viscosa. Quarta di copertina del Catalogo ufficiale della Fiera Campionaria di Milano del 1940, Aprile 1938. © Archivio storico Fondazione Fiera Milano.

64. Costruzione dello stabilimento della SNIA Viscosa a Torviscosa, con la Torre Littoria e le paludi sullo sfondo, 1938. @ Archivio Vincenzo Aragozzini per lo Stabilimento Fototecnico Crimella



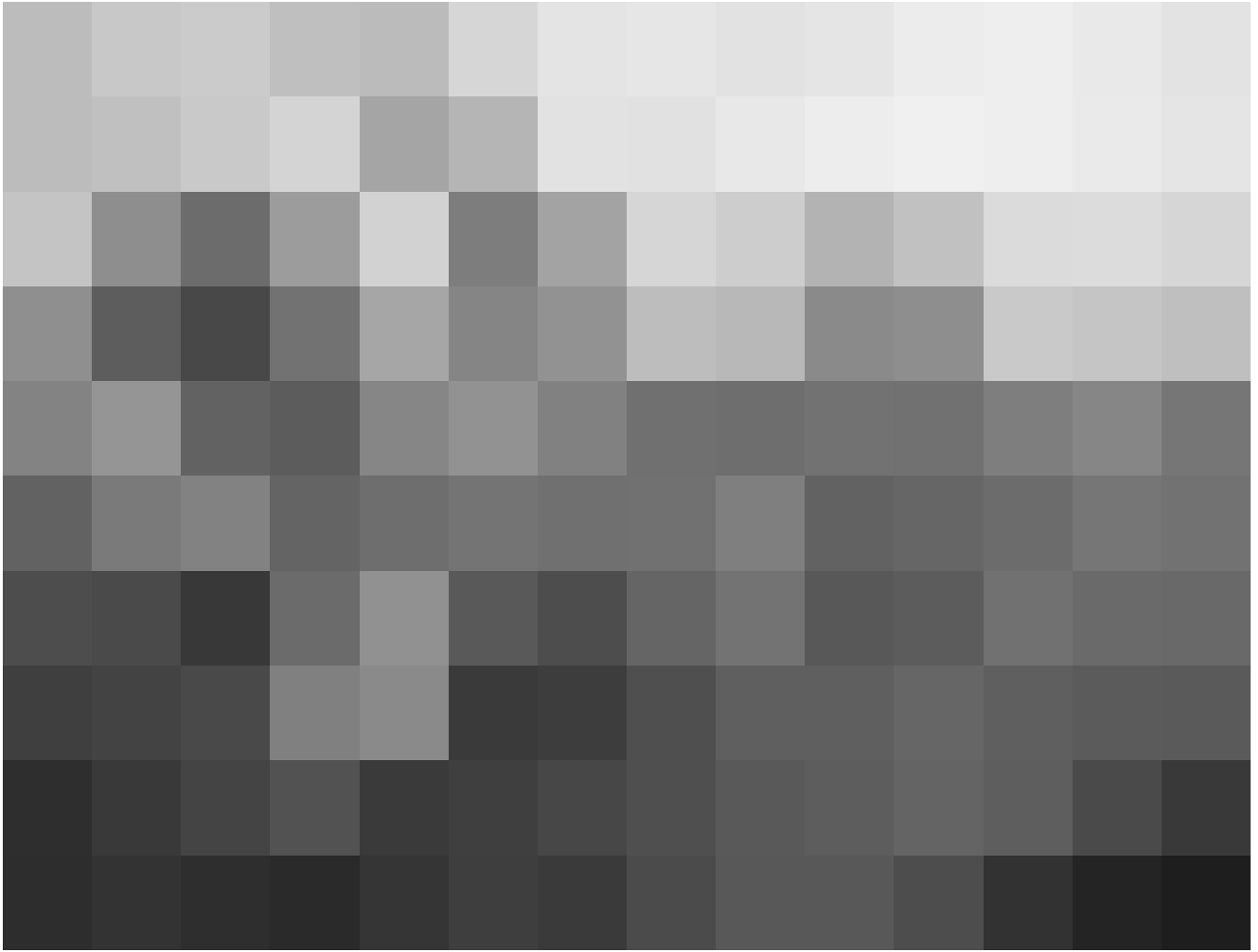
65. Il taglio della canna gentile a Torviscosa, 1940-45, fotografia di Vincenzo Aragozzini per lo Stabilimento Fototecnico Crimella, attivo dal 1934. @ ERPAC - Ente Regionale Patrimonio Culturale della Regione Friuli Venezia Giulia.
66. Nella pagina seguente: stabilimento per l'estrazione della cellulosa a Torviscosa della società SNIA Viscosa con vista del bacino del porto, in "Vedere. Le fibre tessili artificiali", periodico unico supplementare della rivista "Sapere", fascicolo n.153, Milano, Maggio 1941, Hoepli, Milano, 1941, pagg.156-157.
67. Nella pagina seguente: vista della Torre Littoria, in "Vedere. Le fibre tessili artificiali", periodico unico supplementare della rivista "Sapere", fascicolo n.153, Milano, Maggio 1941, Hoepli, Milano, 1941, pag.13.
68. Nella pagina seguente: piano regolatore della città di fondazione di Torviscosa, in "Vedere. Le fibre tessili artificiali", periodico unico supplementare della rivista "Sapere", fascicolo n.153, Milano, Maggio 1941, Hoepli, Milano, 1941, pag.155.
69. Interno della fabbrica della SNIA Viscosa.

sono diffuse in particolar modo nei paesi del Nord Europa e nell'area balcanica. Non potendo trovare quelle essenze in Italia, la SNIA Viscosa fece eseguire ricerche e sperimentazioni trovando così il modo di ottenere la cellulosa attraverso la *canna gentile* o *arundo donax* (fig.65). La canna, infatti, ha un ciclo vegetativo molto breve; si raccoglie in autunno e dopo macerazione è avviata ai processi di estrazione della cellulosa. Tale sperimentazione avrebbe segnato il futuro e il destino di quella che sarebbe stata chiamata Torviscosa, città di fondazione, scelta per la presenza di vaste zone paludose, ridotta densità di popolazione e collegamento alla importante arteria stradale e ferroviaria Venezia-Trieste (fig.64). In meno di un anno venne portata a termine l'opera di bonifica, la trasformazione fondiaria, la realizzazione di scuole, teatri e servizi e la costruzione dell'imponente fabbrica di Torviscosa, rimasta attiva fino agli anni Ottanta, con la produzione di innumerevoli fibre, quali il *Lilion*, il *caprolattame* e altri prodotti cellulosici che hanno assunto risonanza mondiale nei dettami del mercato tessile.

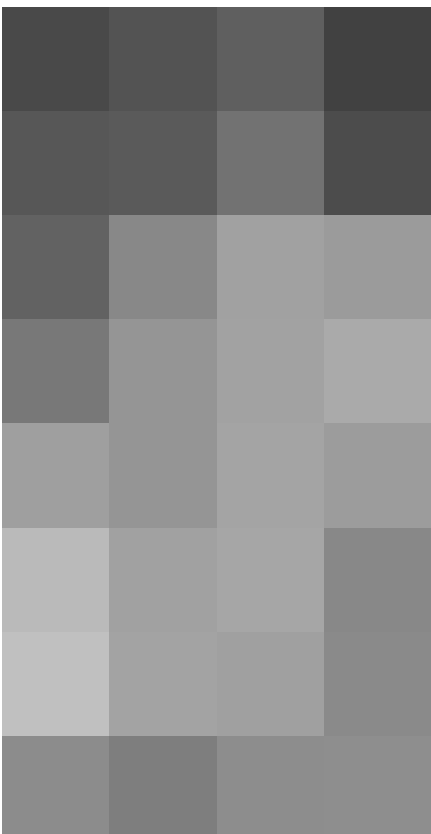
Derivate dalla Viscosa sono le *fibre polinosiche*, prodotte per la prima volta in Giappone negli anni Sessanta e con caratteristiche prestazionali migliori della viscosa; il *cellofan*, viscosa utilizzata per la preparazione di fogli trasparenti impiegati per imballaggi e per la conservazione degli alimenti e, infine, la *viscosa opacizzata* e l'*acetato di cellulosa*, unica fibra vegetale composta da esteri della cellulosa.

Per concludere, le *fibre alginiche*, sono ottenute dall'acido alginico, estratto da alcune alghe marine, in particolare dalla specie *Laminaria*. Una volta essiccate, le alghe vengono mescolate con carbonato di sodio che ha lo scopo di neutralizzare l'acido alginico formando l'alginato di sodio, solubile in soluzione acquosa e formante una massa viscosa che può essere filata.

Le *fibre artificiali di origine animale* saranno analizzate nel successivo paragrafo in quanto costituiscono il focus della presente ricerca e della sperimentazione per la produzione di una fibra a base di caseina.



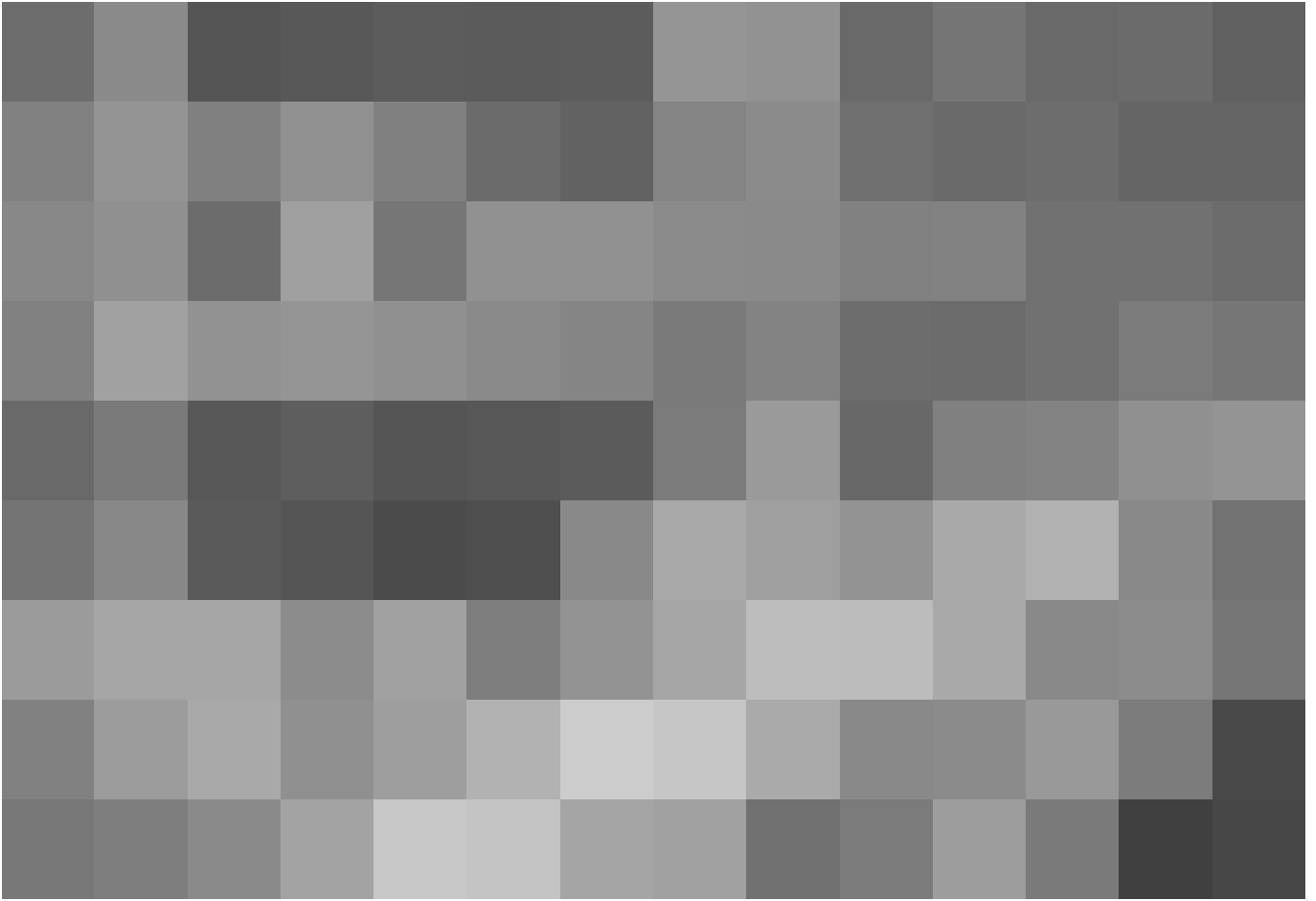
66



67



68

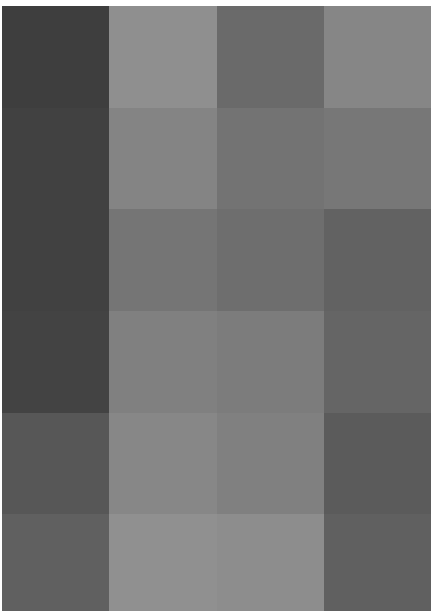


Le fibre artificiali di origine proteica animale

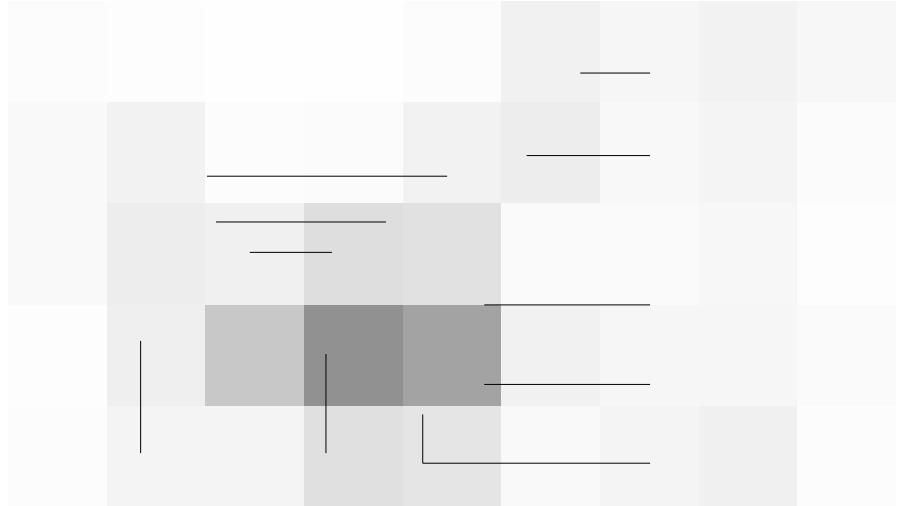
Le fibre artificiali di origine animale sono prodotte industrialmente partendo da proteine animali derivate prevalentemente dal vello e dal crine di alcuni mammiferi, dalla bava secreta da alcuni insetti e dalle proteine (o dai polisaccaridi) dell'esoscheletro di alcuni crostacei. Rispetto alle altre fibre costituite da macromolecole orientate e quindi di forma fibrillare, le fibre proteiche hanno una struttura globulare.

Lana

Dal vello di ovini, leporidi, camelidi e bovini si ricava una fibra a costituzione proteica, la *lana*, che si ottiene mediante l'operazione di *tosa*. Essa costituisce il 90% della produzione mondiale di fibre naturali di origine animali. Le fibre di lana presentano tre parti distinte: la punta, lo stelo della fibra e la radice. Lo stelo, osservato al microscopio si presenta come un tubulo cilindrico ricoperto da grosse squame embricate, chiamata *cuticola* (fig.70). Le squame sono unite le une dalle altre da fibrille intercellulari ricoperte da uno strato impermeabile detto *epicuticola*, che protegge la fibra dagli agenti esterni. All'interno è presente il *cortice* o *cortex*, formato da milioni di cellule fusiformi e costituisce il 90% in peso della fibra. Esso è un filamento corneo costitu-



70



71

ito, per la maggior parte, da *cheratina*, derivata dalla trasformazione cornea delle cellule dell'epidermide. Le cellule del cortice, pure avendo una composizione chimica simile, assumono posizioni e morfologie differenti (*ortocortice* e *paracortice*), fattori che incidono sulle proprietà chimiche e fisiche della fibra (fig.71). Questa struttura bilaterale, infatti, spiega la caratteristica arriccatura della lana in strette spirali che conferisce una notevole elasticità, sofficià e morbidezza, nonché elevate proprietà di termoregolazione. La cheratina è una proteina contenente carbonio (50%), idrogeno (7%), ossigeno (22%), azoto (17%) e zolfo (4%), elementi che legati tra loro formano le unità strutturali di base chiamate *amminoacidi*. La presenza di zolfo negli amminoacidi della cheratina è il fattore che incide sul comportamento al fuoco della fibra e del caratteristico odore di corno bruciato che si libera durante la combustione. La lana animale è impiegata anche per isolare termicamente gli edifici grazie alle notevoli caratteristiche prestazionali e ambientali. Essa è caratterizzata da una elevata coibenza termica dovuta alla presenza di aria immagazzinata all'interno della struttura arriccata, alta igroscopicità (assorbe fino al 30% di umidità senza sembrare bagnata), notevole elasticità (è la fibra con elasticità più elevata), e' facilmente lavabile, leggera, non infiammabile. La presenza del canale midollare, però, la rende biodegradabile.

70. Immagine al microscopio di una fibra di lana con la presenza delle scaglie che avvolgono tutto il diametro della cuticola.

71. Struttura macromolecolare della fibra di lana.

Seta

La seta, come già detto nella disamina sperimentale dell'architetto Neri Oxman e del suo gruppo dell'MIT di Boston, è costituita dalla bava solidificata che la larva di un lepidottero produce prima di iniziare la sua metamorfosi a *crisalide*. Più comunemente, la larva è conosciuta come *baco da seta* o *filugello* (dal latino «*follicellus*», «sacchetto», alludendo alla sua abitudine di produrre bozzoli), è originario dell'Asia Centrale, ma può essere allevato alle medie latitudini di tutti i continenti dove può crescere la pianta del gelso, di cui la larva si nutre.

La fibra di seta grezza, al microscopio, si presenta - dal punto di vista morfologico - come un cilindro leggermente appiattito, formato da due *fibrille*, cioè da due *bavelle* di *fibroina* (proteina che costituisce la secrezione, presente al 70-80%), unite insieme dalla *sericina* (liquido gommoso prodotto dalle ghiandole serigene, presente al 20-30%), che forma una guaina trasparente o leggermente colorata di giallo. Le due bavelle si presentano al microscopio senza striature, sottili, lisce e di diametro variabile, con una sezione trasversale irregolare (fig.72).

La fibroina è una *scleroproteina* molto ricca di azoto (circa il 20%), che a differenza della cheratina, contiene una quantità di zolfo nettamente inferiore (0,3%). Essa è composta da diciotto amminoacidi, tra i quali in percentuale maggiore sono la *glicina* (36%), l'*alanina* (22%), la *tirosina* (10%). Tali amminoacidi conferiscono alla seta il *carattere anfotero*, cioè la proprietà di reagire sia con le sostanze basiche, sia con le acide. Strutturalmente la fibroina è formata da lunghe catene polipeptidiche di amminoacidi (prevalentemente da glicina e alanina), disposte parallelamente all'asse della fibra. Le catene risultano legate tra loro da forze relativamente deboli, tipo legami a idrogeno e da qualche legame salino; non esistono, come nella lana, *legami trasversali cistinici* di natura covalente, e l'assenza di questi legami, fa sì che la seta abbia meno ripresa elastica della lana²⁶. Così mentre la fibroina ha una struttura quasi distesa, con leggeri zig-zag, la cheratina (come detto, è la proteina presente nella lana naturale) è strutturata a elica. Perciò la fibroina è poco allungabile ed elastica, mentre la cheratina è notevolmente elastica. Il progresso della tecnologia in campo biologico ha riaperto l'interesse per questo antico materiale potenzialmente utilizzabile in moltissimi settori. La seta è attualmente utilizzata nel campo tessile e nel campo medico come materiale da sutura, ma sono sempre maggiori i settori di impiego del materiale e degli scarti prodotti. Recentemente, infatti, sono state prodotte pellicole solide ultrasottili a idrogel nelle quali sono state incluse molecole farmacologiche o bioattive per il rilascio controllato di farmaci verso organi bersaglio e, ancora, dispositivi impiantabili ma degradabili per settori come l'elettronica e la produzione di biosensori, basata sulla trasmissione di informazioni elettroniche attraverso fibre di seta. Tale sistema potrebbe essere una valida alternativa a basso impatto ambientale della plastica e del silicio, permettendo, nel settore edile, di realizzare una nuova generazione di fotovoltaico.

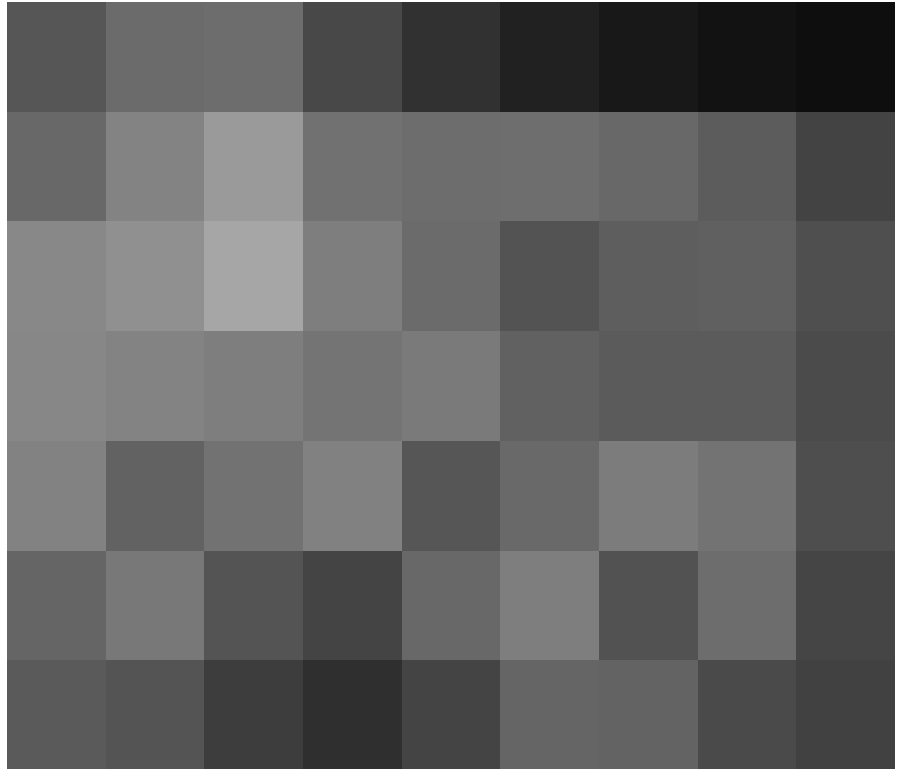
72. Immagine al microscopio di una fibra di seta.



Altre fibre proteiche

Sono vari i procedimenti ideati sino ai giorni nostri per la produzione di fibre artificiali per sintesi o per trattamenti speciali delle proteine, fino al passaggio in filiera. Già nel 1894 era stata segnalata la possibilità di realizzare delle fibre artificiali partendo da proteine estratte dalla *gelatina*, composta essenzialmente di *collagene*, componente primaria di pelle, ossa e tendini rinvenuti da prodotti di scarto da macello. Il processo di trasformazione delle fibre di collagene in fibra imputrescibile avviene secondo un normale processo di concia delle pelli. Dopo la concia, il *carniccio* (scarto da macello) viene regolato ad un appropriato valore *pH*, allo scopo di permettere alla fibra di mantenersi inalterata, quindi fatta essiccare. Si ottiene così una massa spugnosa nella quale decorrono lunghe e sottilissime fibre formanti un tessuto facilmente cardabile (la *cardatura* è una operazione preliminare al processo di filatura e consiste nel districare le fibre, renderle parallele per poter eliminare le impurità presenti). Da tale operazione ne deriva una massa filamentosa molto soffice e di vario colore, a seconda della materia conciante impiegata. Inoltre, per una buona riuscita del processo, è indispensabile che la fibra abbia un'alta temperatura di gelatinizzazione, affinché sia in grado nelle successive lavorazioni (processo di concia con sali metallici, trattamento in bagni acquosi caldi, tinteggiatura, etc.) di resistere a vari gradi di temperatura senza subire danneggiamenti²⁷. L'invenzione non ebbe fortuna per la fragilità e della bassa resistenza dei prodotti e solo nel 1935 venne messo a punto un procedimento di fabbricazione di fibre artificiali, questa volta prodotte a partire dalla caseina, che ha portato alla fabbricazione del *Lanital*, il quale può considerarsi il capostipite di una serie di fibre simili.

La produzione e lo sviluppo del *Lanital*, sarà approfondito nei prossimi paragrafi in quanto, la sua analisi, rappresenta la fase conoscitiva per la sperimentazione di una nuova fi-



73

bra biopolimerica a base di caseina da applicarsi per l'isolamento termico del sistema edificio-impianto. La produzione del *Lanital* rappresenta il processo primordiale per la preparazione delle fibre artificiali a partire dalle materie prime fornite direttamente dal mondo vegetale e dal mondo animale. Il *Lanital*, infatti, ha dato un nuovo impulso alle ricerche e allo sviluppo delle fibre proteiche, che erano pressoché abbandonate dopo alcuni infruttuosi tentativi. Al *Lanital* ha fatto seguito un discreto numero di fibre simili ricavate dalla caseina e denominate con nomi diversi: *Aralac* (fig.73), *Lactofil*, *Fibrolan*, *Tiolan*, *Silkool*, *Cargau*, etc. Altre fibre proteiche sono quelle ottenute dall'*albumina*, estratta dalla carne di pesce, dalle proteine isolate dai semi di soia, dalla *arachina*, globulina isolata dalle arachidi, dalla farina di semi di cotone; dalla *zeina* di mais, dalla *cistina*, amminoacido della lana, dalla *cheratina* delle piume. Tali fibre sono prodotte sotto forma di fiocco e impiegata in mischia con altre fibre, specialmente con la lana.

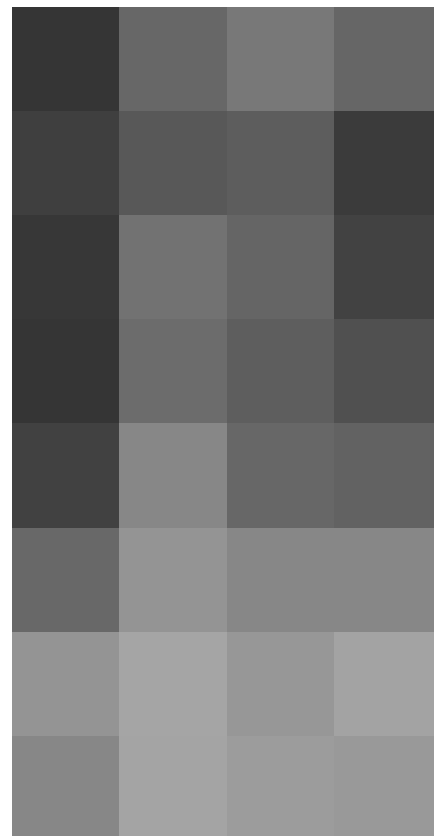
Nonostante si trattassero tutte di produzioni ecosostenibili di materiali fibrosi, tali tipologie sono sta-

73. Nastri continui di Aralac, fibra a base di caseina, riavvolti nel bagno acido di filiera, prodotta negli anni Quaranta dalla Aralac Inc., divisione della "National Dairy Products Corporation", in "Life", 4 Dicembre 1944. .

te accantonate in favore delle fibre sintetiche, che hanno iniziato la loro scalata verso il successo subito dopo la Seconda Guerra Mondiale. Nel corso degli ultimi anni, tuttavia, è notevolmente aumentata la richiesta di prodotti *environmentally friendly*, creati grazie a fonti rinnovabili e processi ecologici. Sono numerose le sperimentazioni che vertono verso questa nuova filosofia sperimentale: per esempio, le fibre ottenute dal collagene sono nuovamente oggetto di ricerca. Il ricercatore Philipp Stössel, in collaborazione con l'*Advanced Fibers Laboratory di Empa St. Gallen*, ha sviluppato un nuovo metodo che permette di ottenere un filamento derivato dal collagene aggiungendo, rispetto al procedimento storico, un solvente organico (*isopropile*) a una soluzione di gelatina riscaldata affinché le proteine precipitino sul fondo. Rimuovendole con una pipetta è possibile ricavarne un filo elastico, filato su due rotoli di teflon e mantenuti costantemente umidi in un bagno di etanolo per evitare che i filamenti si incollassero tra loro. Tale procedimento ha creato le basi per l'ideazione di una nuova fibra dall'altissimo potere isolante (grazie alla struttura interna porosa della fibra) (fig.74), elastica (proprietà garantite mediante il processo di impregnazione con *lanolina*, una cera della lana) e durabile nel tempo, ma che risulta sensibile all'acqua.

74. Immagine al microscopio di una fibra di gelatina-collagene che presenta nel nucleo una massa porosa che la rende altamente isolante. @ Philipp Stössel - ETH Zürich).

75. Fibre tecniche di albume d'uovo rigenerate e stirate, in Lundgren H.P., O'Connell R.A., "*Industrial and Engineering Chemistry*", 1944, pag.373.



75

Nel 1898, Millar impiegò l'albume dell'uovo per produrre una fibra molto simile alle fibre proteiche naturali mediante l'aggiunta di cloruro di alluminio per migliorare la viscosità della filatura e la resistenza della fibra risultante²⁸. La fibra, però, non è mai stata commercializzata, ma è stata oggetto di numerose sperimentazioni. All'esame microscopico le fibre di albume si presentano come filamenti lisci e con alcune macchie più scure (fig.75). Una nuova generazione di fibre, cosiddette 'bioniche' sono, invece, quelle composte da amminoacidi peptidici di collagene di scaglie di pesce riciclate e fibra di viscosa, totalmente biodegradabili

Tali risultati, dunque, permettono di creare delle fibre biopolimeriche a matrice organico-proteica, partendo da prodotti di scarto (caseina, carne da macello, gusci di crostacei, piume, scaglie di pesce, etc.) da cui mediante processi di trasformazione chimica, è possibile ottenere fibre altamente ecologiche ed ecosostenibili, ponendosi come valide sostitute delle fibre sintetiche.



74

La caseina per la produzione di materiali a matrice fibrosa

Il latte è un esempio di emulsione di grasso in acqua. Il grasso del latte è presente come piccoli globuli dispersi nel siero del latte (fig.76). I loro diametri variano da 0,1 a 20 μm (1 μm = 0,001mm). La dimensione media è di 3-4 μm e ci sono circa 10¹⁰ globuli per ml. L'emulsione è stabilizzata da una sottilissima membrana spessa solo 10-20nm (1nm = 10⁻⁹m) che circonda i globuli e ha una composizione complicata. La membrana è composta da fosfolipidi, lipoproteine, cerebrosidi, proteine, acidi nucleici, enzimi, oligoelementi (metalli) e acqua legata. Va notato che la composizione e lo spessore della membrana non sono costanti, poiché i componenti vengono costantemente scambiati con il siero del latte circostante.

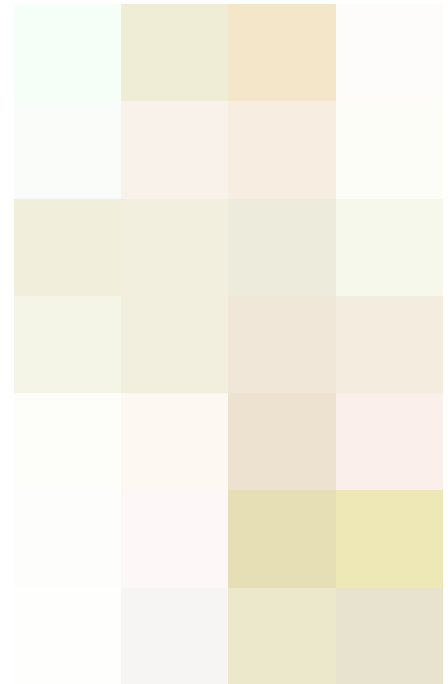
Il grasso del latte è costituito da trigliceridi (i componenti dominanti), di monogliceridi, acidi grassi, steroli, carotenoidi (che danno il colore giallo al grasso) e vitamine (A, D, E e K) (fig.77).

Poiché i globuli di grasso non sono solo le particelle più grandi nel latte ma anche le più leggere (densità a 15,5°C = 0,93g/cm³), tendono a risalire in superficie quando il latte viene lasciato riposare per un po' in un recipiente (fig.78).

I globuli di grasso possono facilmente cambiare la loro forma se esposti a un trattamento meccanico.

Tutti i grassi appartengono a un gruppo di sostanze chimiche chiamate *esteri*, che sono composti di *alcoli* e *acidi*. Il grasso del latte è una miscela di diversi esteri di acidi grassi chiamati *trigliceridi*, che sono composti da un alcol chiamato *glicerolo* e vari acidi grassi. I *gliceridi* costituiscono quasi il 99% del grasso del latte.

Oltre ai lipidi (o grassi), nel latte sono presenti le proteine, che ricordiamo essere grandi molecole costituite da unità più piccole chiamate aminoacidi (fig.79). Una molecola proteica è costituita da una o più catene interconnesse di aminoacidi disposti in un ordine specifico. Una molecola proteica di solito contiene circa cento-duecento aminoacidi collegati tra loro. Il tipo e l'ordine degli aminoacidi nella molecola proteica determinano la natura della proteina, che può contenere un numero possibile di combinazioni di venti aminoacidi in una catena. Gli aminoacidi contengono un gruppo amminico leggermente basico (-NH₂) e un gruppo carbossilico leggermente acido (-COOH), collegati tra loro da una catena laterale che potrà essere *polare* (da cui dipenderanno le proprietà di attrazione dell'acqua e delle proprietà di idrofilia dei gruppi basico e acido) o sotto forma di *idrocarburo* (che non conterrà radicali idrofili e quindi respingerà l'acqua (idrofobia), rendendo l'amminoacido meno solubile o compatibile con l'acqua). Alcune proteine del latte mostrano differenze per quanto riguarda la compatibilità con l'acqua che dipenderà dallo *stato elettrico delle proteine*.



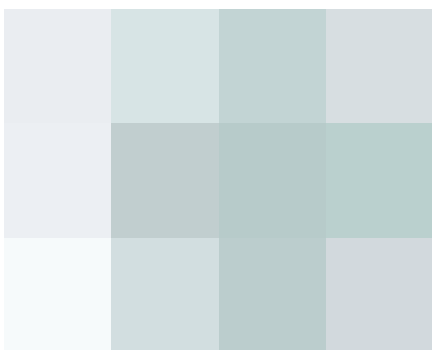
79

76. Il latte come emulsione di globuli di grasso dispersi nel siero di latte.

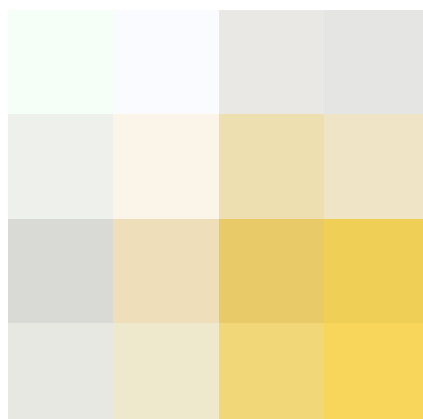
77. Elementi costituenti la molecola di grasso presenti nel latte.

78. Risalita in superficie delle particelle leggere di grasso.

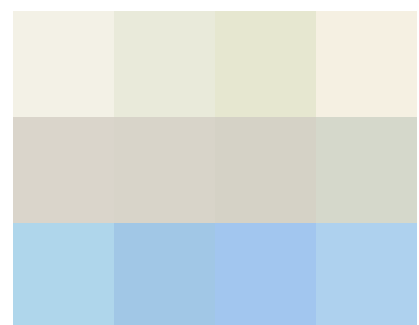
79. Struttura micromolecolare delle proteine.



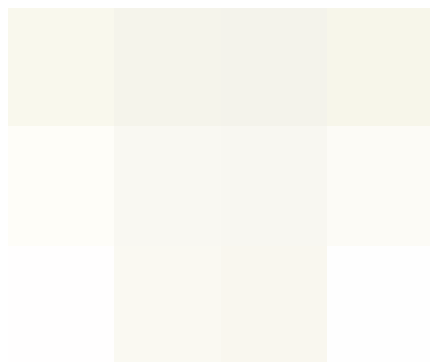
76



77



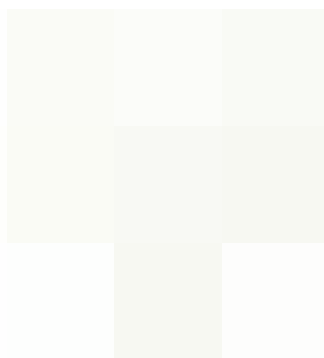
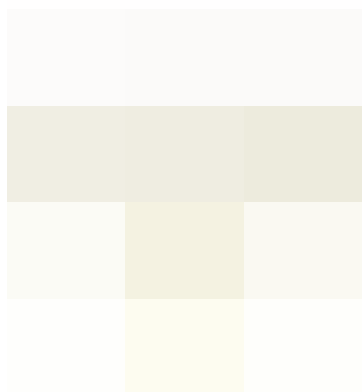
78



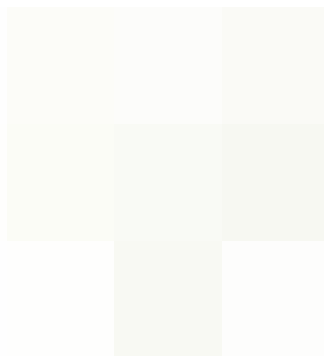
80

Le catene laterali di alcuni amminoacidi nelle proteine del latte vengono caricate e determinano il pH del latte. Quando il valore del pH del latte viene modificato mediante l'aggiunta di un acido o di una base, viene modificata la distribuzione delle proteine (figg.80-83). A pH normale del latte (pH=6,6), una molecola proteica ha una carica netta negativa (fig.80). Se vengono aggiunti ioni idrogeno, essi vengono adsorbiti dalle molecole proteiche. Ad un valore di pH in cui la carica positiva della proteina è uguale alla carica negativa, la carica totale della proteina è zero. In tal caso le molecole proteiche non si respingono più a vicenda, ma le cariche positive si legheranno a cariche negative delle molecole vicine, formando grandi ammassi proteici. La proteina, a questo punto, viene precipitata dalla soluzione per un pH pari a 4,6, che rappresenta il *punto isoelettrico* della proteina (fig.81). In presenza di un eccesso di ioni idrogeno, le molecole acquisiscono una carica netta positiva (fig.82) per poi assumere nuovamente una carica negativa se viene aggiunta una soluzione alcalina (NaOH), per poi dissolversi (fig.83).

81



82



83

Il latte contiene centinaia di tipi di proteine, la maggior delle quali in quantità molto ridotte. Le principali proteine del latte sono la *caseina*, l'*albumina* e la *globulina*. Nel nostro caso studio, analizzeremo la proteina della caseina, la cui conoscenza è di vitale importanza per la successiva sperimentazione e prototipazione di una nuova fibra a matrice biopolimerica a base di caseina.

La caseina è una proteina presente nel latte dei mammiferi in percentuali variabili: nel latte vaccino e nel latte di pecora è contenuta dal 3% al 4,5%; nel latte umano è contenuta all'1%, in quello di renna all'8%²⁹. La conformazione delle caseine è simile a quella delle proteine denaturate (fenomeno chimico che consiste nella perdita di ordine della struttura proteica e quindi di un aumento di entropia).

La caseina si divide in quattro

gruppi principali, distinte in relazione alla distribuzione delle cariche elettriche (date sia dagli amminoacidi sia dai diversi gradi di fosforilazione e glicosilazione), oltre che dal polimorfismo genetico e dalla sensibilità di precipitazione:

- *α(s1)-caseina*: costituita da due zone altamente idrofobiche separate da una regione polare (idrofilica) contenente sette degli otto gruppi fosfati; può precipitare anche con bassi livelli di calcio. È presente per una concentrazione percentuale del 32%;
- *α(s2)-caseina*: tutti gli amminoacidi sono concentrati alle estremità della proteina, in grado di precipitare anch'essa con basse quantità di calcio. È presente per una concentrazione percentuale dell'8,4%;
- *β-caseina*: possiede l'estremità amino-terminale fortemente polare, mentre il resto è apolare (idrofobico): in questo senso assomiglia ad un detergente. Richiede livelli medi di calcio per precipitare. È presente per una concentrazione percentuale del 26%;
- *κ-caseina*: l'unica delle caseine ad essere idrofila (e per questo richiede un'elevata quantità di calcio per precipitare). Stabilizza le altre caseine; una sua idrolisi rimuove questa abilità e porta alla coagulazione (precipitazione) della caseina. È presente per una concentrazione percentuale del 9,3%.
- *γ-caseina*: prodotta dalla *proteolisi post-secretoria* a carico della β-caseina ad opera della *plasmina*, una *proteasi* del latte. È presente per una concentrazione percentuale del 2,4%.

La percentuale totale di caseina presente è del 78,3%. La restante parte è costituita dalle proteine del siero, la *α-lattoglobulina* (3,7%), la *β-lattoglobulina* (9,8%), la *siero albumina* (1,2%), la *immunoglobulina* (2,4%), *altre proteine* (2,7%).

80. Una molecola proteica a pH 6,6 ha una carica negativa netta.

81. Molecole proteiche a pH 4,6, definito punto isoelettrico.

82. Molecole proteiche a pH 1.

83. Molecole proteiche a pH 14.

Le caseine si auto associano e formano grandi ammassi chiamati *micelle*. Le micelle sono costituite da centinaia e migliaia di singole molecole di proteine della caseina e hanno dimensioni variabili da 50 a 500nm. Poiché le micelle hanno dimensioni colloidali, sono in grado di diffondere la luce il colore bianco del latte

Chimicamente, le micelle sono aggregate tra loro con piccole regioni di fosfato di calcio, conferendo alle micelle una struttura aperta e porosa che è in parte salificata dal calcio, in parte legata alla lisina, un amminoacido presente per l'8% nella caseina (fig.84). La rimozione del fosfato di calcio (mediante acidificazione o aggiunta di etilendiamminotetraacetico - ETDA o citrati o, comunque sia, nel raggiungimento di un valore di pH superiore a 9), porta alla disintegrazione delle micelle.

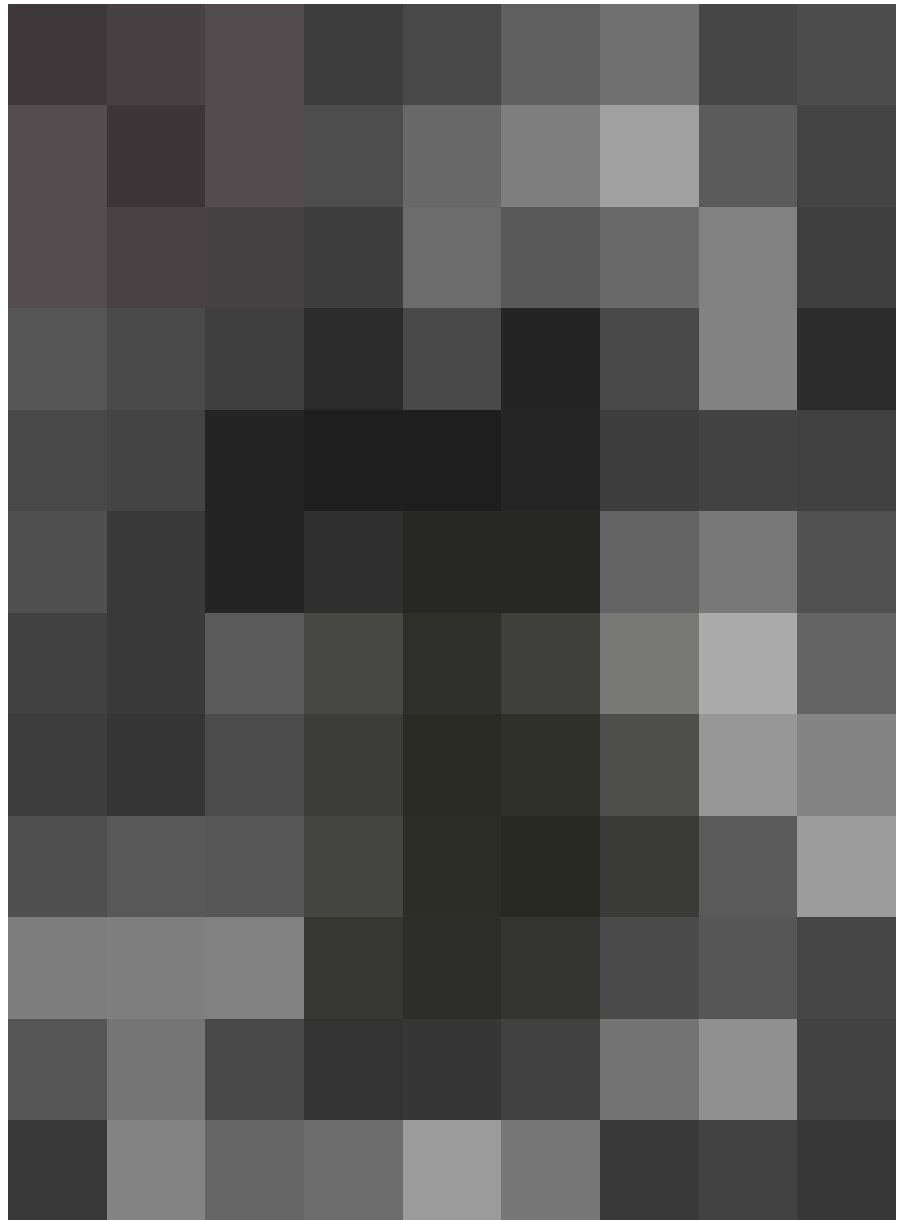
La struttura interna delle micelle di caseina risulta oggi non ancora del tutto compresa. Sono, infatti, proposti tre modelli principali:

- *modello nanocluster*;
- *modello dual binding*;
- *modello sub-micelle*.

Tuttavia è di consenso comune che le particelle sono morfologicamente sferiche, con un diametro medio di circa 150nm. Le caseine $\alpha(s1)$; $\alpha(s2)$ e β sono concentrate principalmente al centro della micella, mentre la κ -caseina predomina sulla superficie per circa 5-10nm di superficie. Tale catena è idrofila e con carica negativa ed è responsabile della stabilità sferica delle micelle. Se, infatti, tale catena viene rimossa mediante l'aggiunta di etanolo o idrolisi indotta, la stabilità colloidale della micella viene modificata con la conseguente precipitazione delle stesse.

Il *modello nanocluster* (fig.85), è descritto come una rete aggraviata di molecole di caseina flessibili che formano una struttura gelatinosa connessa tramite nanocluster di fosfato di calcio³⁰.

Il *modello dual-binding* (o a dop-



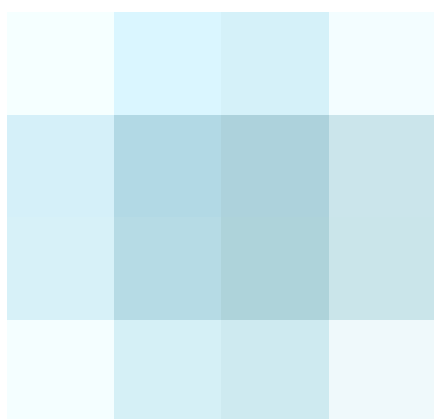
84

pio legame) (fig.86), suggerisce un equilibrio di entrambe le interazioni idrofobiche tra le molecole di caseina e la reticolazione con il fosfato di calcio colloidale trattiene la micella.

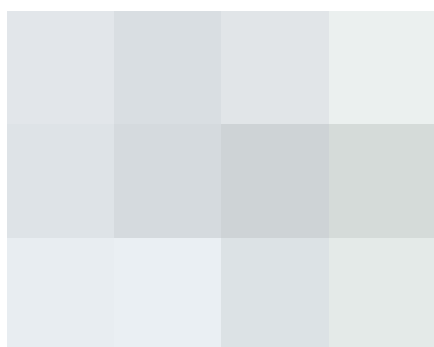
Il *modello sub-micelle* (figg.87-88), infine, suggerisce che la micella di caseina è costituita da micelle più piccole (sub-micelle di circa 10-15nm di diametro), che sono collegato tra loro da gruppi di fosfato di calcio³¹.

L'incertezza della struttura della micella è dettata dalla continua mutazione a cui essa è sensibilmente soggetta. Infatti, una micella di caseina e il relativo ambiente continuano a scambiarsi componenti al variare di temperatura, pH e pressione.

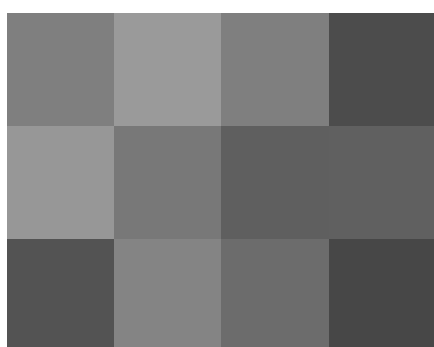
84. Immagine al microscopio delle proteine del latte.



85



86



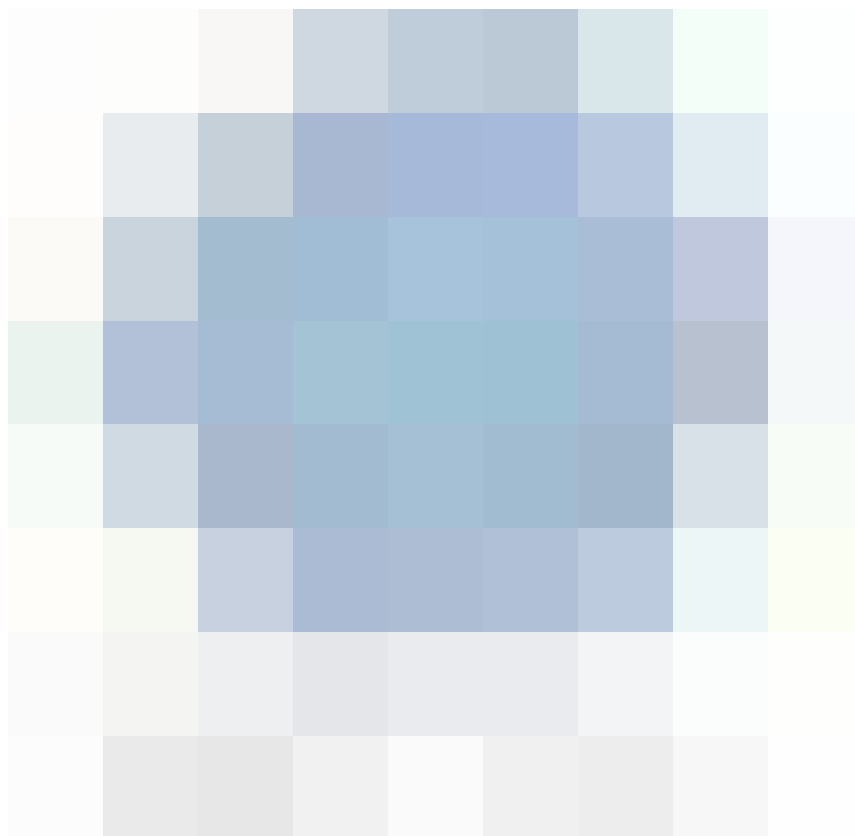
87

La caseina, dal punto di vista macromolecolare, è una proteina ad alto peso molecolare, variabile da 13.000 a 19.000 e, a differenza della cheratina, contiene pochissimo zolfo. La sua composizione chimica è la seguente: carbonio (54%), idrogeno (8%), sodio (16,8%), fosforo (0,9%), zolfo (0,3%).

La caseina presenta innumerevoli amminoacidi che sono rispettivamente, per valore percentuale:

- *Acido glutamico*: 15,6%;
- *Leucina*: 9,4%;
- *Lisina*: 8,4%;
- *Valina*: 7,2%;
- *Prolina*: 6,7%;
- *Tirosina*: 4,5%;
- *Fenilalanina*: 3,2%;
- *Triptofano*: 2,2%;
- *Alanina*: 1,5%;
- *Acido aspartico*: 1,4%;

L'alta percentuale di tirosina, lisina e triptofano (tre amminoacidi nobili) conferisce alla caseina un grande valore nutritivo. Nel latte la caseina si trova dispersa sotto forma colloidale come caseinato di calcio e come complesso con il



88

fosfato di calcio. La sua coagulazione può avvenire per *acidificazione*, per via *enzimatica* con il caglio, per prolungato riscaldamento ad alta temperatura (per esempio a 120°C per venti minuti): ne deriva la separazione delle altre due proteine del latte, la *lattoalbumina* e la *lattoglobulina*.

La *coagulazione per acidificazione* avviene quando nel latte è aggiunto un acido con la diminuzione del suo pH. Avverrà, quindi, un duale cambiamento: innanzitutto l'idrossifosfato di calcio colloidale, presente nella micella della caseina, si dissolverà e formerà il caglio ionizzato, che penetrerà nella struttura della micella e creerà forti legami interni del calcio; in secondo luogo, il pH della soluzione si avvicinerà ai punti isoelettrici delle singole tipologie di caseina. Entrambi i metodi di azione avviano un cambiamento all'interno delle micelle, iniziando con la crescita delle micelle attraverso l'aggregazione e terminando con un coagulo più o meno denso. A seconda del valore finale del pH, questo coagulo conterrà caseina sotto forma di sale o caseina nel suo stato isoelettrico o entrambi.

85. Modello nanocluster.

86. Modello dual-binding (doppio legame).

87. Immagine al microscopio di una micella di caseina.

88. Modello sub-micelle.

I punti isoelettrici dei componenti della caseina dipendono dagli ioni di altro tipo presenti nella soluzione. I valori teorici, validi in determinate condizioni, vanno da pH 5,1 a 5,3. Nelle soluzioni saline, simili alle condizioni del latte, l'intervallo per la precipitazione ottimale è compreso tra pH 4,5 e 4,9. Un valore pratico per la precipitazione della caseina dal latte è pH 4,6 (*punto isoelettrico*). Se si aggiunge un grande eccesso di idrossido di sodio alla caseina isoelettrica precipitata, la caseina ridisciolta sarà convertita in caseinato di sodio, parzialmente dissociata in ioni. Il pH dei prodotti a base di latte coltivato è solitamente compreso tra 3,9 e 4,5, che si trova sul lato acido dei punti isoelettrici. Nella produzione di caseina da latte scremato mediante aggiunta di acido solforico o cloridrico, il pH scelto è spesso 4,6 (fig.89).

La *coagulazione per via enzimatica* è rappresentata dalla catena di amminoacidi che forma la molecola di κ -caseina, composta da 169 amminoacidi. Dal punto di vista enzimati-

co il legame tra gli amminoacidi (105 di *fenilalanina* e 106 di *metionina*) è facilmente accessibile a molti *enzimi proteolitici*. Alcuni di questi enzimi attaccheranno il legame tra gli amminoacidi 'spezzando' la catena. L'estremità amminica solubile è dominata dagli amminoacidi da 106 a 169 che sono polari, conferendo a questa sequenze proprietà idrofile. La parte rimanente della catena (costituita dagli amminoacidi da 1 a 105), invece, è insolubile e prende il nome di *paracaseina*, che floccula dalla soluzione colloidale e può essere raccolta per centrifugazione. La caseina, dopo lavaggio e asciugatura, si presenta come una sostanza bianca, scagliosa o granulosa, con odore di latte leggermente rancido. Le caseine, quindi, sono in equilibrio tra una fase colloidale (micellare) ed una acquosa (siero) e la durata delle fasi dipenderà dal pH e dalla temperatura. L'abbassamento della temperatura o del pH aumenta la quantità delle sierocaseine. Il pH al quale si osserva la massima dissociazione si sposta a valori più alti all'aumentare della temperatura³² (fig.89).

89. Schema di sintesi delle fasi di coagulazione della caseina rispettivamente da acidi (coagulazione per acidificazione) o alcali (coagulazione per via enzimatica).





La struttura molecolare della caseina è, come già detto, molto complessa: sono presenti, come nella cheratina, legami peptidici e legami trasversi; ma le macromolecole di proteina non sono a configurazione distesa o elicoidale come nella proteina della lana, bensì a configurazione arrotolata o sferica con gruppi superficiali con carica positiva o negativa. In ambiente acido o basico, le molecole di caseina si orientano in modo regolare, assumendo una configurazione distesa; ciò si spiega perché, trattando la caseina con alcali tipo NaOH, si ottenga una massa vischiosa facilmente riducibile in fili. La configurazione della proteina, infatti, da globulare si trasforma in lineare, anche se non regolare (la massa è fluida) e poi, per successiva estrazione e coagulazione, in fibrosa con zone cristalline (*crystalliti*)³³ (fig.90).

Nella produzione industriale, la caseina è presente in diverse tipologie, a seconda dell'utilizzo finale:

- *caseina polimerizzata*: nell'industria è utilizzata principalmente nella produzione di sostanze artificiali nella categoria delle materie plastiche, grazie alla sua insolubilità in acqua. La caseina polimerizzata è storicamente mescolata con formalina (il cui prodotto finale era noto come *galalite*, uno delle prime plastiche brevettata nel 1899 da Friedrich Adolph Spitteler e Wilhelm Krishe) o utilizzata per la produzione di fibre artificiali di caseina, come Lanital e Merinova, che saranno analizzati specificatamente nei prossimi paragrafi). Piccole quantità di caseina pre-samica (cioè quella ottenuta per coagulazione per via enzimatica), sono impiegate per la produzione di prodotti caseari;
- *caseina acida*: è la tipologia che domina i mercati mondiali. È utilizzata nell'industria chimica come additivo per la produzione e la smaltatura della carta di alta qualità. Per le applicazioni nell'industria della carta, è particolarmente importante che la caseina sia priva di grasso e non

contenga particelle di corpi estranei che potrebbero macchiare la carta. Per ottenere un contenuto di grassi estremamente basso nel latte scremato, dovrebbe essere passato attraverso un impianto di microfiltrazione (MF) in combinazione con la pastorizzazione. Ogni settore ha le proprie rigide specifiche di qualità. Anche le industrie delle vernici e dei cosmetici sono grandi consumatori di caseina acida;

- *caseinato di sodio*: una applicazione di caseina crescente nell'industria alimentare è quella del caseinato di sodio. La caseina viene facilmente disciolta in alcali e il liquido ottenuto viene, quindi, essiccato in polvere. Questa polvere è molto solubile ed è spesso utilizzata come emulsionante negli insaccati e si trova in una serie di nuovi prodotti, come sostituti del latte e della panna.
- *caseinato di calcio*: esso viene impiegato come alternativa al caseinato di sodio. La sua viscosità è leggermente inferiore a quella del caseinato di sodio.
- *caseinato di magnesio*: i composti di caseina con materiali metallici, quali magnesio, alluminio, etc., sono impiegati per uso medico o come emulsionante nei prodotti a base di carne. I derivati dei metalli della caseina che sono utilizzati principalmente per scopi terapeutici includono quelli contenenti argento, mercurio, rame e bismuto.
- *calcio co-precipitato*: tale sostanza può essere disciolta in alcali e successivamente essiccato. I campi di applicazioni sono i medesimi a quelli precedentemente elencati, soprattutto nel settore alimentare, dove esso dal punto di vista nutrizionale, presenta un contenuto elevato dell'amminoacido essenziale, la lisina.

Nei prossimi paragrafi, si affronterà come caso studio, la sperimentazione di una fibra caseinica, il Lanital e la Merinova.

90. Evoluzione della struttura molecolare della caseina per trattamento con NaOH: l'iniziale struttura globulare si trasforma in quella fibrosa, in Quaglierini C., "Chimica delle fibre tessili", Zanichelli, Bologna, 2012, pag.146.

Evoluzione storica e utilizzo delle fibre caseiniche nell'industria: il Lanital e la Merinova

Il Lanital (brevetto n.52933 del 11 Novembre 1935 depositato da SNIA Viscosa, Società Nazionale Industria Applicazioni Viscosa), è un filato dal colore chiaro, dalla consistenza leggera e morbida, commercializzato a partire dal 1935 dalla SNIA Viscosa, «Società Nazionale Industria Applicazioni Viscosa», grazie alla scoperta del chimico italiano Antonio Ferretti³⁴. Tale società, fondata a Torino nel 1917 da Riccardo Gualino, si occupava inizialmente del trasporto di carburanti dall'America all'Italia per poi, dopo la Prima Grande Guerra, occuparsi della produzione di tessuti artificiali. Dopo aver acquistato la «Società Viscosa» di Pavia (a quel tempo una delle principali aziende chimiche italiane), la «Italiana Fabbriche Viscosa» di Venaria e la «Italiana Seta Artificiale» di Cesano Maderno, Riccardo Gualino fondò la SNIA Viscosa la quale, in poco tempo, divenne una delle principali industrie tessili d'Italia fino a diventare, durante la Seconda Guerra Mondiale, la più importante azienda tessile nazionale. Dal 1922 iniziò, come già detto, la produzione di tessuti quali il "Rayon" o il "Fiocco", entrambi dei filati estratti dalla cellulosa ricavata dalla "canna gentile" (*Arundo donax*) ampiamente adoperati nella moda e nell'*interior design*³⁵. Tuttavia, il materiale più pregiato e famoso prodotto dall'azienda fu il Lanital, la prima fibra fabbricata dalla caseina del latte (fig.91). Questo materiale, particolarmente interessante nella sua evoluzione storica, rappresentava - fra tanti - la stretta relazione tra industria ed artigianato proprio perché nacque e divenne ben presto simbolo della nascente politica autarchica del governo nazionale. Sebbene nelle regioni d'Oltralpe siano stati diversi i tentativi (pur fallimentari) di ricavare il filato dalla caseina del latte (della quale già erano note le proprietà), fu solo l'ingegno italiano, grazie anche alle politiche protezionistiche del tempo, che portò a brevettare il sistema produttivo per l'estrazione del prodotto. Esiste-

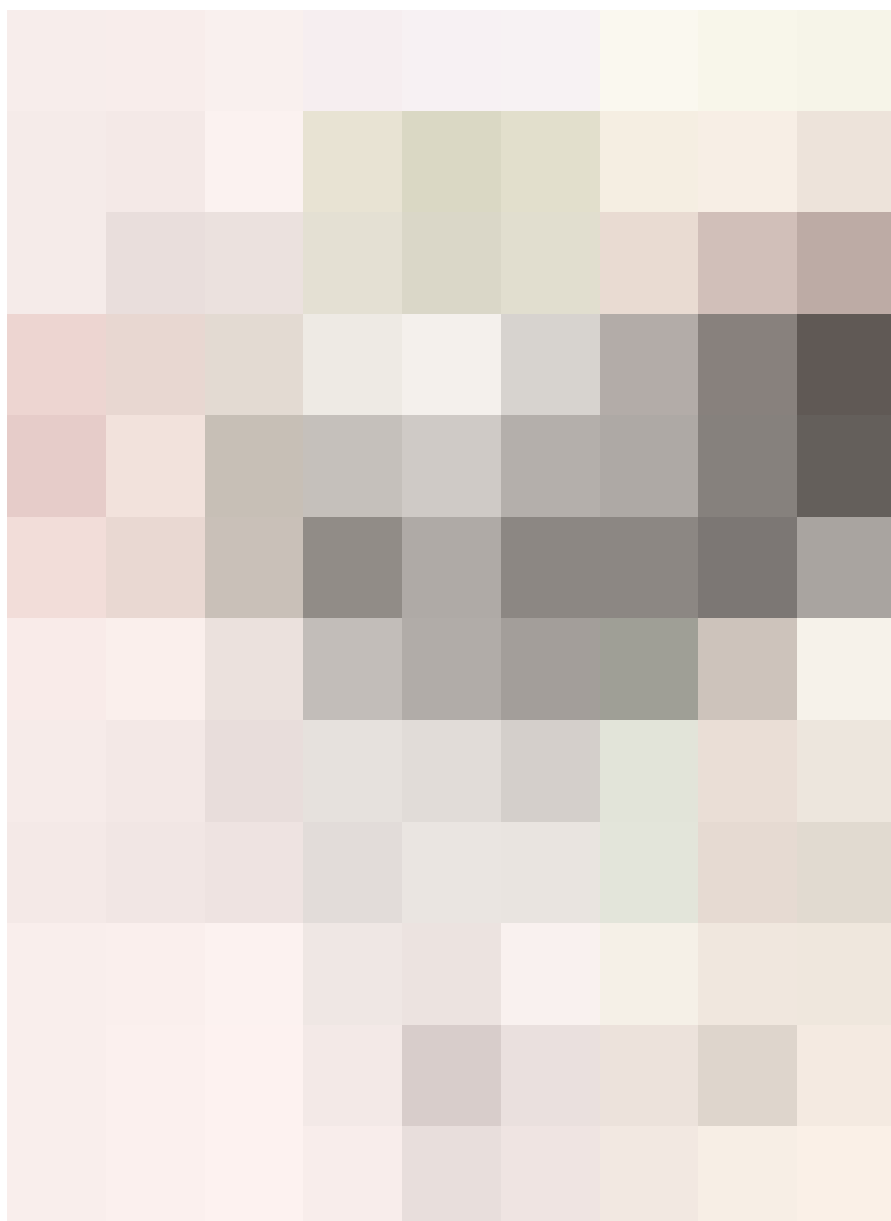


vano, difatti, numerose declinazioni straniere della fibra italiana, come per esempio; l'*Aralac* ("Aralac Inc.", U.S.A.), la *Caslen monofil* ("Rubber-set Co.", U.S.A.), la *Casolana* ("Veereen Melkwolfabrik", Olanda), la *Fibrolane* ("Courtaulds Ltd.", Inghilterra), *Le Lanital* ("Le Lanital Belge S.A.", Belgio), il *Lanital francese* ("Le Lanital Français S.A." Tourcoing, Francia), il *Thiozel* ("Lodz", Polonia), e il *Tiolan* ("Spinnstoff Ges.m.b.H.", Cottbus, Germania)³⁶.

Il Lanital, per tale motivo, fu ampiamente pubblicizzato come prodotto autarchico tanto che la SNIA Viscosa commissionò all'accademico italiano Filippo Tommaso Marinetti (uno dei fondatori del movimento

futurista) la composizione della poesia «*Il poema del vestito di Latte*» a cura dell'Ufficio Propaganda SNIA Viscosa, con finalità propagandistiche e accompagnata da una illustrazione del famoso Bruno Munari (artista e grafico pubblicitario del movimentano futurista)³⁷⁻³⁸ (fig.92).

«T'impongo o sacro
latte di stringere
le maglie d'una
viscosità resistente»³⁸
- F.T.Marinetti



91. Illustrazione pubblicitaria della fibra tessile Lanital prodotta e commercializzata dalla azienda chimica italiana SNIA Viscosa, opera dell'autore Alberto Bianchi, Aprile, 1936. L'illustrazione sarà impiegata il 19 Aprile 1947 come marchio d'impresa per il rinnovo del brevetto depositato n.82340 del 1947.

92. Copertina illustrata a colori di Bruno Munari per l'opera "*Il poema del vestito di latte*" di Filippo Tommaso Marinetti. © Archivio Guido Andrea Pautasso, Milano.

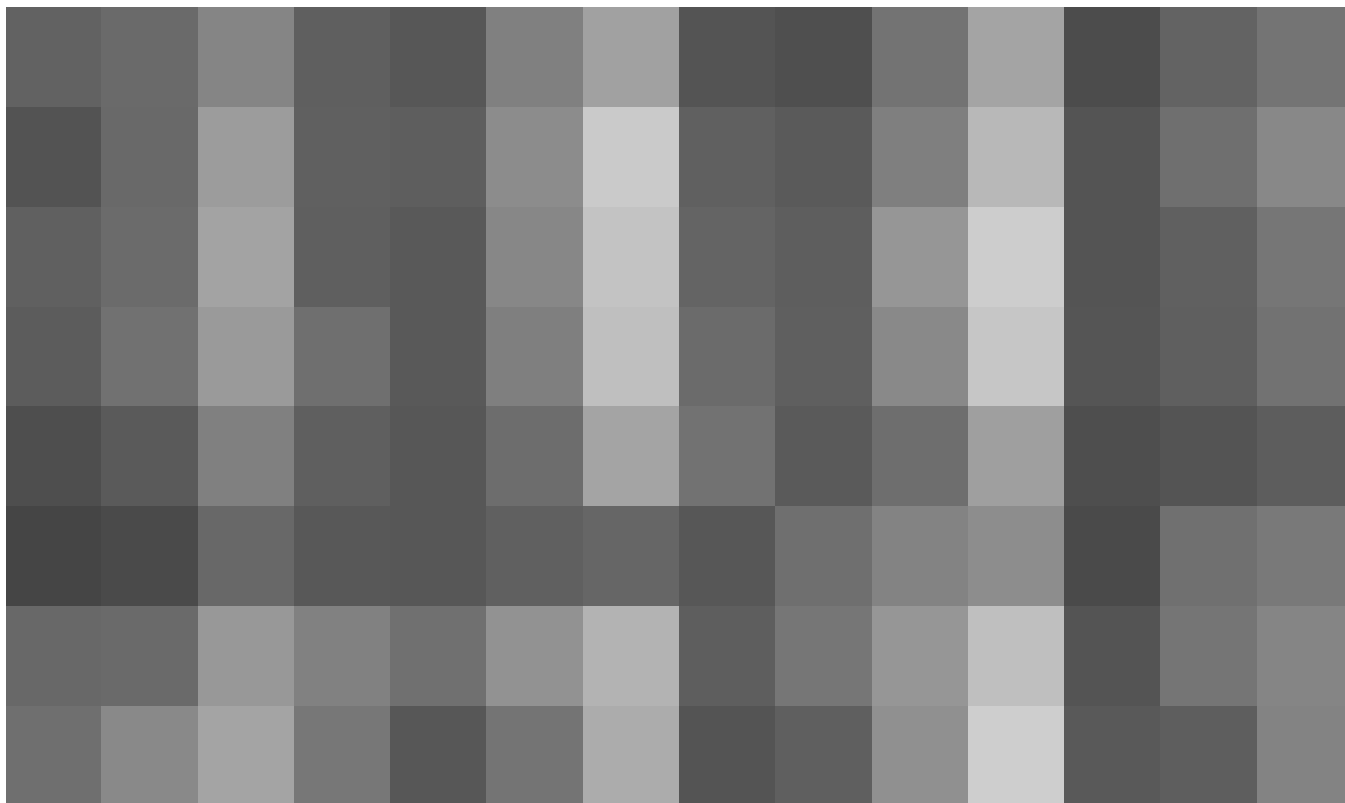
Le campagne propagandistiche nascono come “pubblicità collettive”, che invocano ed esortano ad acquistare solo prodotti italiani affinché si possano allineare alla ideologia autarchica imposta dal regime fascista in risposta alle sanzioni economiche che la Società delle Nazioni aveva applicato nei confronti dell'Italia a seguito della Guerra d'Etiopia (1935). La politica autarchica si propone come mezzo per ridurre al minimo le importazioni di prodotti stranieri, favorendo l'*export* di materiali *made in Italy*, rendendo il paese indipendente dal mercato europeo ed internazionale.

Per realizzare tali obiettivi, la politica chiese uno sforzo imponente alle industrie italiane chiave (metalli, tessuti,

combustibili, edilizia, etc.) dal punto di vista della produzione, della ricerca e delle sperimentazioni, incentivando parallelamente l'accentramento delle attività produttive nelle mani dei grandi gruppi monopolisti industriali, come la SNIA Viscosa (fig.93). Con la guerra, quando le priorità degli italiani divennero cibarsi e vestirsi, le riviste e le pubblicità assunsero un carattere sempre più scarno e opaco. I richiami alla modernità, che avevano caratterizzato gli anni precedenti, divennero enfatici appelli all'autarchia, all'arte di arrangiarsi per ottenere prodotti da materiali poveri e di scarto, come il Lanital (fig.94).

Il panorama di materiali e artefatti prodotti in Italia durante gli anni della guerra è un campo d'indagine di no-





94

93. Illustrazione pubblicitaria delle fibre tessili Sniafiocco e Lanital prodotte e commercializzate dalla azienda chimica italiana SNIA Viscosa.

94. Balle di Lanital compresso pronte per essere inviate agli stabilimenti di filatura e tessitura, in "Vedere. Le fibre tessili artificiali", periodico unico supplementare della rivista "Sapere", fascicolo n.153, Milano, Maggio 1941, Hoepli, Milano, 1941, pag.116.

tevole interesse perché rappresenta la fine di un ciclo politico e culturale, riflesso delle condizioni economiche che si svilupparono in Italia proprio a partire dalle Inique sanzioni del 1935. L'insieme di elementi si staglia come un *pop-up* sullo scenario di un mercato chiuso tra industria e artigianato, aperto all'utilizzo di materiali innovativi e tradizionali, purché nazionali. Un'ibridazione tecnologica che dalla metà degli anni trenta – con il varo definitivo della politica autarchica, la fondazione dell'Impero e il conseguente rafforzamento del regime fondato sul duce, sul partito unico e su una complessa macchina organizzativa finalizzata a inquadrare e mobilitare le masse³⁹ – ha caratterizzato con un gioco di specchi, l'architettura, il design e la moda.

Per questo e per altri principi e azioni peculiari al mercato chiuso così come si definì dopo il 1936, il fenomeno autarchico italiano è stato definito «*un involontario laboratorio di idee*»⁴⁰ anticipatore della *Green Economy* e, potremmo aggiungere, del contemporaneo *re-cycle design*, del fenomeno dei *makers*, del rilancio dell'artigianato e dell'integrazione tra prodotti industriali e tradizionali⁴¹.

Infatti, il fenomeno autarchico, in prospettiva attuale come questione etica ambientale, si pone come espressione contemporanea della lotta agli sprechi e della ricerca di soluzioni alternative allo sfruttamento delle materie prime e della valorizzazione delle risorse del territorio.

Tornando alla fabbricazione delle fibre tessili (in particolar modo di quelle autarchiche), è ovvio come la sperimentazione d'avanguardia e la valorizzazione dell'artigianato regionale e del *fatto a mano*, abbia incentivato l'affermazione di creatori e importanti sartorie e al tempo stesso abbia esteso tali ricerche ad altri settori, quali l'architettura, rinnovata anch'essa nell'anima dei sistemi costruttivi ed, al tempo stesso, epurata dagli stilemi storici, tradizionali e arcaici a favore di innovativi 'modernismi' stilistici.

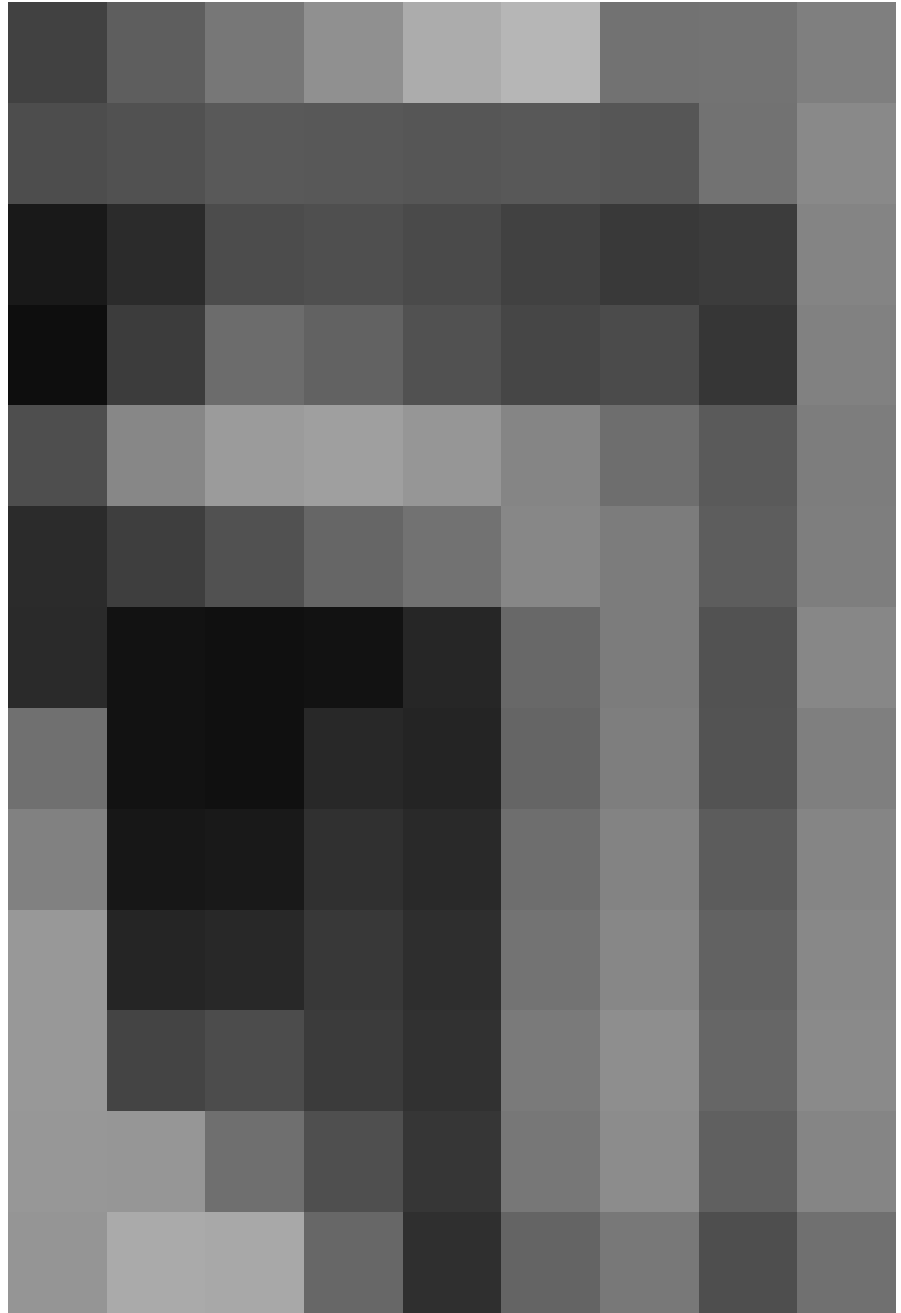
Ancora più interessante è il ponte di collegamento tra settori talvolta discordanti, come quello tessile e quello architettonico. I materiali fibrosi, infatti, non costituiscono solo la materia prima di prodotti della filiera tessile, ma sono declinati anche nell'isolamento termico e acu-

stico del sistema edificio-impianto. In particolare, attraverso complessi processi industriali, iniziò la produzione di materiali di origine vegetale ed animale quale prodotto delle manifatture italiane: infeltrimento di peli (più propriamente crine di animale), lane artificiali (ottenute dalla decomposizione della lavorazione di composti proteici, come nel caso del Lanital) o materie vegetali a base di cellulosa rappresentarono il vasto campionario di prodotti per le costruzioni capaci di garantire pesi contenuti, economicità e alte prestazioni energetiche (soprattutto termoacustiche).

Il *Feltro battuto*, ad esempio, si configurò quale uno dei materiali di matrice animale più diffuso in Italia. Coevo ad un materiale della stessa matrice, il *Trichopiese* (prodotto dalla Società Anonima Carlo Pacchetti, costituito dalla compressione di crine di animale), il Feltro battuto si configurava come prodotto dell'infeltrimento di fibre animali (pelo o lana) che, bagnate con acqua calda e opportunamente trattate, infittivano la loro massa diventando meno permeabili all'aria (quando sottoposte a ripetute azioni di compressione e sfregamento). Questo materiale, infatti, era utilizzato come isolamento termo-acustico in diversi sistemi costruttivi e, in particolare, in una soluzione di solaio laterocementizio che da esso ne prese il nome: il «*Solaio Feltro*» (brevettato dalla ditta "Pietro Villa" di Milano)⁴².

Particolarmente interessante e significativamente più ricco è, inoltre, il campionario dei *materiali a matrice vegetale* (di cui i principali sono: *Antivibrite*, *Assorbite*, *Celotex*, *Co-coibite*, *Italparato*, *Maftex*, *Salubra*, *Sanitas*, *Solomit* (fig.95), *Tekton*, *Cristallo*, *Feltroflex*, *Salus*, *Tekko*, etc.).

Dalla lavorazione della cellulosa, contenuta in diverse materie prime italiane (juta, fibre di canne, cocco, radici di liquirizia, paglia di grano e di riso, etc.) le industrie italiane iniziarono la produzione di rotoli, fogli e lastre dalle alte prestazioni isolanti. Ad esempio, dalla juta (estrat-



ta, secondo specifiche lavorazioni, da alcune piante appartenenti al genere delle *Malvacee*) veniva realizzato un particolare materiale, denominato *Antivibrite*, costituito da numerosi strati di uno speciale tessuto costituito da fibre di juta impregnato di asfalto⁴³. Tale materiale, prodotto dalla azienda torinese Assorbite Società Anonima Italiana, poiché sottoposto a fortissime sollecitazioni di compressione garantiva, oltre alle prestazioni termoacustiche e di tenuta all'acqua, anche importanti capacità di resistenza meccanica (a compressione fino a 100kg/cm²)⁴⁴.

95. Immagine storica di una applicazione del Solomit, in Pagliuca A., "Materiali Made in Italy. Avanguardia italiana nell'industria delle costruzioni del primo '900", Gangemi Editore, Roma, 2019, pagg.626-646.

Dall'importazione coloniale di cocco, invece, fu sperimentato l'uso delle fibre vegetali per realizzare la *Cocoibite* (fig.96), un materiale (la cui radice semantica ne ricorda la materia prima) prodotto dalla Assorbite Società Anonima Italiana. Sebbene le fibre di cocco fossero utilizzate nell'industria tessile per tessuti di arredamento, fu sperimentato l'uso della matrice fibrosa vegetale anche nel settore delle costruzioni, sfruttando l'elevato grado di elasticità, la resistenza a compressione e la forte compatibilità con il calcestruzzo. La *Cocoibite* era commercializzata in rotoli di lunghezza 20m e larghezza 1m con uno spessore variabile in funzione delle prestazioni che poteva garantire e dell'elenco tecnologico nel quale veniva inserita (generalmente da 2-3-5cm)⁴⁵.



96

Sebbene le principali industrie italiane erano localizzate nel settentrione italiano, molte materie prime venivano estratte nel meridione, costituendo esempi di materiali propriamente 'autarchici' legati alle coltivazioni autoctone spesso 'di nicchia', inusuali ed afferenti ad aree geografiche ristrette. Uno dei materiali più interessanti, rispetto a questa chiave di ricerca, è certamente il *Maftex*, costituito da un «*intreccio meccanico di fibre di radici di liquirizia*»⁴⁶. Prodotto in lastre, il *Maftex* garantiva ottime prestazioni termoacustiche ed era principalmente adoperato come sistema di rivestimento per

chiusure verticali esterne ed interne, strato di isolamento termoacustico per sottotetti e chiusure orizzontali intermedie. La particolarità delle matrici vegetali, in generale, e particolarmente del *Maftex* era il grado di compatibilità con materiali cementizi o intonaci di gesso che potevano essere applicati direttamente sul materiale sfruttando la scabrosità della superficie grezza delle fibre.

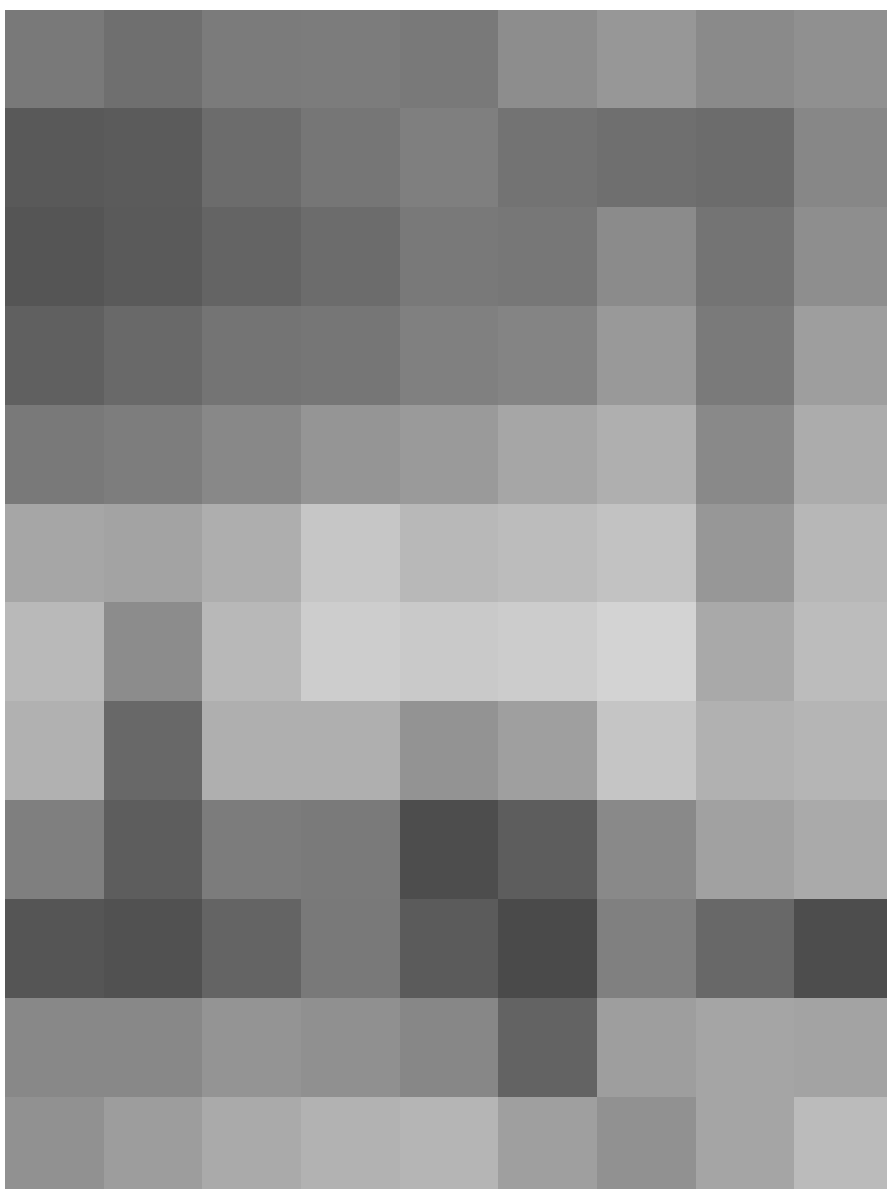
Questi esempi fanno capire l'importante diffusione che le fibre artificiali e naturali hanno avuto nella prima metà del Novecento. La produzione globale delle fibre artificiali in Italia passa dai 150.000kg del 1913 a 750.000kg nel 1920, per raggiungere nel 1940 i 166 milioni di chilogrammi di cascami di rayon e quattro milioni di Lanital⁴⁷. L'ascesa rapidissima della produzione delle fibre artificiali è da ricercare non solo nella scoperta della moda e dello stile *made in Italy*, ma soprattutto nel perfezionamento tecnico della produzione di materie fibrose paragonabili per qualità e caratteristiche alle più nobili fibre. Naturalmente l'incremento vertiginoso avvenuto negli anni 1935-1940 è imputabile anche all'economia autarchica in cui si sciolgono i pregiudizi in merito alla qualità tra «fibre artificiali» e «fibre autarchiche», sinonimo nella mentalità dell'epoca, di prodotto di ripiego, si surrogato e del fare di necessità virtù. La denominazione di «fibre autarchiche», pertanto, sembra sminuire la vera natura di queste nella mentalità dei consumatori. In realtà, l'imponente macchina propagandistica, ha voluto sottolineare come le fibre tessili artificiali sono autarchiche di sua natura, in quanto autarchiche erano sin dalla loro origine in misura quasi totale. Il processo dell'autarchia non ha fatto altro che apportare migliorie ai prodotti e ai processi di produzione, migliorando le loro qualità intrinseche. Inoltre, le caratteristiche, i costi e la qualità delle fibre naturali sono dipendenti dal raccolto delle materie prime, dalla stagionalità e dalla manodopera, mentre le fibre artificiali non subiscono nessuna influenza.

96. Immagine storica di un pannello di *Cocoibite*, in Pagliuca A., «*Materiali Made in Italy. Avanguardia italiana nell'industria delle costruzioni del primo '900*», Gange-mi Editore, Roma, 2019, pagg.626-646.

È in questo contesto sociale, politico ed economico che si inserisce la fortunosa ascesa del Lanital, coadiuvato da una importante divulgazione pubblicitaria. A sostegno delle imponenti e complesse campagne pubblicitarie, inoltre, si affiancano gli eventi 'macropubblicitari' come fiere, padiglioni ed esposizioni nazionali, con il fine ultimo di promuovere la crescente modernità e l'efficienza dell'industria italiana. Lo stesso Lanital viene immesso sul mercato con grande dispiego di risorse: alla Fiera Campionaria di Milano del 1936 (figg.97-99) gli viene dedicato un intero padiglione e reclamizzato su giornali, riviste, quotidiani e addirittura cartelloni affissi per strada, ponendosi come il materiale cardine dell'ingegnosità e della operosità italiana.



98

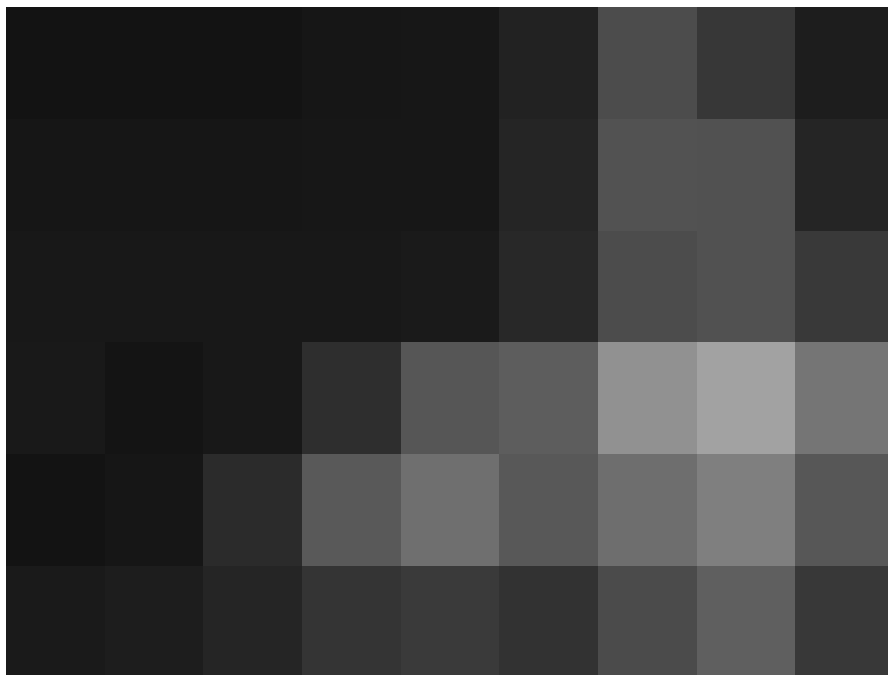


97

97. Veduta esterna del padiglione della SNIA Viscosa alla Fiera Campionaria di Milano del 1936, opera dell'architetto Eugenio Giacomo Faludi. © Archivio storico Fondazione Fiera Milano.

98. Veduta esterna del padiglione della SNIA Viscosa alla Fiera Campionaria di Milano del 1936, opera dell'architetto Eugenio Giacomo Faludi. © Archivio storico Fondazione Fiera Milano.

99. Veduta esterna del padiglione della SNIA Viscosa alla Fiera Campionaria di Milano del 1936, opera dell'architetto Eugenio Giacomo Faludi. © Archivio storico Fondazione Fiera Milano.



99

Sebbene il Lanital fosse ampiamente adoperato nel campo della moda e dell'*interior design* (come materiale di rivestimento e tappezzerie), vi furono anche delle 'timide' sperimentazioni nell'applicazione di questo materiale come isolamento termico degli edifici. Infatti, sebbene non siano numerosi i casi documentati, il Lanital fu anche sperimentato come cuscinetto compattato, adoperato come isolante termoacustico nelle chiusure verticali esterne e per le partizioni interne. Benché le proprietà termiche e di resistenza alla corrosione siano ben maggiori rispetto a quelle della lana naturale, il Lanital dopo la Seconda Guerra Mondiale fu soppiantato dai nuovi tessuti sintetici (soprattutto acrilici) che avevano, peraltro, una resistenza all'usura ed una durabilità ben maggiore rispetto al Lanital, il quale già nel secondo Novecento fu eliminato dal commercio⁴⁸.

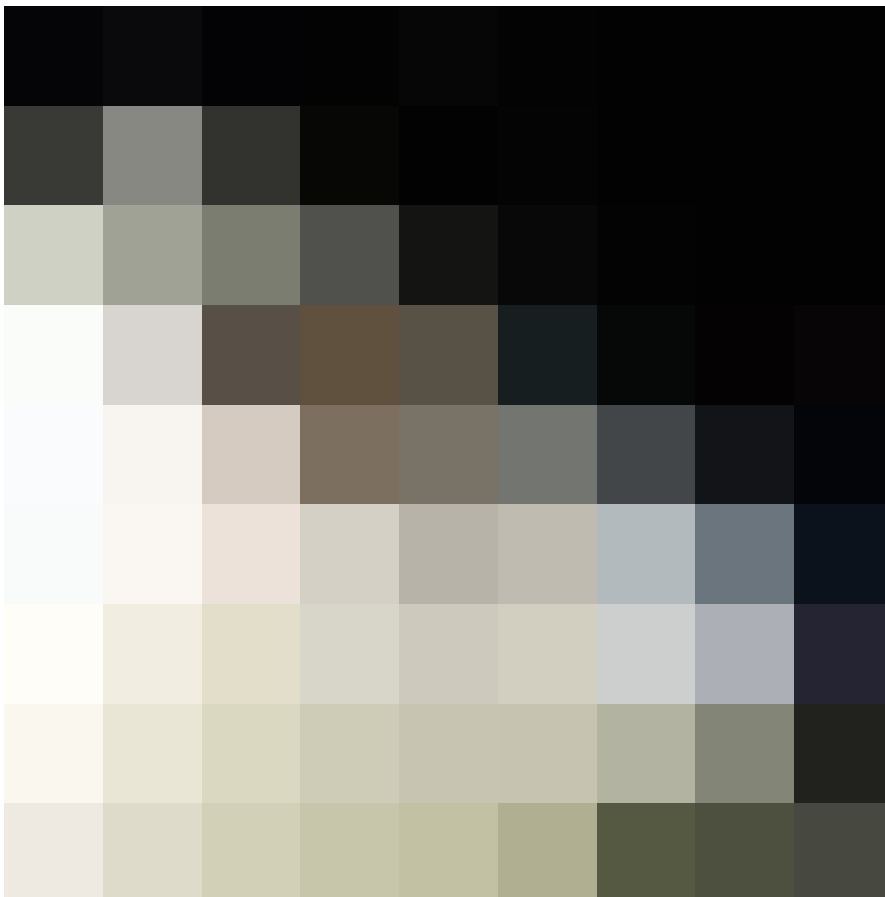
Il successo del Lanital, galvanizzato dalla "poesia dei tecnicismi", assume negli anni un carattere sempre più retorico e propagandistico subendo un drastico declino con l'inabissarsi del Regime fascista alla fine della Seconda Guerra Mondiale. La SNIA Viscosa, quindi, apporta un processo di epurazione del prodotto che aveva rappresentato la grande *escalation* economica,

reintroducendolo nel mercato cambiando strategicamente il nome in *Merinova* e migliorando le caratteristiche di resistenza e durabilità. Tuttavia, il tentativo di rilancio fallisce a causa dell'ingresso nell'industria tessile della produzione di fibre di derivazione acrilica. Il Lanital e i materiali moderni, frutto delle sperimentazioni italiane che li caratterizzano, rappresentano, *ipso facto*, il riflesso del progresso industriale che caratterizzò l'Italia di inizio '900, costituendo una sostanziale revisione del modo di concepire le costruzioni: dall'idea della costruzione massiva alla definizione di costruzioni leggere nate dall'assemblaggio di componenti già prodotte nell'industria. Le politiche protezionistiche e le normative di Regime divennero, sotto alcuni aspetti, incentivo per la sperimentazione di materiali propri dell'italianità, stimolando, oltre la produzione nazionale di prodotti, soprattutto l'ingegno degli industriali emergenti per la realizzazione di materiali iconicamente definiti 'Made in Italy'. Oggi però, sulla scia della sostenibilità ambientale, questi materiali (tra cui la fibra di latte) sono oggetto di nuovi studi e sperimentazioni, soprattutto nel fornire nuovi prodotti bioplastici che possano sostituire (o almeno limitare) l'uso improprio delle plastiche convenzionali.

Una di queste sperimentazioni è quella ideata dalla stilista e microbiologa tedesca Anke Domaske con il nome evocativo di *Qmilk*, una fibra proteica ecologica ottenuta dagli scarti industriali del latte o direttamente dal latte non impiegato (basti pensare che ogni anno, in Germania, si dismettono circa 2 milioni di tonnellate non impiegate nell'industria casearia e nella filiera alimentare). Inoltre, il processo produttivo di *Qmilk* è molto ecosostenibile poiché per realizzare 1kg di lana di latte occorrono appena 2 litri di acqua, contro i 10.000 litri necessari per produrre la stessa quantità di cotone. *Qmilk* è chiaramente un prodotto biodegradabile, ma vanta di altre caratteristiche quali l'antibattericità, la compatibilità dermatologica e la mancanza di additivi chimici dannosi. Il tessuto, inoltre, realizzato in filato di latte si presenta particolarmente piacevole e confortevole sulla pelle con caratteristiche di leggerezza, morbidezza, scorrevolezza, permeabilità, freschezza e luminosità esplicando una naturale azione batteriostatica. È impiegato nei settori che spazia-



101



100

100. Pellicola biopolimerica di *Qmilk*. © *Qmilkfiber*.

101. Granulati biopolimerici di *Qmilk*. © *Qmilkfiber*.

no dall'abbigliamento, all'*automotive*, ai prodotti per la casa fino ad arrivare ai prodotti per l'imballaggio e il *packaging* e alla produzione di pellicole alimentari in grado di preservare le proprietà organolettiche degli alimenti e, a fine impiego, facili da dismettere e biodegradare (fig.100). Inoltre, il Qmilk è prodotto in granuli biopolimerici, secondo gli standard EN 13130, valida alternativa naturale all'argento (gli amminoacidi della caseina hanno un effetto antibatterico) per la protezione e prevenzione da contaminazioni e diffusione di batteri sulla superficie di alcuni materiali (in particolar modo degli alimenti) (fig.101).

Idea tutta italiana è quella, invece, ideata dalla giornalista e creatrice Susanna Bonati con il nome di *Papermilk* (fig.102), la prima carta al latte al mondo impiegabile anche nel settore del *packaging*. Le fibre di latte contenute nella carta, infatti, conferiscono al nuovo supporto non solo un tatto e una morbidezza unici (essendo inclusa anche una percentuale di *linters* di cotone e fibre di

pura cellulosa vergine nella ricetta industriale), ma un immediato rimando alla primordiale necessità vitale del latte materno che, come nessun'altra cosa, ci ha 'protetti' e nutriti.

Numerosi sono gli altri esempi di sperimentazione delle fibre biopolimeriche a base di caseina. *Milkofil*, per esempio, è un filato biologico ottenuto dal latte e impiegato principalmente nell'abbigliamento, così come il *Rollo Fill* prodotto dall'azienda Molina Piumini sotto forma di sfere di fibra di latte e poliestere in grado di incapsulare aria, preservando tutti i benefici in termini di termoregolazione ed elasticità.

Dopo questa disamina storico-evolutiva delle fibre naturali ed artificiali e, in modo particolare, delle fibre caseiniche (Lanital e Merinova), è essenziale analizzare i processi che sottendono la produzione delle fibre caseiniche e le relative proprietà fisiche, chimiche, e meccaniche, base conoscitiva per la sperimentazione di una nuova fibra a matrice biopolimerica a base di caseina.

102. *Papermilk*, la prima carta al latte al mondo, ideata dalla giornalista Susanna Bonati © Susanna Bonati (www.susannabonati.it).



Processo di produzione storica delle fibre caseiniche del Lanital e della Merinova

La composizione chimica della caseina, come già approfondito, ha una certa analogia con la *fibroina* (proteina costituente la seta naturale) e la *cheratina* (proteina costituente il vello pilifero dei mammiferi). Nella seconda metà dell'Ottocento, quando fervevano le ricerche e gli esperimenti per la produzione del Raion, allora ancora denominato «seta artificiale», vennero fatti numerosi tentativi per utilizzare la caseina a questo scopo. Un chimico tedesco, Friedrich Ernst Todtenhaupt (Seligefeld, 1873 - Radebeul, 1919), vi dedicò l'intera esistenza, e nel 1904 riuscì a prendere un primo brevetto per la produzione di raion dalla caseina; ma le fibre che ottenne erano ruvide, fragili e troppo coese tra loro, inservibili per la filiera tessile. Cercò di rimediare al problema con successivi brevetti, nel 1906 e nel 1907, introducendo modifiche nel suo procedimento, ricorrendo all'alcole per il bagno di coagulo, e così via, senza però riuscire a migliorare la fibra. Esaurite, invano, le proprie sostanze negli innumerevoli esperimenti, nel 1919 si suicidava, lasciando come testimonianza l'impressione che il problema per ottenere fibre tessili dalla caseina fosse impossibile.

Il che non era, come dimostrò anni dopo un acuto ricercatore italiano, Antonio Ferretti (Gavardo, 1889 - Milano, 1955), il quale si ripropose il problema con chiara conoscenza della sua natura prevalentemente chimica. Per prima cosa, il chimico Ferretti giunse alla constatazione che le caseine commerciali (già approfondite nei paragrafi precedenti, quali la *caseina caglio* o *polimerizzata*, usata per la fabbricazione della *galalite*; quella *lattica* o *acida*, impiegata per l'incollaggio e la smaltatura della carta, etc.) erano inservibili al fine di fabbricare fibre artificiali, sicché era necessario trovare un procedimento *ad hoc* per ottenere una caseina idonea per essere trasformata in fibra. Successivamente scelse accorta-



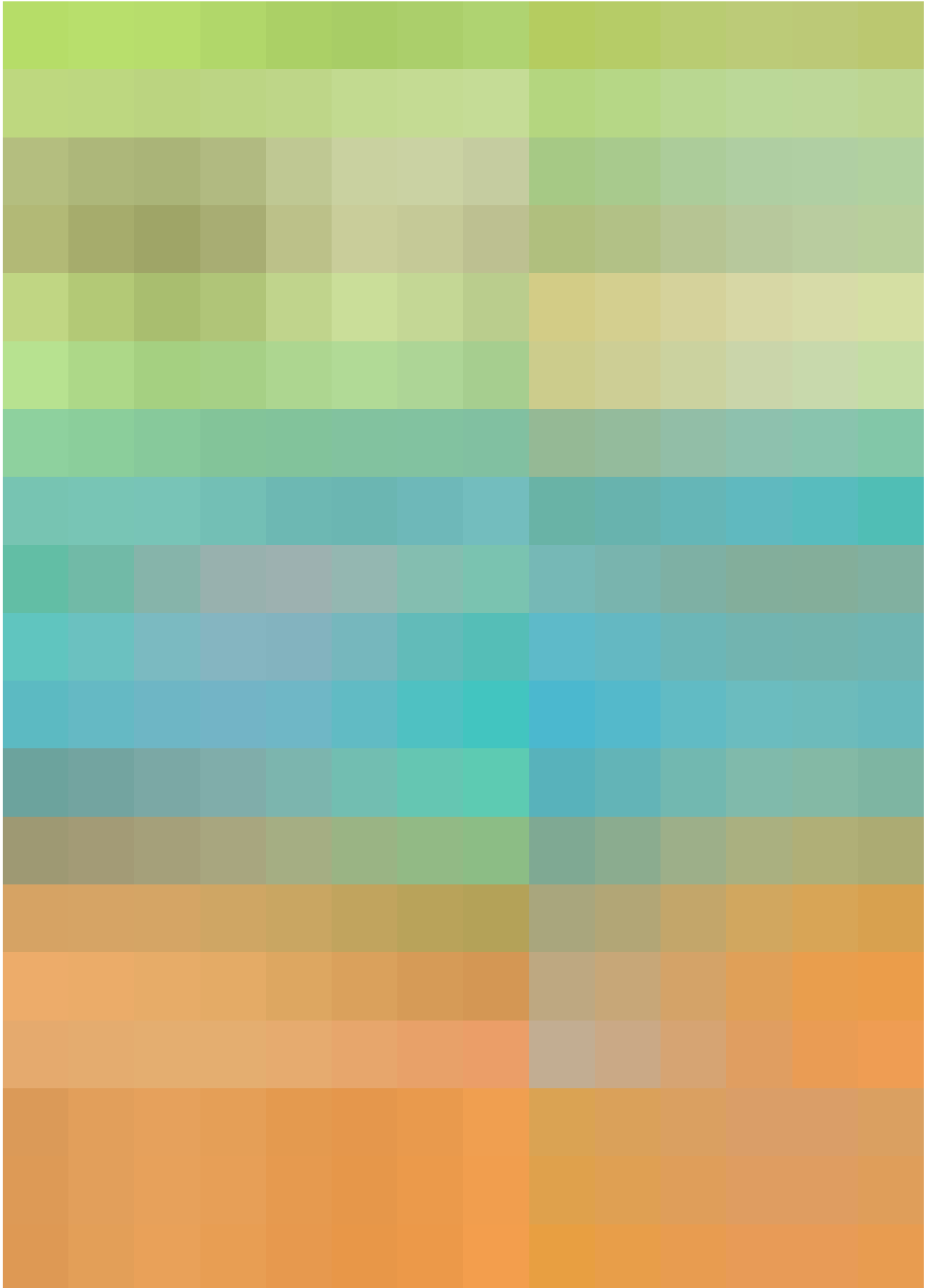
103

mente il solvente alcalino mediante il quale ottenere una soluzione di caseina perfettamente filabile; individuò, infatti, dei bagni di coagulo tali da evitare la coesione e l'incollaggio delle fibre: la causa dell'insuccesso delle sperimentazioni precedenti, fu che le caseine insolubilizzate con formaldeide risultavano dure e friabili (come nella sperimentazione di Todtenhaupt). Perciò Ferretti adottò lo stesso sistema di insolubilizzazione in formaldeide, ma con l'aggiunta di sali regolatori (formalina addizionata) del gonfiamento tale da produrre fibre insolubili, morbide e tenaci. La lana sintetica così ottenuta venne denominata *Lanital*.

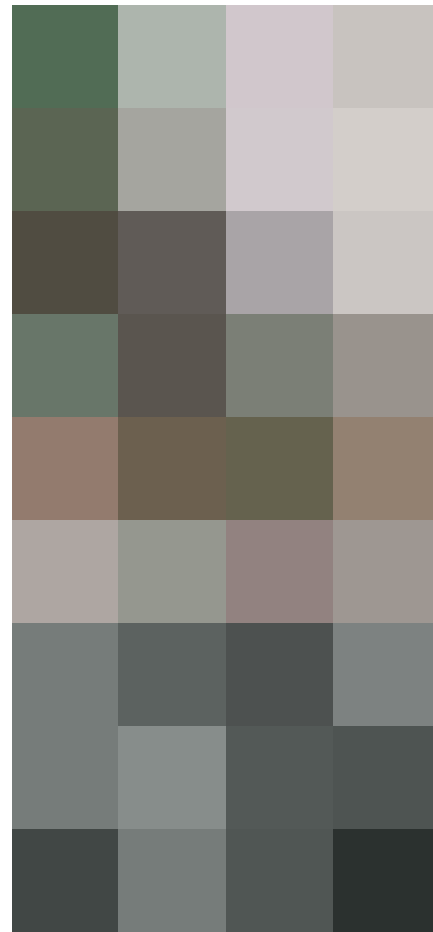
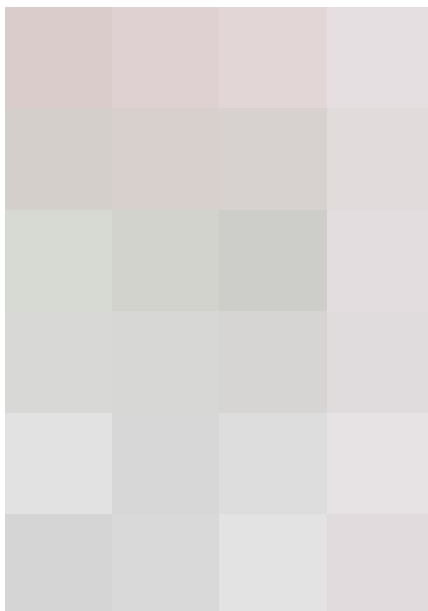
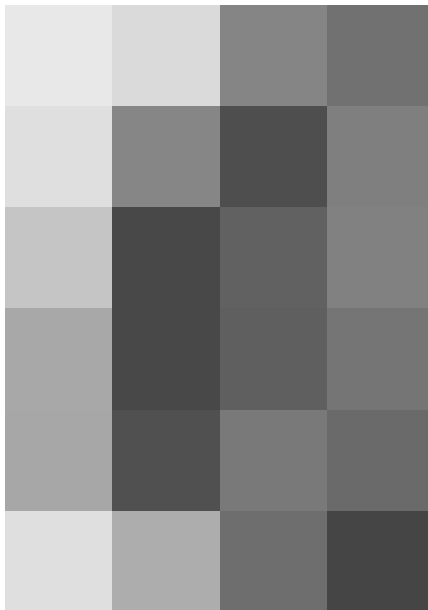
Il procedimento per la produzione del Lanital è tutt'oggi di difficile interpretazione, essendo alcuni punti delicati del procedimento protetti dai relativi brevetti (in parte decaduti in quanto un brevetto per invenzione industriale dura 20 anni dalla data di deposito allo scadere dei quali non è possibile rinnovare il brevetto diventando, quindi, riproducibile da tutti). Resta comunque permanente il segreto industriale della invenzione e la paternità intellettuale dell'idea, ma attraverso una approfondita ricerca storica, fotografica, bibliografica e archivistica, è stato possibile sviluppare uno schema attendibile delle varie fasi del procedimento sviluppato sinteticamente nella pagina seguente (fig.104).

103. Cartolina storica del ciclo industriale per la produzione del Lanital della SNIA Viscosa.

104. Elaborazione grafica delle varie fasi del procedimento autarchico per la produzione della fibra di caseina "Lanital", redatta mediante la consultazione e analisi approfondite di materiali inediti della Fiera Campionaria di Milano e appunti dell'inventore Antonio Ferretti, tramite consultazione di riviste e manuali storici, opuscoli pubblicitari della SNIA Viscosa, fondi e archivi.



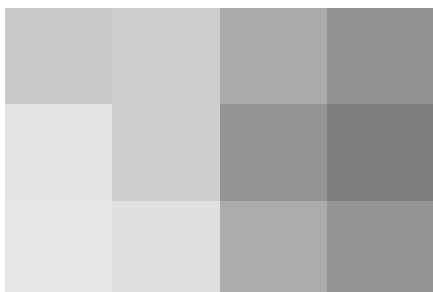
In particolar modo sono stati consultati e analizzati materiali inediti del ciclo completo di lavorazione del Lanital presentato nel 1936 in occasione della Fiera Campionaria di Milano e nel 1941 in occasione della Mostra del Tessile Nazionale a Roma, inediti appunti dell'inventore Antonio Ferretti, riviste storiche di settore (quali la rivista *Sapere* e la rivista *Vedere*), originali opuscoli pubblicitari della SNIA Viscosa, manualistica storica di settori (in modo particolare i manuali di Oscarre Giudici, "La rifinitura dei tessuti di lana e dei tessuti autarchici", Hoepli, Milano 1944 e "Tessuti di lana e di cotone. Analisi e fabbricazione", Hoepli, Milano, 1943), il fondo archivistico della Biblioteca Nazionale Centrale di Roma (Emeroteca digitale), l'archivio storico della SNIA Viscosa, cartoline e pubblicità d'epoca, video propagandistici dell'archivio storico cinematografico Istituto Luce e altro materiale storico e recente utile alla redazione di un quadro attendibile del procedimento autarchico per la produzione del Lanital.



105

105. Riviste storiche di settore, opuscoli, manuali e locandine pubblicitarie della produzione e commercializzazione del Lanital.

106. Fasi della lavorazione del Lanital e dello SNIA Amba della SNIA Viscosa alla Mostra del Tessile Nazionale e Roma, in opuscolo pubblicitario originale della mostra. Archivio privato.



106

107. Conferimento dei contenitori di latte all'industria, in "Vedere. Le fibre tessili artificiali", periodico unico supplementare della rivista "Sapere", fascicolo n.153, Milano, Maggio 1941, Hoepli, Milano, 1941, pag.87.

108. Pesatura del latte, *ibidem*.

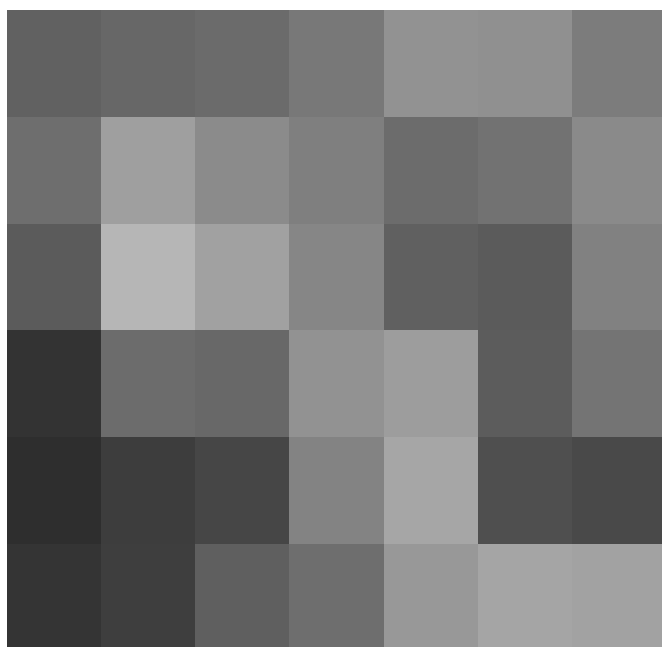
109. Raccolta del latte nelle vasche di lavorazione, *ibidem*.

110. Scrematura del latte tramite centrifugazione in apposite scrematrici ermetiche antischiama, *ivi*, pag.88.

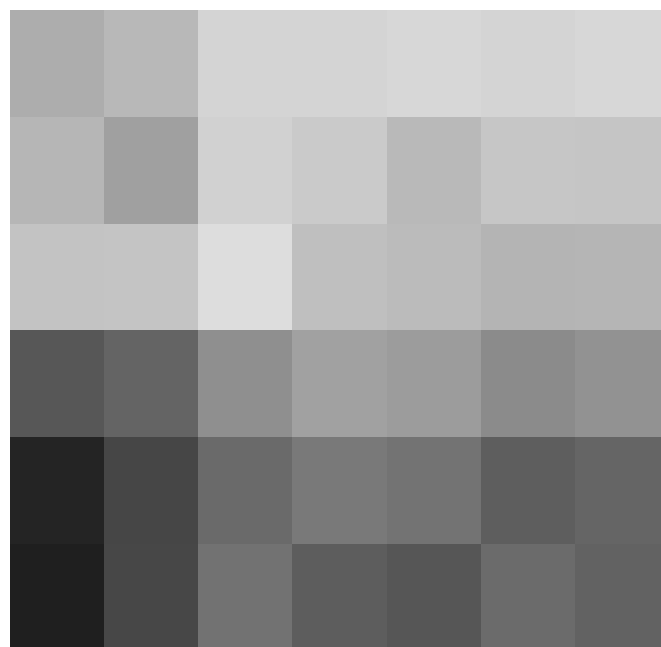
La produzione del Lanital viene, dunque sviscerata nella seguente ricerca, la cui conoscenza risulta indispensabile per la sperimentazione di una nuova fibra biopolimerica a base di caseina destinata non per l'industria tessile, bensì per quella delle costruzioni ed in particolar modo per l'isolamento termico ed acustico dell'involucro edilizio mediante l'utilizzo di materiali ecosostenibili. La fasi di produzione del Lanital sono:

- *estrazione e pesatura del latte*: la prima operazione consiste nella estrazione e pesatura del latte (figg.107-109);

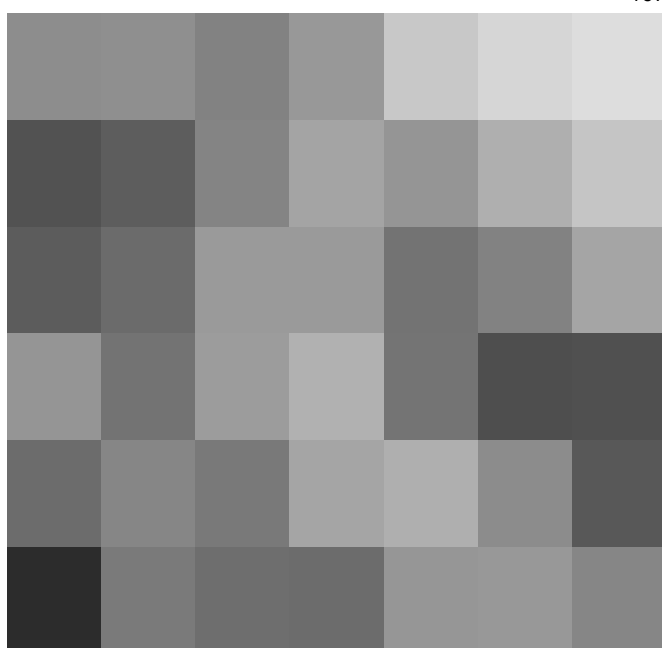
- *scrematura del latte*: la seconda a operazione per l'ottenimento della caseina tessile è la scrematura del latte operata mediante centrifughe scrematrici ermetiche antischiama, le quali, dalla prima costruita nel 1877 da Gustaf De Laval (Orsa, 1845 - Stoccolma, 1913)⁴⁹, sono state perfezionate al punto che, usando latte molto fresco, è possibile ottenere latte magro con meno del 0,05% di sostanze grasse, con conseguente aumento di pregio della caseina, poiché questo è tanto maggiore quanto minore è la quantità di grassi in essi contenuti (fig.110);



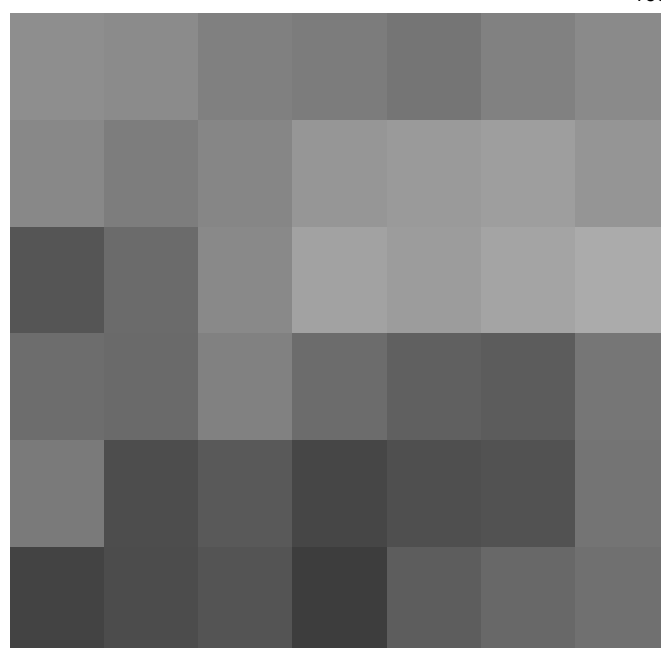
107



108

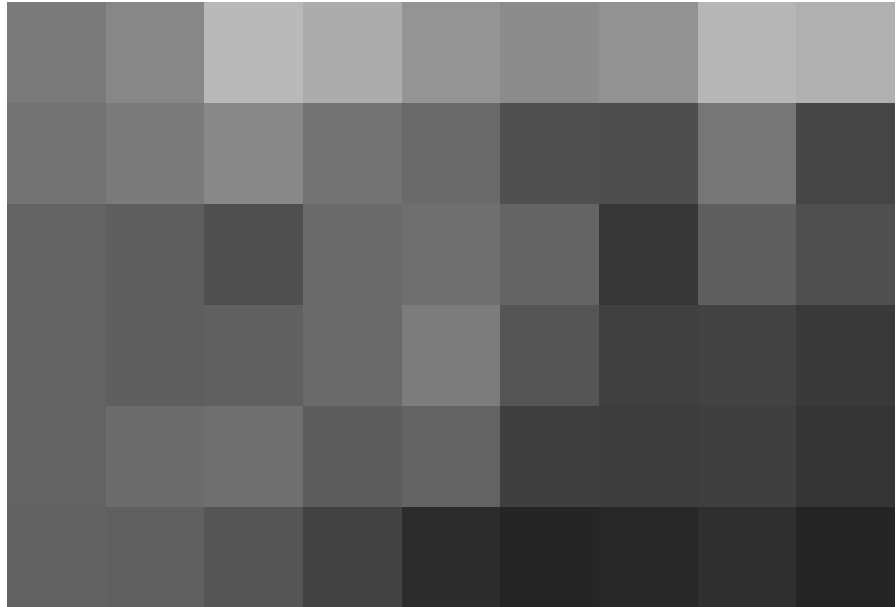


109

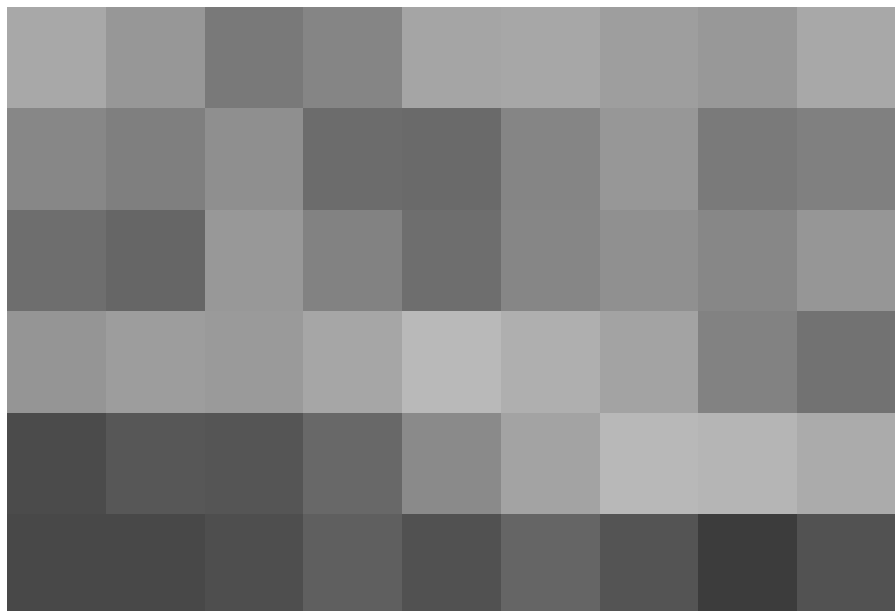


110

- *refrigerazione e pastorizzazione*: il latte viene, dunque, separato in crema e latte magro dal processo di scrematura. Il latte scremato, data la minor quantità di grassi, è quello impiegato nel successivo processo di acidificazione per la produzione della caseina tessile, mentre la crema viene refrigerata e pastorizzata e quindi caricata nella *zangola impastatrice* (fig.111) e ridotta in forme di burro dalla macchina panettatrice;
- *acidificazione*: la precipitazione della caseina del latte scremato è ottenuta in condizioni ben definite di ambiente acido e di temperatura. Secondo le indicazioni di Ferretti, egli poté inizialmente preparare una caseina fortemente demineralizzata, con ceneri inferiori al 2%, usando una quantità di acido solforico superiore del 56% con un pH uguale a 3. Il chimico notò che, aumentando la quantità di acido otteneva una fibra più morbida, ma meno resistente; viceversa, diminuendo l'acido solforico e superando il pH 3, otteneva una fibra meno morbida, ma più resistente. Egli concluse che la caseina tessile qualitativamente più conveniente al suo scopo era quella ottenuta con 250cc (il "cc" indica il centimetro cubo) di acido solforico a 66Bé (il Bé indica la *scala di Baumé*, unità di misura della densità di una soluzione acquosa) per ogni 100 litri di latte magro. Benché la caseina tessile possa essere ottenuta anche con altri acidi, l'acido solforico risulta essere il più conveniente, sia usato come esce dalle camere di piombo a 50-52Bé, sia concentrato a 66Bé, purché in questo caso lo si riporti, al momento dell'uso, diluendolo ad una acidità del 10% circa⁵⁰ (fig.112).
- *coagulazione*: il latte magro, ottenuto dal processo di scrematura, attraverso l'apparecchio raffreddante a piastre, viene immesso nella *caldaia di coagulo*, un grande recipiente di rame stagnato di oltre due metri di diametro, munito di doppio fondo per il riscal-



111



112

damento a vapore e di agitatori. Per ogni 3500 litri di latte magro si aggiungono, in più volte, circa 15 litri di acido solforico, 50-52Bé, portati a sei volte il volume con aggiunta d'acqua.

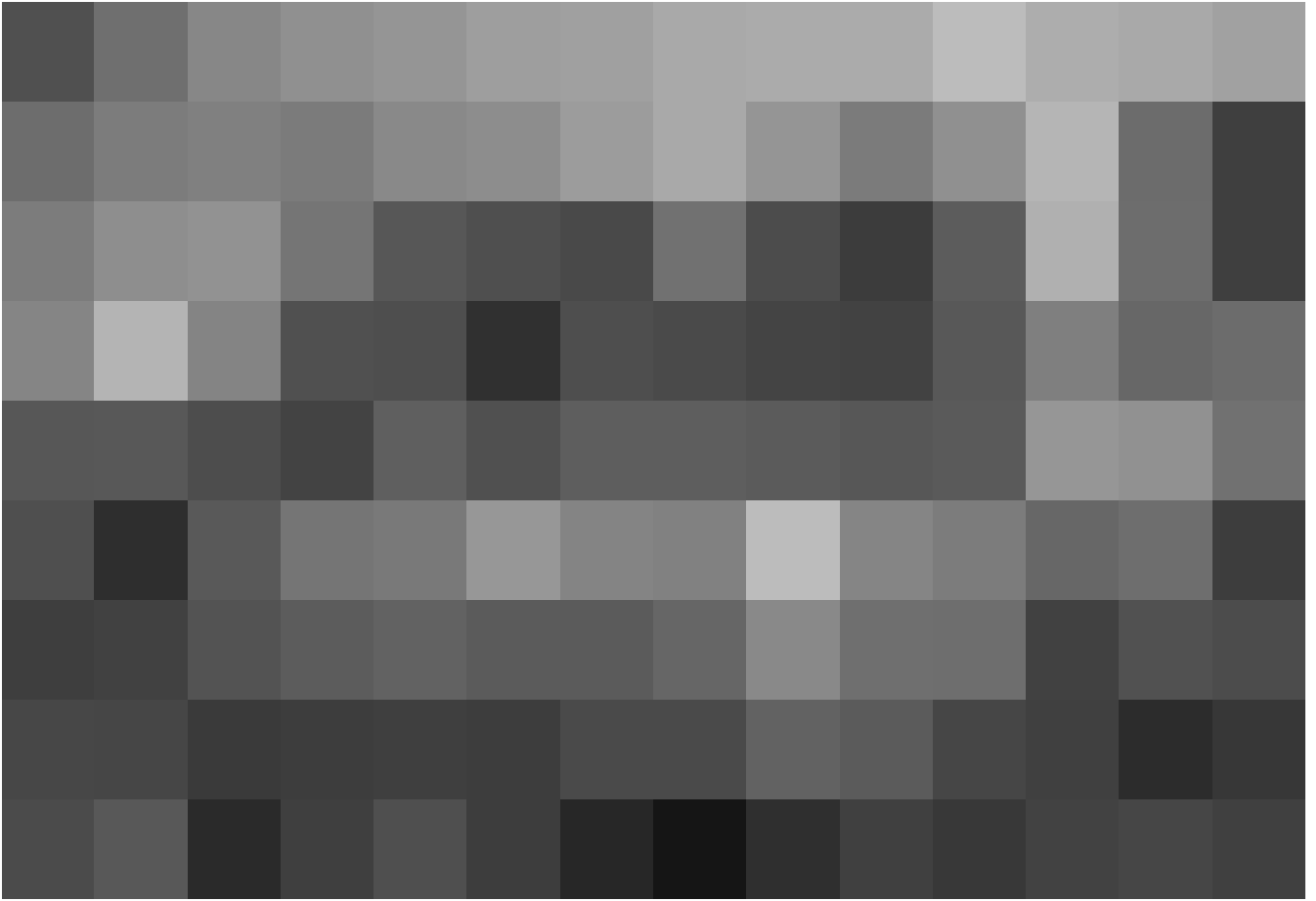
- *neutralizzazione del siero*: dopo aver mescolato, la massa liquida viene riscaldata fino a raggiungere la temperatura di 61°C, e, trascorsa mezz'ora, la caseina decanta e caricata dal montacaseina nel *filtro-pressa* (figg.113-114) che elimina la totalità del siero. Esso, opportunamente neutralizzato, viene impiegato per estrarne il lattosio, in esso contenuto, o per l'alimentazione del bestiame;

111. Le *zangole impastatrici* per la produzione del burro, *ivi*, pag.88.

112. Vasche di acidificazione contenente acido solforico, *ivi*, pag.100.

113. Il latte magro viene immesso in apposite caldaie di coagulo, costituite da un grande recipiente di rame stagnato. Nell'immagine sono interposte tra le macchine *filtro-pressa*, in primo piano e le vasche di acidificazione, sul fondo, *ivi*, pag.89.

114. Le macchine filtro-pressa, utilizzate per eliminare la totalità del siero. Il siero viene neutralizzato e impiegato per estrarne il lattosio o come alimento per il bestiame.

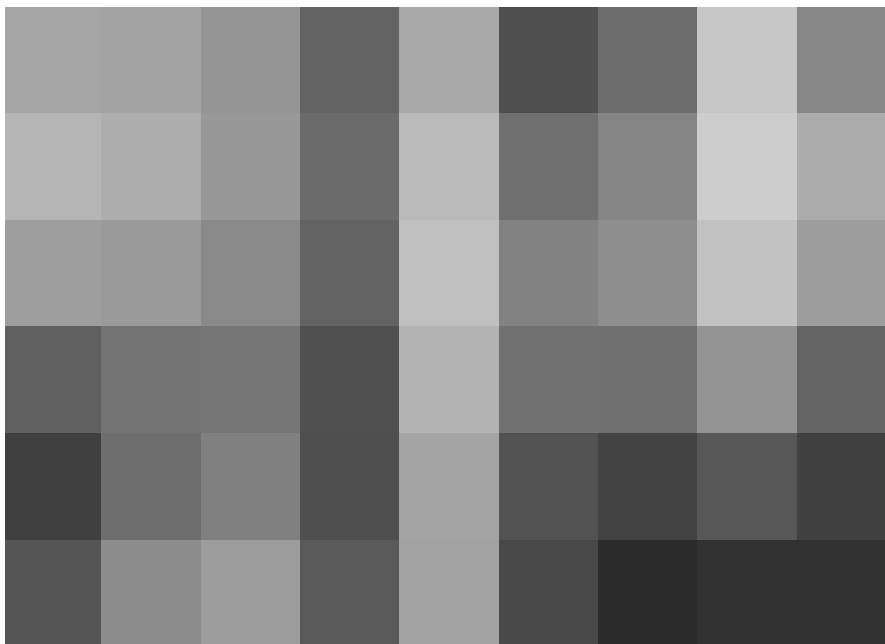


113

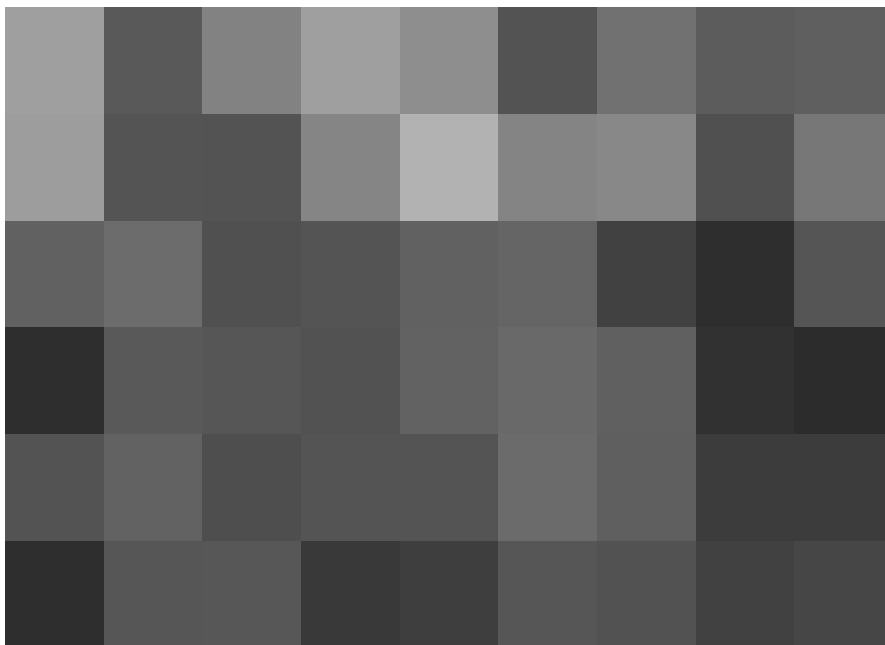


114

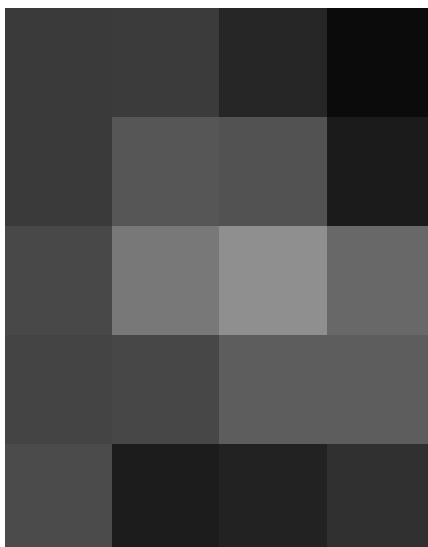
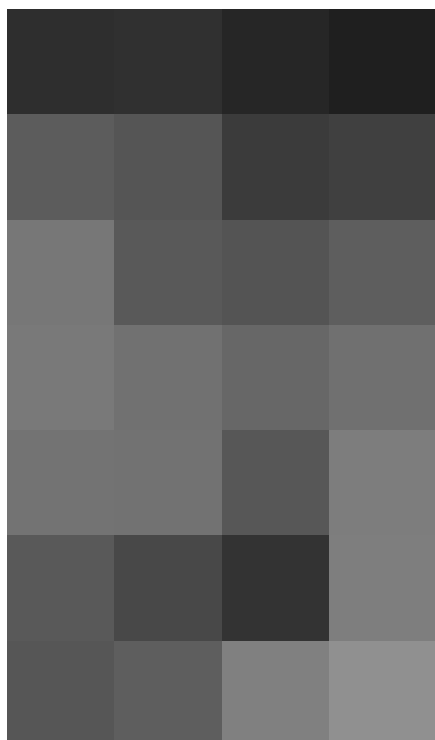
- *lavaggio ed essiccazione*: la caseina (sotto forma di cagliata) viene rinviata alla caldaia di coagulo a mezzo del *frangielevatore* per il lavaggio e poi uniformata nel *frangicalibratore* pronta per essere essiccata fino a limitarne l'umidità all'8-10% circa (figg.115-116);
- *confezionamento della caseina*: ottenuta la caseina tessile, essa viene confezionata in sacchi dai centri di produzione e inviata allo stabilimento in cui si produce il Lanital (fig.117). La caseina viene sottoposta a un controllo chimico analitico per valutarne la qualità. Qualora la caseina provenisse da diversi centri di produzione (lo stabilimento viene individuato con una apposita indicazione scritta recante la provenienza), si procede nel mescolare le diverse caseine in appositi tini (fig.118), prelevando quantitativi eguali di caseina di diversa provenienza;
- *macinazione*: la caseina miscelata viene, quindi, macinata presso mulini per la caseina modernissimi a cilindri, minuti di vagli (fig.119), in modo da essere ridotta in polvere fine, tale da poter passare attraverso un setaccio di cento maglie per centimetro quadro;



115

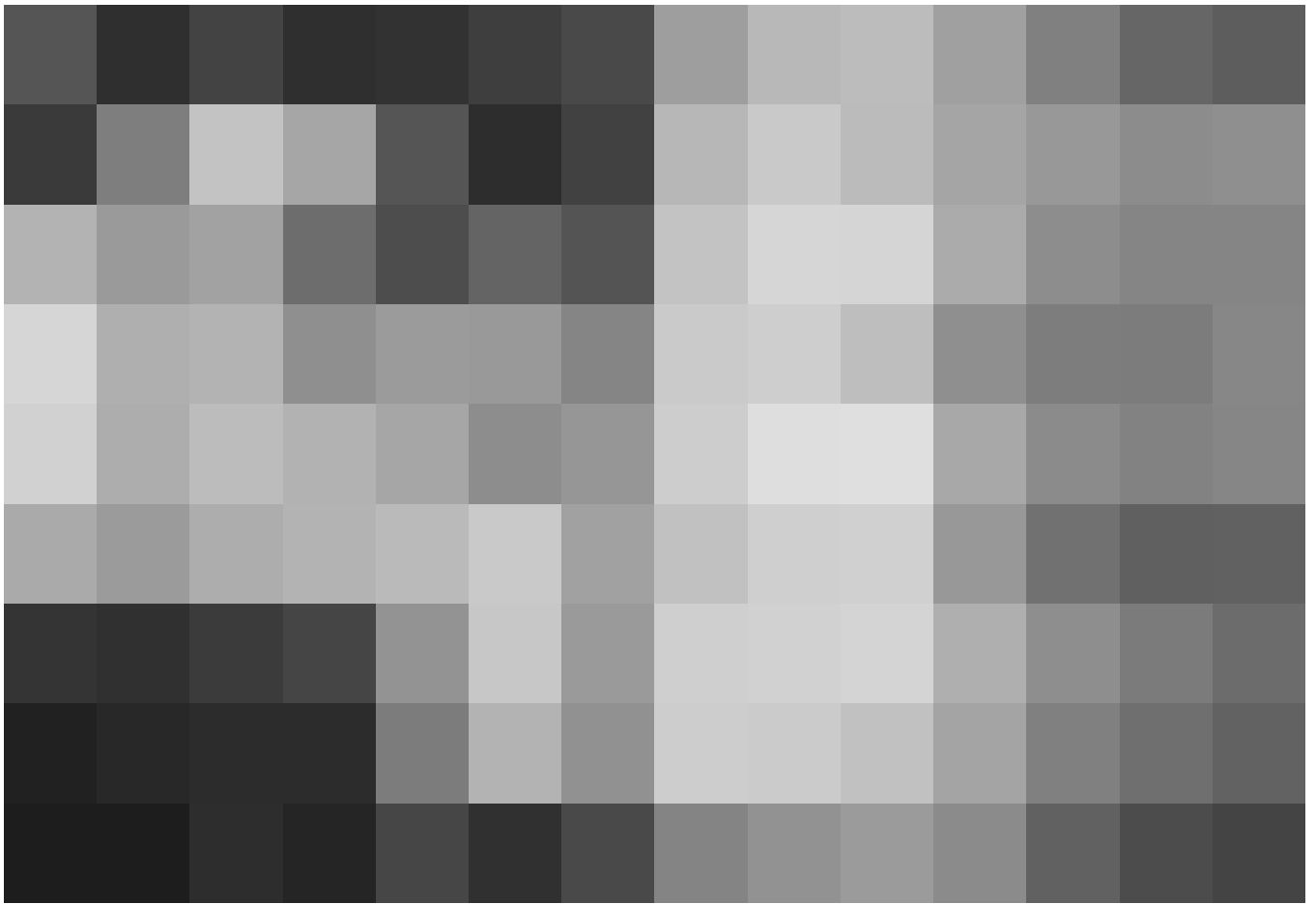


116

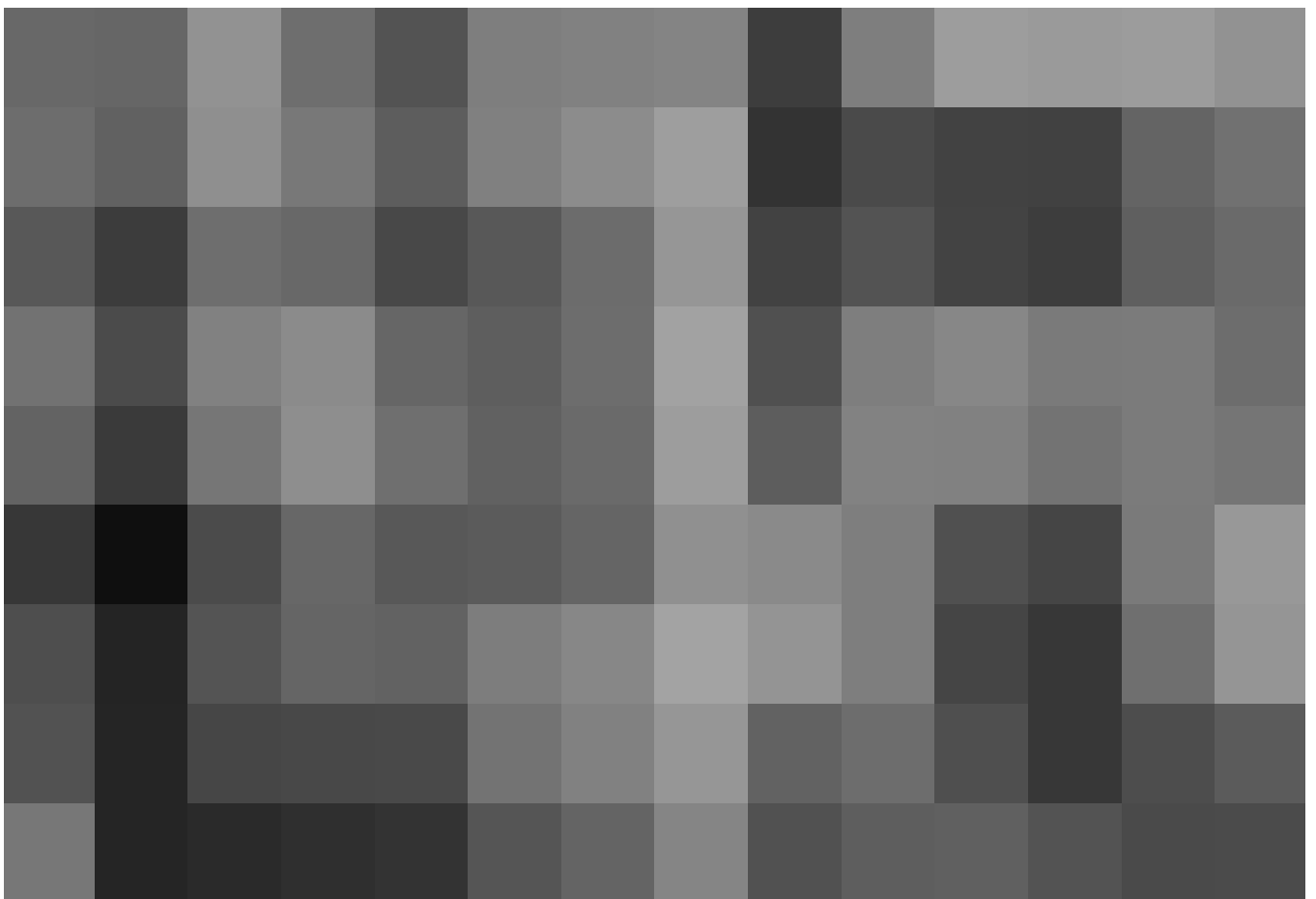


117

- 115. Operazione di essiccazione della caseina, *ivi*, pag.89.
- 116. Operazione di essiccazione della caseina nell'apposita macchina, *ivi*, pag.90.
- 117. La caseina scaricata dall'essiccatoio viene confezionata in sacchi recanti l'indicazione di provenienza della caseina, *ibidem*.
- 118. Processo di miscelazione di caseine di provenienze diverse in appositi tini, *ivi*, pag.91.
- 119. Processo di macinazione e vagliatura della caseina in appositi mulini a cilindri, muniti di vagli, *ivi*, pag.92.

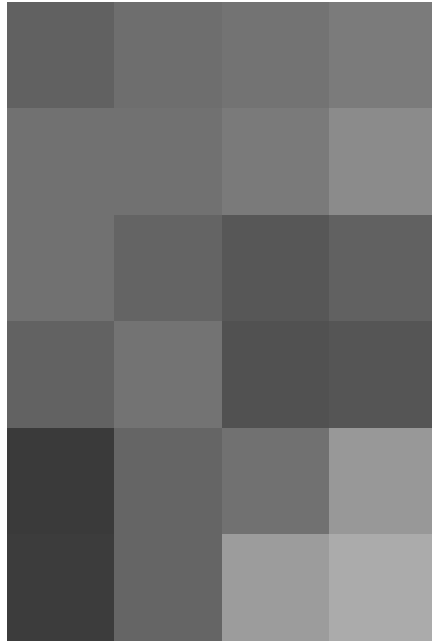


118

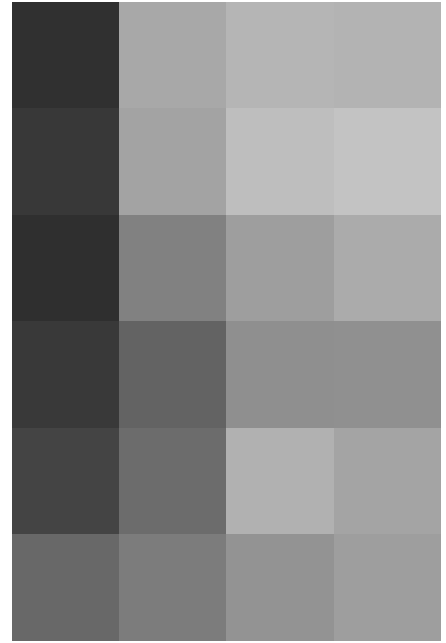


119

- **mescolatori:** la caseina macinata e miscelata è versata in grandi recipienti muniti di agitatori (fig.120), nei quali è immessa acqua in quantità corrispondente a due volte e mezza circa il peso della caseina la quale, dopo che si è gonfiata, viene sciolta in una soluzione di soda caustica presente in appositi serbatoi (fig.121). Questa con la caseina fornisce caseinato sodico, solubile in acqua. In relazione all'umidità e acidità della caseina adoperata e al titolo della soluzione di idrato sodico, si aggiunge la quantità di soda necessaria per trasformare tutta la caseina in caseinato, e per dare in più alla soluzione una alcalinità libera di circa 0,3%. Quando la caseina si è completamente disciolta, s'immette, sempre agitando, l'opacizzante in quantità determinata dal grado di opacità desiderato. In seguito, con l'aggiunta di acqua, il composto è riportato ad un determinato volume;

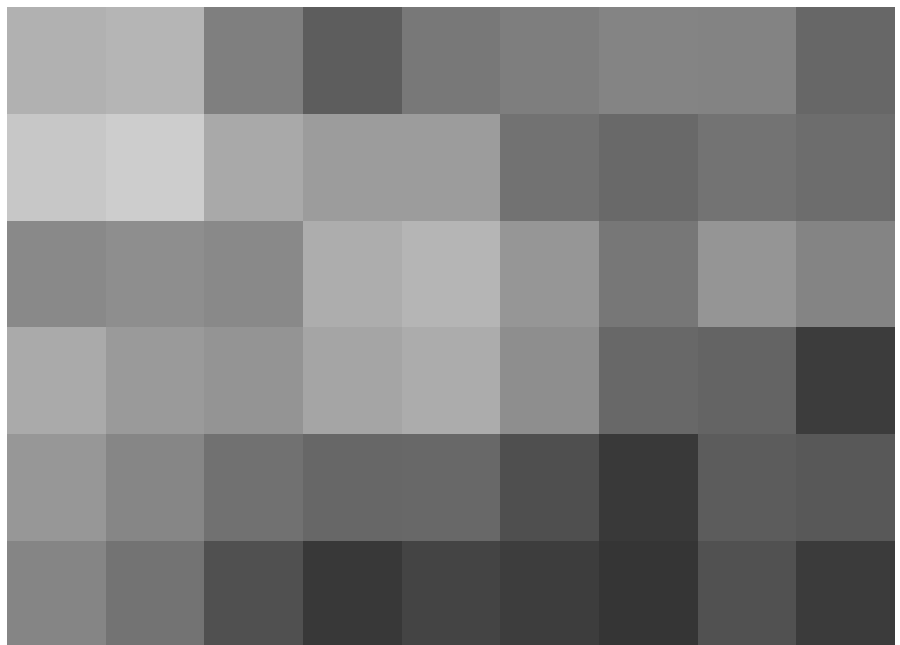


120



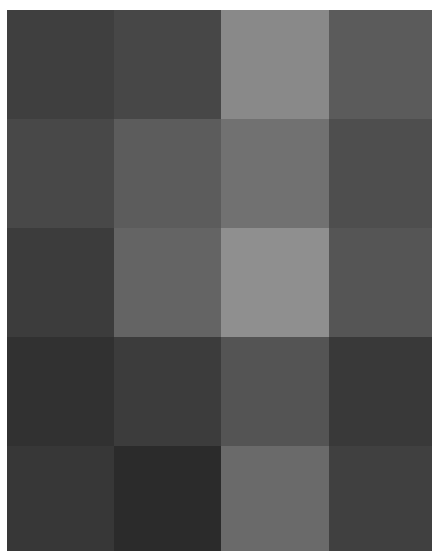
121

- **maturazione e filtrazione:** la soluzione di caseina ottenuta è immessa in appositi serbatoi collocati in un locale specifico (fig.122), detto impropriamente di maturazione, in quanto nel procedimento del Lanital non esiste, come nel caso della viscosa, un vero e proprio processo di maturazione. In realtà, quella che si compie nei locali di maturazione, mantenuti a temperatura costante (la temperatura incide sulla velocità di coagulazione della soluzione viscosa), è un'operazione di filtrazione e depurazione delle soluzioni. Queste, infatti, sono accuratamente filtrate attraverso filtri-presse e disareate. Durante la fase di maturazione di 2-3 ore, le macromolecole di proteina diventano lineari acquistando l'attitudine a essere filate;



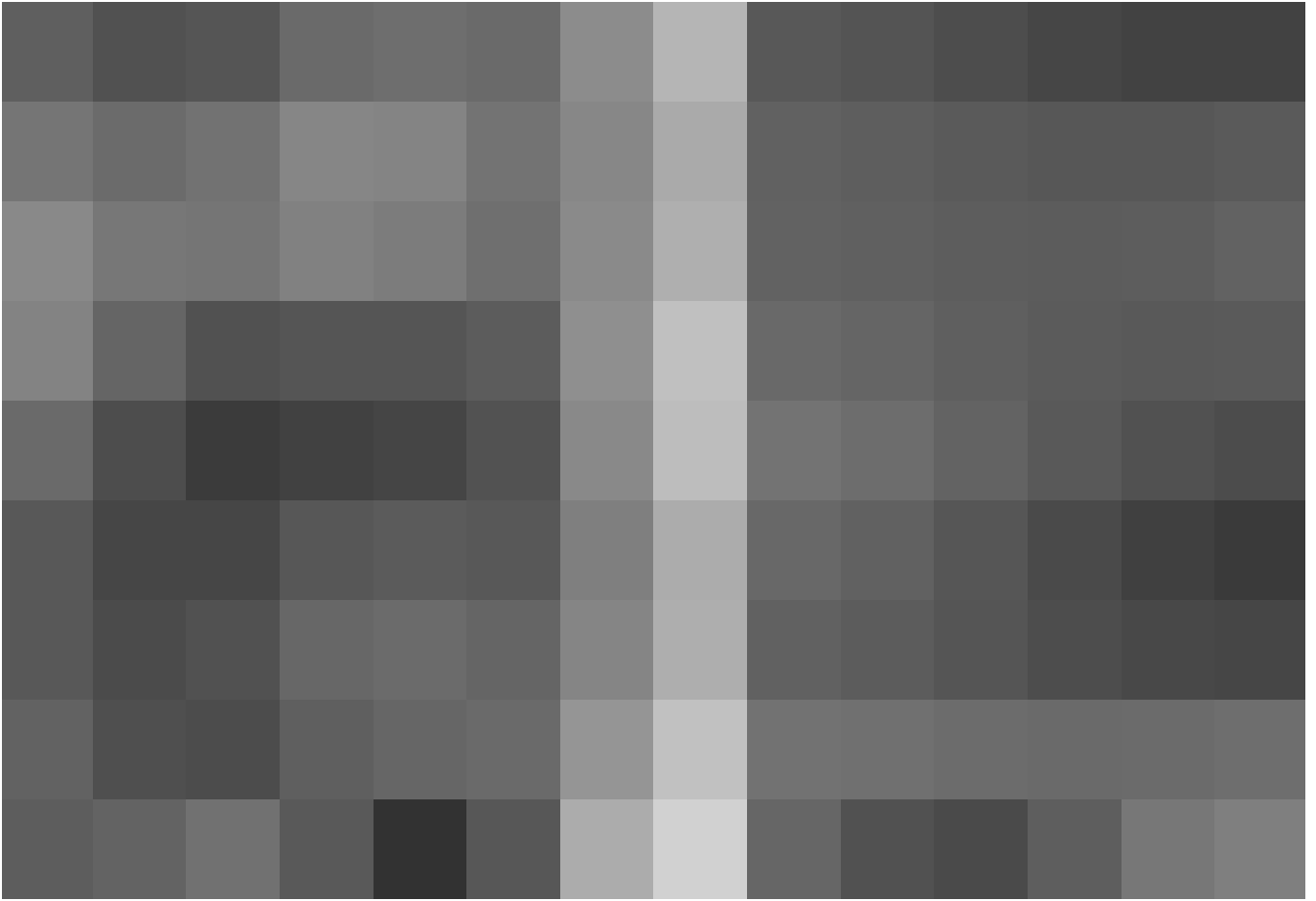
122

- **filatura:** quando la viscosità delle soluzioni ha raggiunto il grado desiderato, le soluzioni stesse sono inviate, per mezzo di pompe (fig.123), alla macchine di filatura ed estrusa da filiere (solitamente erano in vetro con fori capillari di

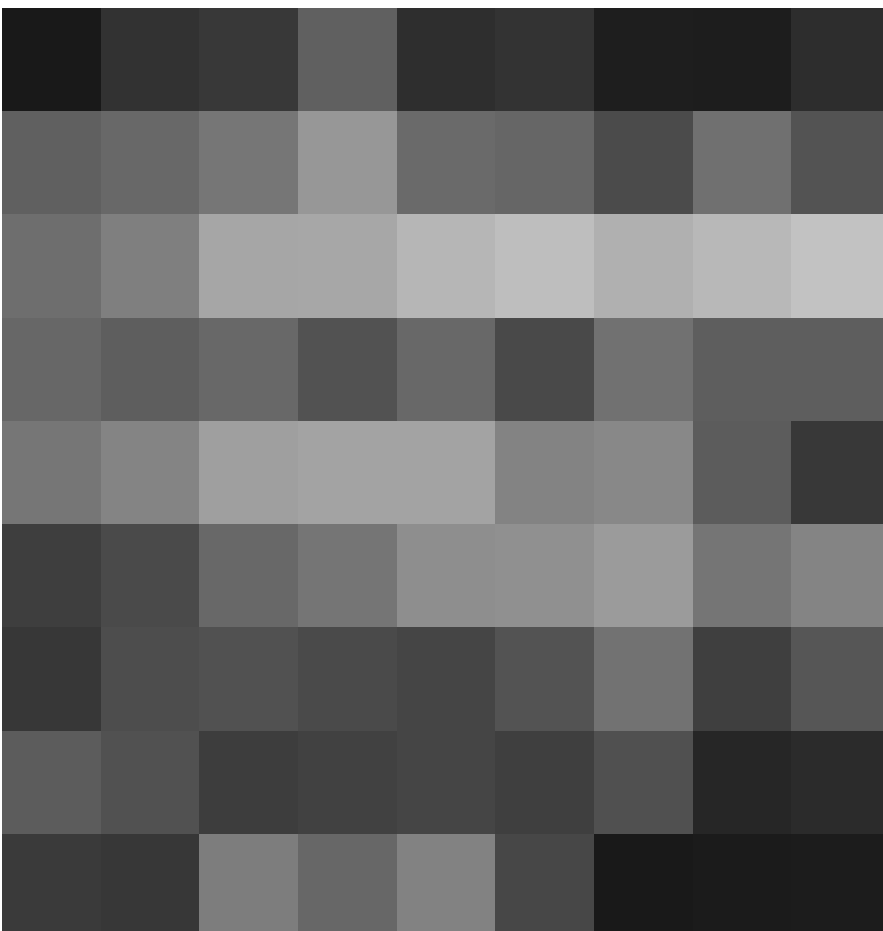


123

- 120. Testata dei mescolatori muniti di agitatori, *ivi*, pag.95.
- 121. Grandi serbatoi contenenti i solventi della caseina, *ibidem*.
- 122. Serbatoi di maturazione della soluzione di caseina *ivi*, pag.98.
- 123. Pompe di filtrazione, *ivi*, pag.99.
- 124. Produzione delle bave di Lanital attraverso filiere in bagno coagulante, *ivi*, pag.106.
- 125. Produzione delle bave di Lanital attraverso filiere in bagno coagulante, *ivi*, pag.107.

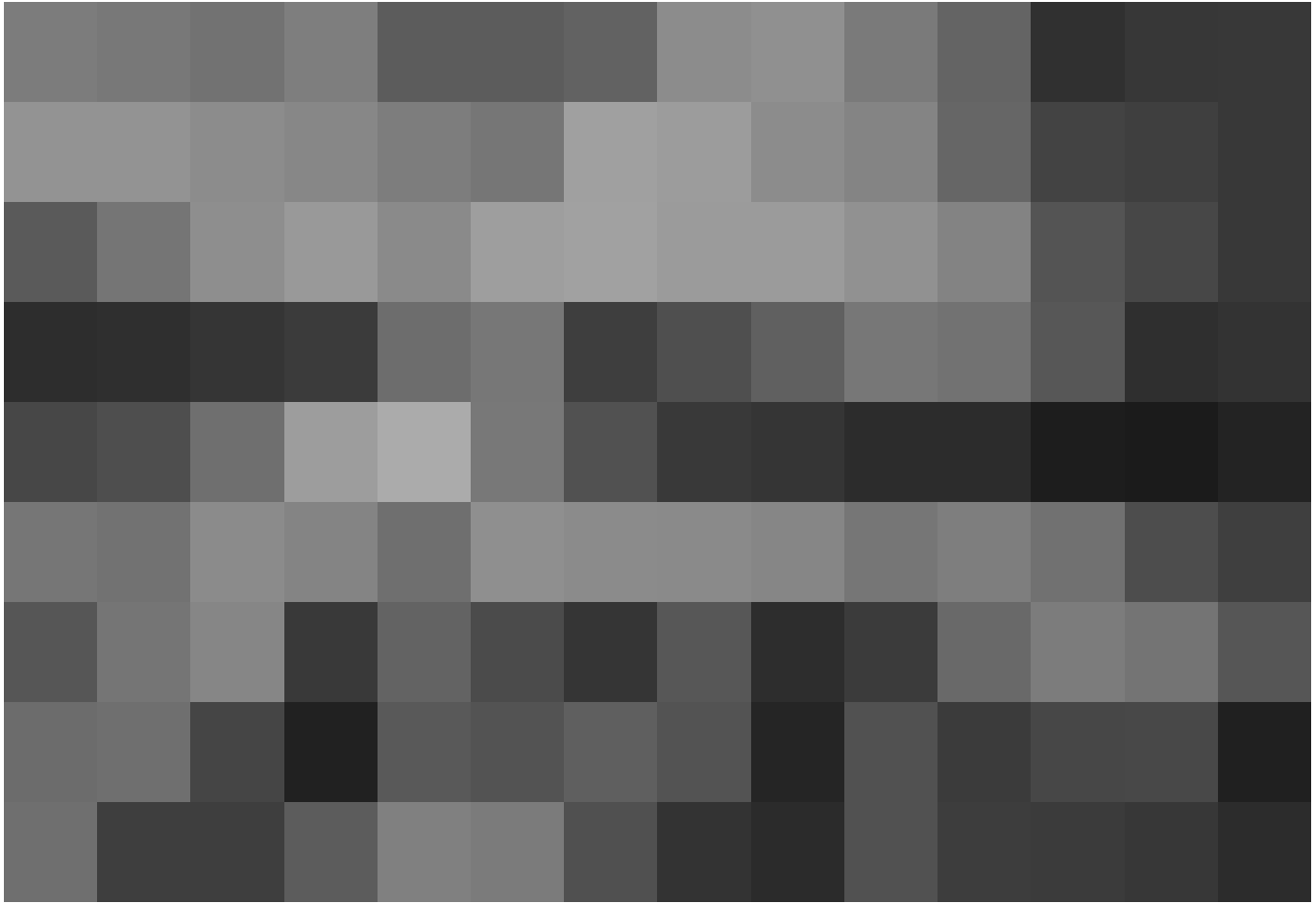


124



125

80-100 microns di diametro) varianti, a seconda delle necessità, dagli 800 ai 1500 fori. Il *bagno coagulante* o di *filatura* è principalmente costituito da soluzioni di acido solforico e bisolfato sodico. Quest'ultimo si genera automaticamente, in quanto il caseinato sodico, per azione dell'acido solforico, si scompone in caseina insolubile, che produce tante *bave*, quanti sono i fori delle filiere e, in soda caustica, la quale, in presenza dell'acido solforico, si trasforma istantaneamente in solfato sodico. Le filiere sono immerse in questo bagno coagulante per non più di 12-13cm, e poiché la velocità del filatoio supera i sessanta metri al minuto, è chiaro che il processo di coagulazione si effettua in una frazione di secondo (figg.124-125). Le bave coagulate, sono riunite a formare un nastro continuo che viene liberato dalle soluzioni di acido e bisolfato, facendolo passare contro corrente in soluzioni saline (fig.126).



126

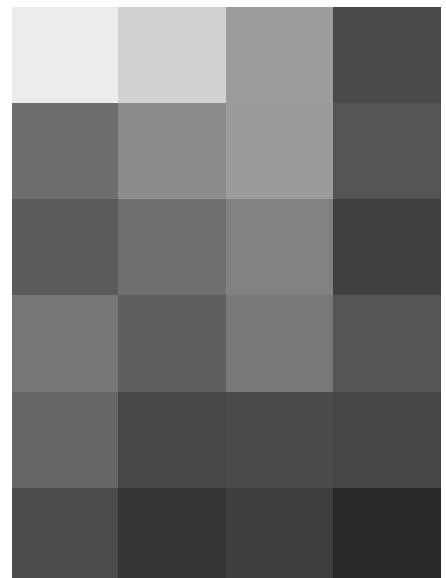
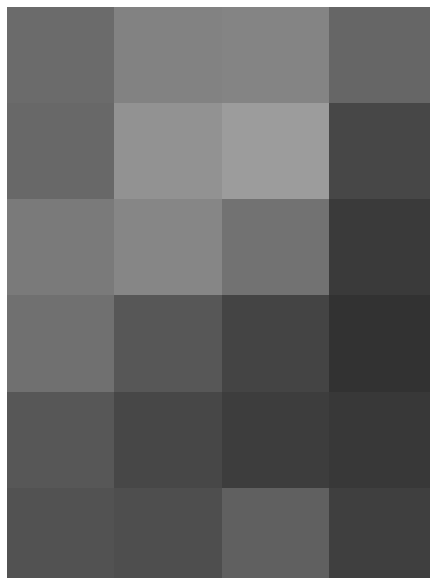
- *taglio*: poiché in nastro della viscosa si svolge in modo continuo, a mano a mano che esso esce dalla soluzione salina viene tagliato meccanicamente nella lunghezza desiderata (105mm per il pettinato, 65mm per il cardato) e convogliato su nastri trasportatori alle fasi successive di trattamento di fissaggio (fig.127);
- *bagno di fissaggio*: il Lanital tagliato viene successivamente immerso in grandi autoclavi (fig.128), dove subisce ad alta temperatura un trattamento con una soluzione contenente formaldeide, solfato di zinco e glucosio come ammorbidente (bagno di fissaggio). La fibra che sino a questo momento risultava solubile in acqua, per

126. Vasche contenenti soluzioni saline, *ivi*, pag.102.

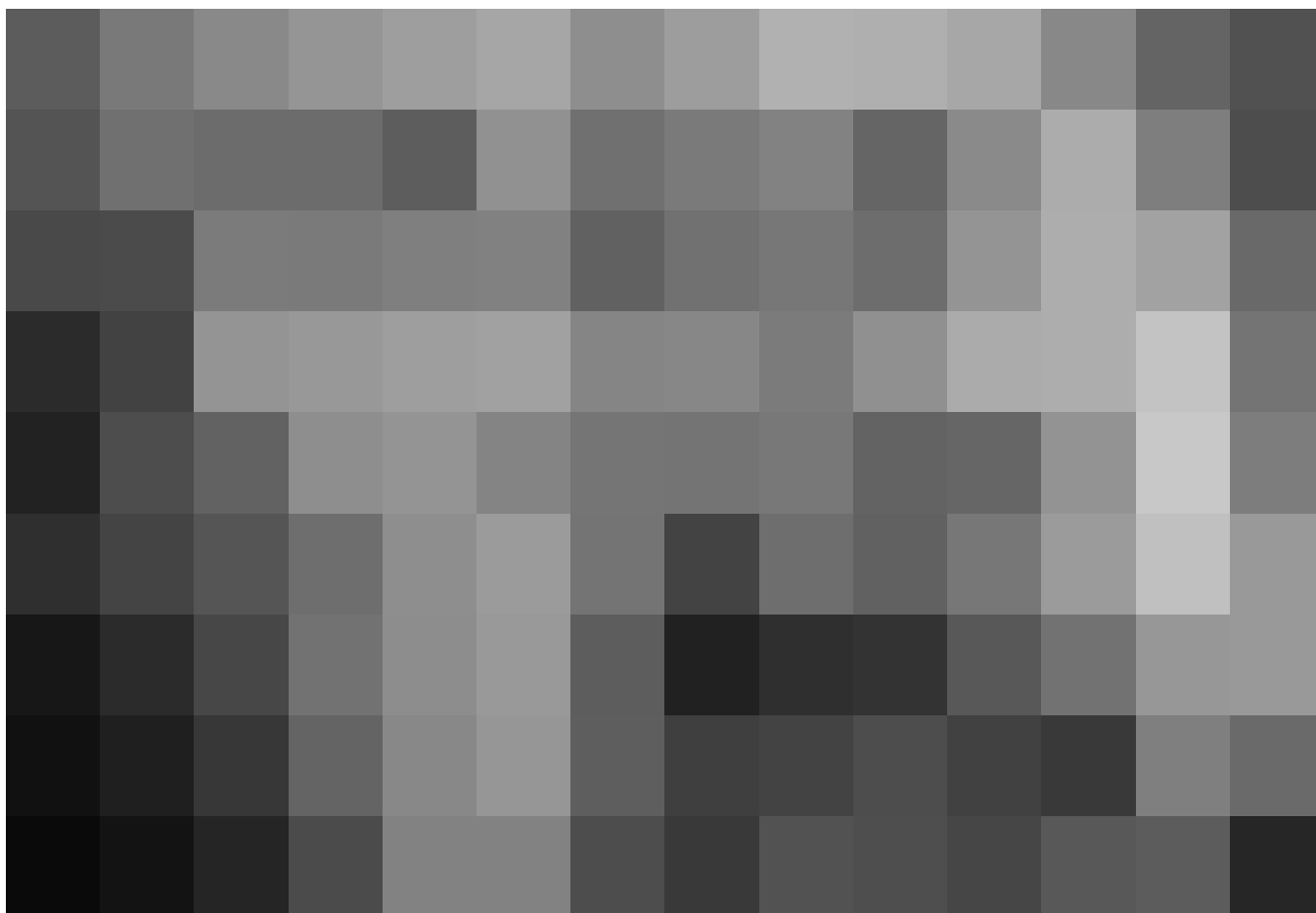
127. Operazione di taglio e trasporto a nastro del Lanital, *ivi*, pag.110.

128. Bagni di fissaggio in autoclave con soluzione contenente formaldeide, solfato di zinco e glucosio, *ivi*, pag.111.

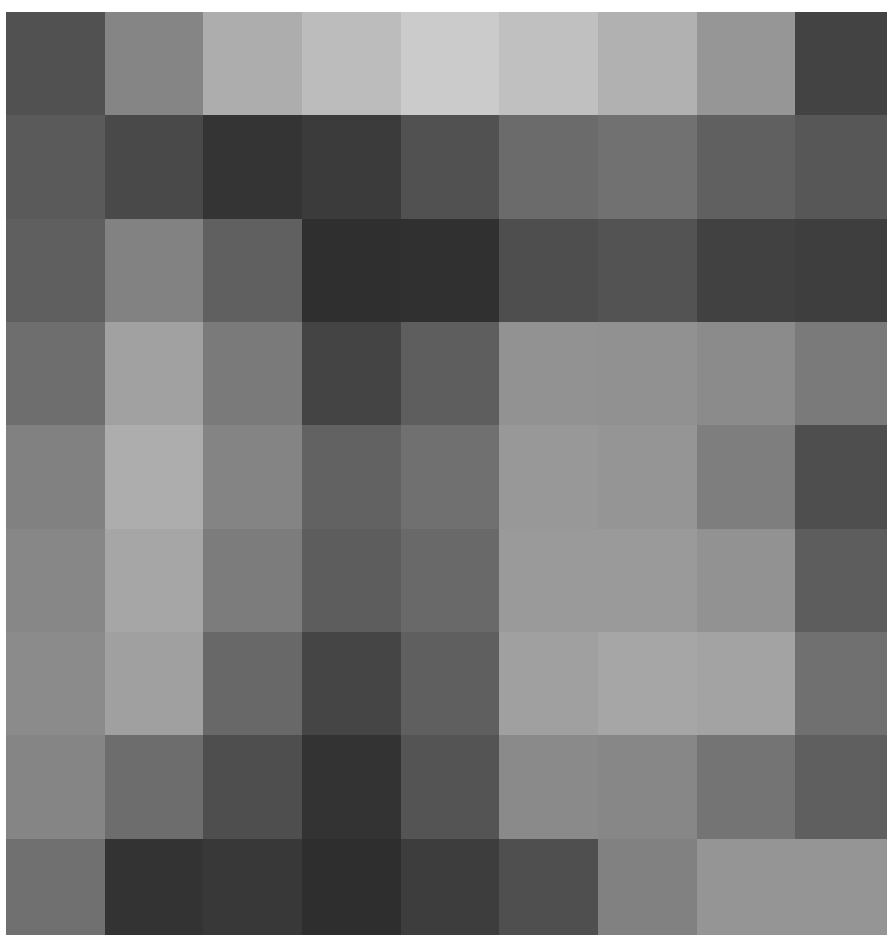
129. Serbatoi contenenti formaldeide, *ivi*, pag.112.



127



128



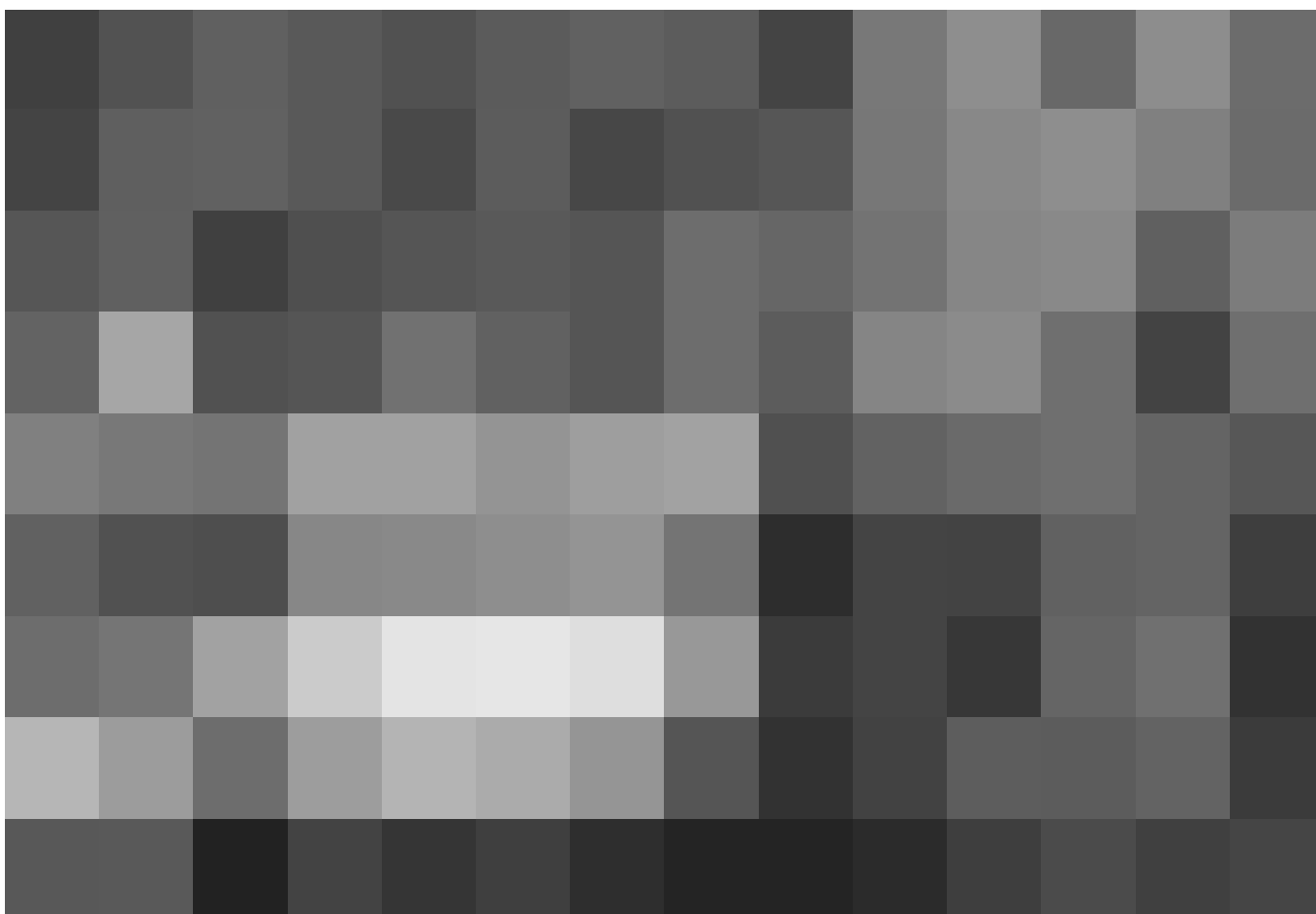
129

effetto dell'azione polimerizzante della formaldeide acquista le caratteristiche di tenacità, elasticità, resistenza all'acqua ed alla bollitura: le proprietà peculiari di una fibra tessile;

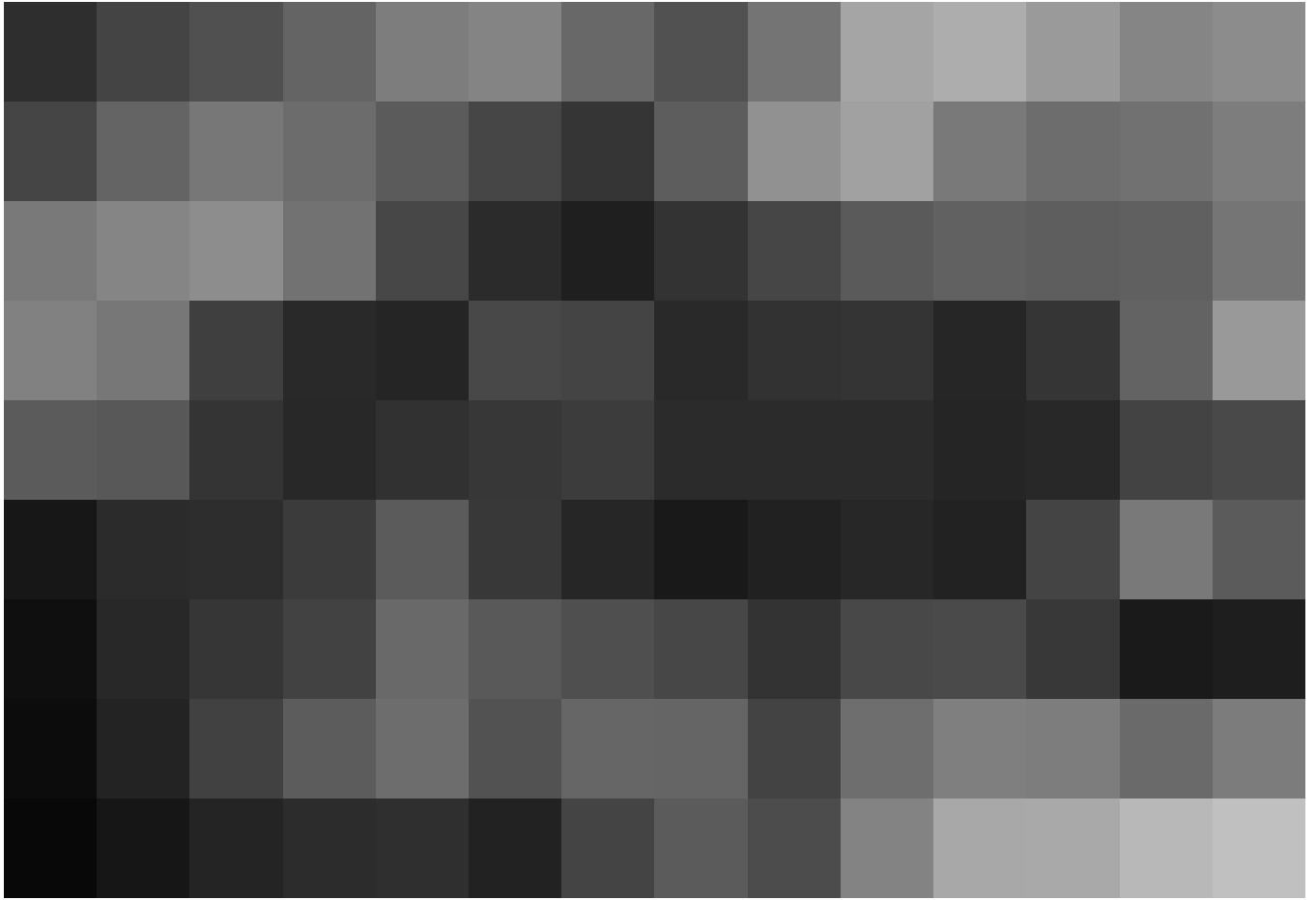
- *lavaggio*: la fase successiva consiste nel lavaggio della fibra nell'impianto di cristallizzazione (figg.130-131) e nel trattamento con soluzioni di fosfato, poscia essiccata ed, infine, 'aperta' per mezzo di una *carda-lupo*, che conferisce al Lanital la sensazione tattile di una fibra di lana naturale;
- *essiccazione e confezionamento*: la fase finale consiste nell'asciugatura della fibra di Lanital in un essiccatoio (fig.132) e nel trasporto automatico nella 'camera di ammasso' (fig.133) in cui il prodotto viene compresso e confezionato in sacchi che saranno inviati agli stabilimenti di filatura e tessitura (fig.134).



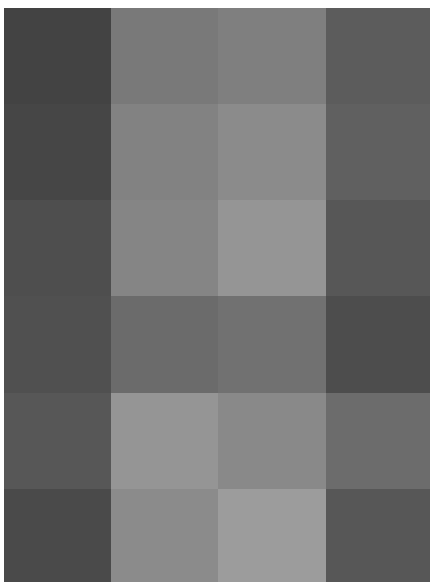
130



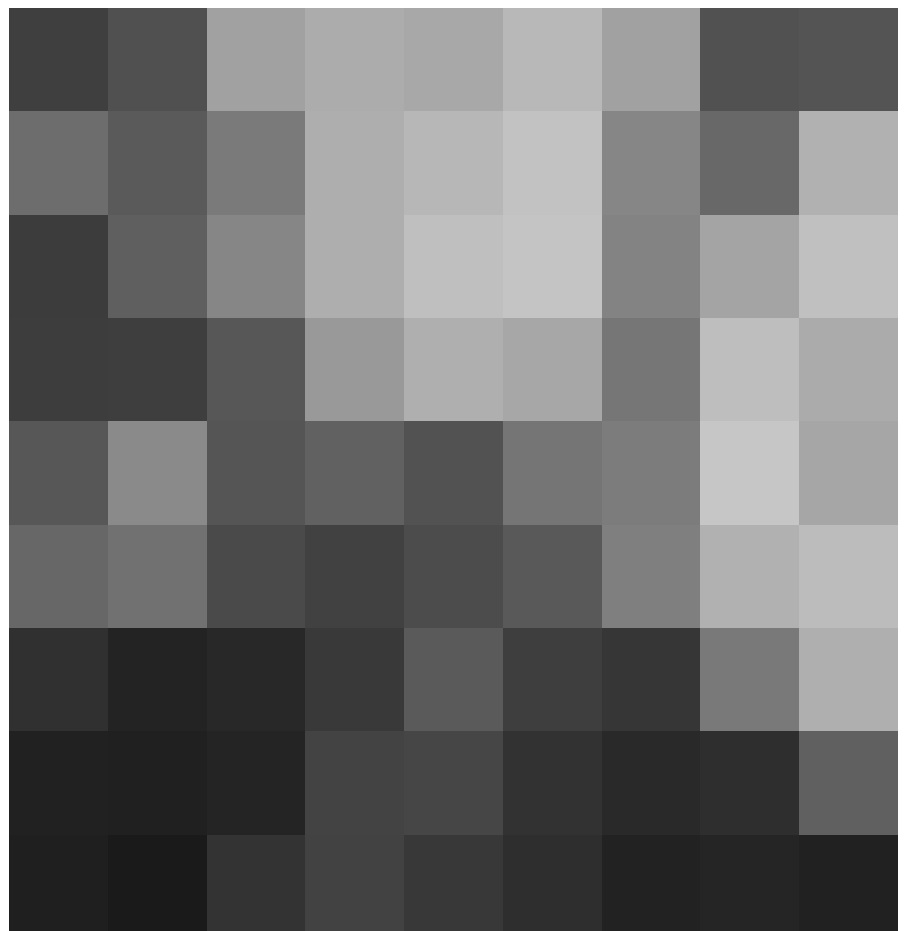
131



132



134



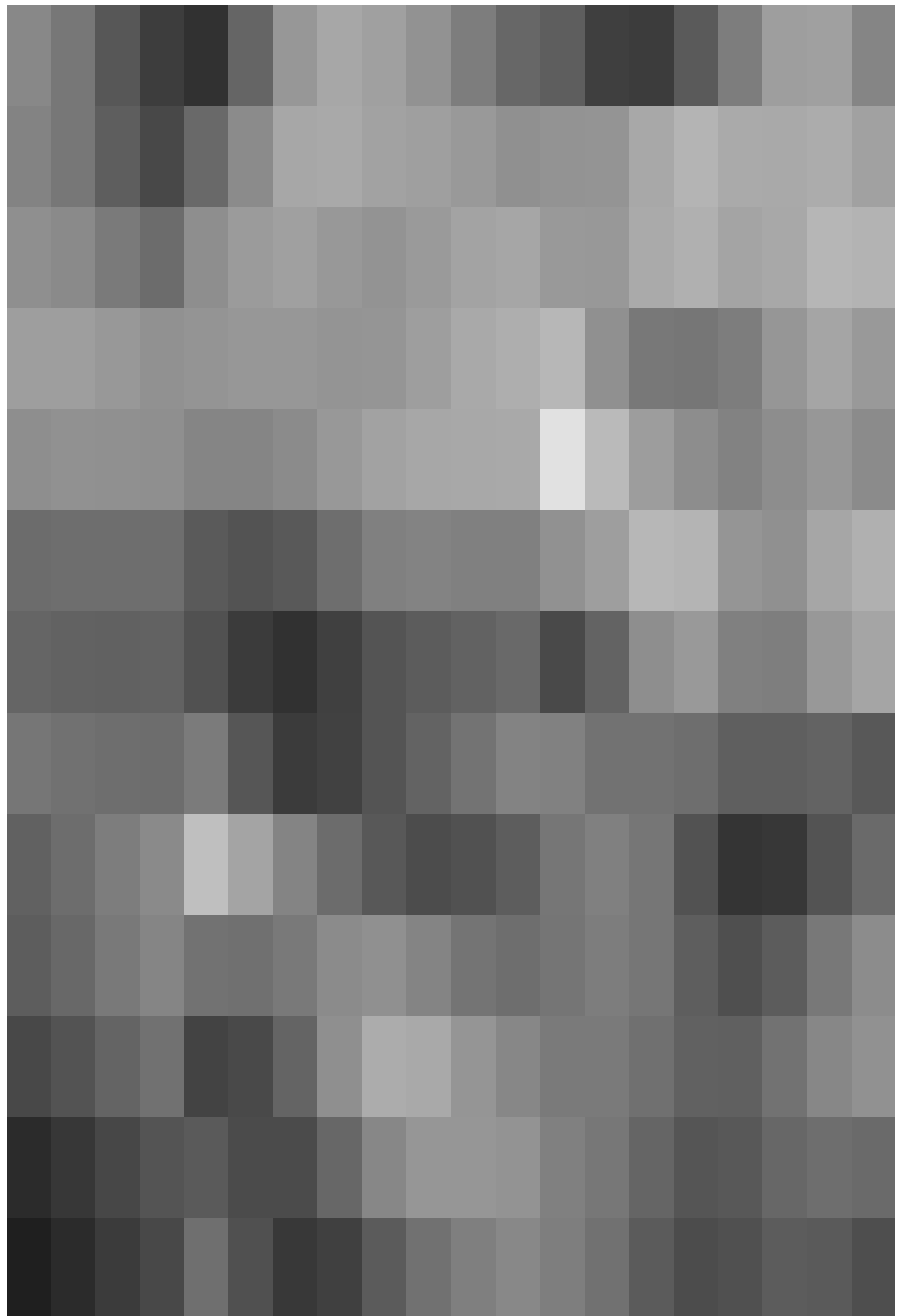
133

- 130. Impianto di cristallizzazione dei bagni di Lanital, *ivi*, pag.113.
- 131. Operazione di lavaggio del Lanital, *ibidem*.
- 132. Operazione di essiccazione del Lanital, *ivi*, pag.115.
- 133. Camera di ammasso del Lanital prima del confezionamento in sacchi, *ivi*, pag.112.
- 134. Sacchi confezionati di Lanital, *ibidem*.

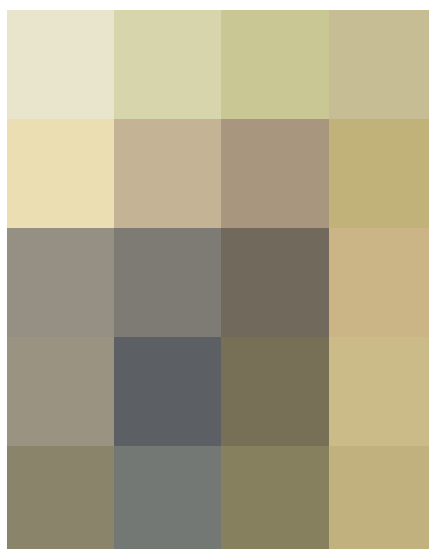
Secondo alcuni fonti storiche, «*il latte magro rende 3,1kg di caseina tessile ogni ettolitro, su per già quanto darebbe di caseina lattica, mentre 100kg di caseina tessile danno 105kg di lanital*»⁵¹.

Con in procedimento precedentemente descritto si ottiene il Lanital di color bianco-giallastro, che può essere opportunamente sbiancato o subire il processo di tintura (fig.135). Esiste, inoltre, una variante del Lanital identificato con il nome di *Lanital cromaldeide*, prodotto con il medesimo procedimento, con l'unica variazione nella fase di fissaggio con formaldeide nel quale sono aggiunti sali di cromo che si fissano alla fibra sotto forma di ossido di cromo, con percentuale del 3-5% con lo scopo di migliorare la resistenza meccanica della fibra. L'unico inconveniente del Lanital cromaldeide è la tinta verde azzurrognola che caratterizza la fibra.

Dopo alcuni anni di produzione ingente del Lanital (sette milioni di kg annui nel 1941), furono apportate al processo produttivo alcune modifiche da cui derivò una nuova fibra di migliori qualità fisiche e chimiche, designata con il nome commerciale *Merinova*, prodotta sempre dalla SNIA Viscosa. La Merinova è prodotta anch'essa dalla caseina del latte, ma non è ottenuta per coagulo acido, bensì per via enzimatica o presamica. Importanti sono gli accorgimenti apportati per affinare la produzione, come l'indurimento della fibra con formaldeide in autoclave a cui si aggiunge, a maturazione avvenuta, il processo della *concia*, che consiste nel trattamento della fibra con sali di cromo (procedimento desunto dal Lanital cromaldeide) e di alluminio per avere un aumento della resistenza e una diminuzione dell'estendibilità. Inoltre, essendo la fibra stabilizzata, presenta minor potere assorbente per l'acqua a vantaggio del processo di tintura. Il Merinova, al pari del Lanital, era prodotto non in filo continuo, ma in fiocco, la cui bava, una volta tagliata ed essiccata veniva impiegata 'in mischia' con la lana e altre fibre (fig.137).



135

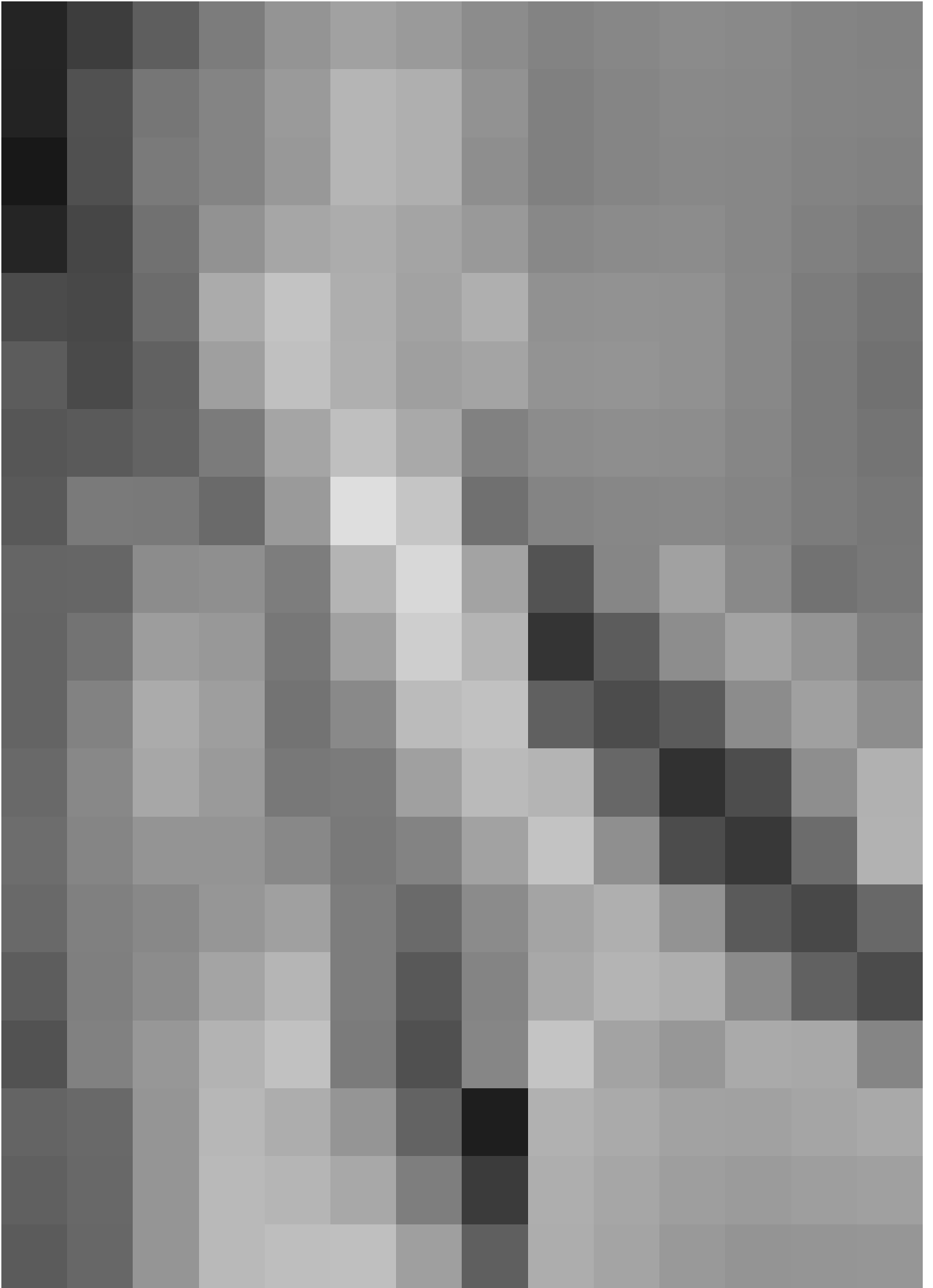


136

135. Il Lanital dopo l'operazione di cardatura assume la morfologia e la mano tessile della lana naturale, ivi, pag.116.

136. Locandina storica del Lanital, paragonato per le caratteristiche e mano tessile alla lana naturale.

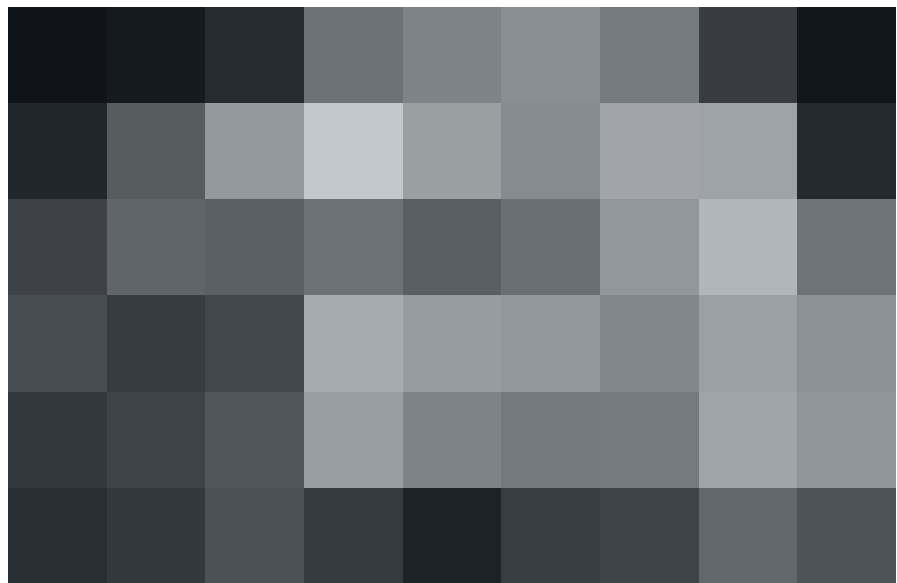
137. Caratteristico tessuto in Lanital, lana e pelo di coniglio, ivi, pag.125.



Proprietà microscopiche e macroscopiche delle fibre caseiniche del Lanital e della Merinova

Dall'indagine approfondita delle fibre proteiche animali e delle relative fibre artificiali di matrice caseinica è emerso come l'imponente macchina sperimentale italiana avviata all'inizio del Novecento abbia ottenuto straordinari risultati, elevando non solo la qualità dei sistemi di produzione industriale, ma soprattutto la grandiosa operosità, solerzia e sano dinamismo degli sperimentatori e inventori italiani. Tra questi va sicuramente annoverato l'importante ruolo che la chimica ha ricoperto nella invenzione, creazione e affinamento di nuovi processi per la produzione di innovativi materiali impiegati nell'industria tessile, nell'industria delle costruzioni e in altri settori, ponendosi come sontuosa capacità dello zelo sperimentale italiano invidiato in una società globale avvezza all'avanguardia e fin troppo legata a logiche prettamente tradizionaliste. Le "Inique sanzioni" del 1935 rappresentano lo strumento indotto dalla Società delle Nazioni per contrastare la parabola ascendente della fiorente società e civiltà italiana, pronta alla celebrazione di un nuovo 'Rinascimento Moderno' che investe ogni ramo materiale del sapere umano, dall'arte all'architettura, dal cinema alla pubblicità, dall'industria all'artigianato e alla agricoltura sino a giungere alla fondazione di nuove città, alla realizzazione di sontuose opere infrastrutturali e alla aspirazione di una società oltre il *limes* nazionale, con la fondazione di nuove città-colonie, luogo d'incontro e fattiva collaborazione di culture e tradizioni diverse. L'autarchia italiana è la risposta ai soprusi e alla prepotenza dei 'sabotatori del progresso', ponendosi come modello virtuoso in risposta ad una economia usitata e alienata (ne è esempio la risposta del *New Deal* alla grande depressione che aveva travolto gli Stati Uniti nel 1929) a favore di un modello di economia circolare, sostenibile e autosufficiente. Un modello che per assonanza e retorica è tanto decantata

dalla società odierna, rinnovata dai vessilli dei *mass media* denunciando cambiamenti climatici, pandemie e crisi economiche. E' bene, dunque, considerare il progresso raggiunto dalla società novecentesca come l'apoteosi di un modello economico essenziale, con innesti derivanti dalla nascente cultura della *Green Economy*, della sostenibilità ambientale e del progresso, secondo la riflessione di Pascal che «*non vi ha quesito più facile di un quesito risolto; il punto difficile sta pur sempre nel risolvere il problema*»⁵².



138

La prefazione del seguente paragrafo vuole rappresentare l'importanza del progresso tecnologico in un binomiale contesto storico e al tempo stesso contemporaneo ed esaltare, in questo caso, i risultati raggiunti dalle ricerche scientifiche e la rivoluzione che la chimica ha portato nel campo delle fibre tessili, in particolar modo nella disamina della proprietà macroscopiche e microscopiche delle fibre caseiniche del Lanital e del Merinova (fig.138). Per le caratteristiche finali, il Lanital è paragonabile alla lana naturale in quanto presenta nella composizione chimica diversi punti di contatto. Secondo riviste storiche di settore «*il lanital ha peso specifico di 1,27 contro 1,32 della lana e nella composizione centesimale al 49,25% di carbonio della lana si oppone il 53%; al 7,57% di idrogeno il 7,15%; al 23,56% di ossigeno il 23%; al 15,86%*

138. Immagine di un vetrino di Lanital per analisi fisiche e chimiche, in Bertarelli E., "Una rivoluzione nell'industria tessile. Precisazione sulla lana artificiale Italiana (Lanital)", in rivista "Sapere. Quindicinale di divulgazione" del 15 Marzo 1937, Hoepli, Milano, pag.153.

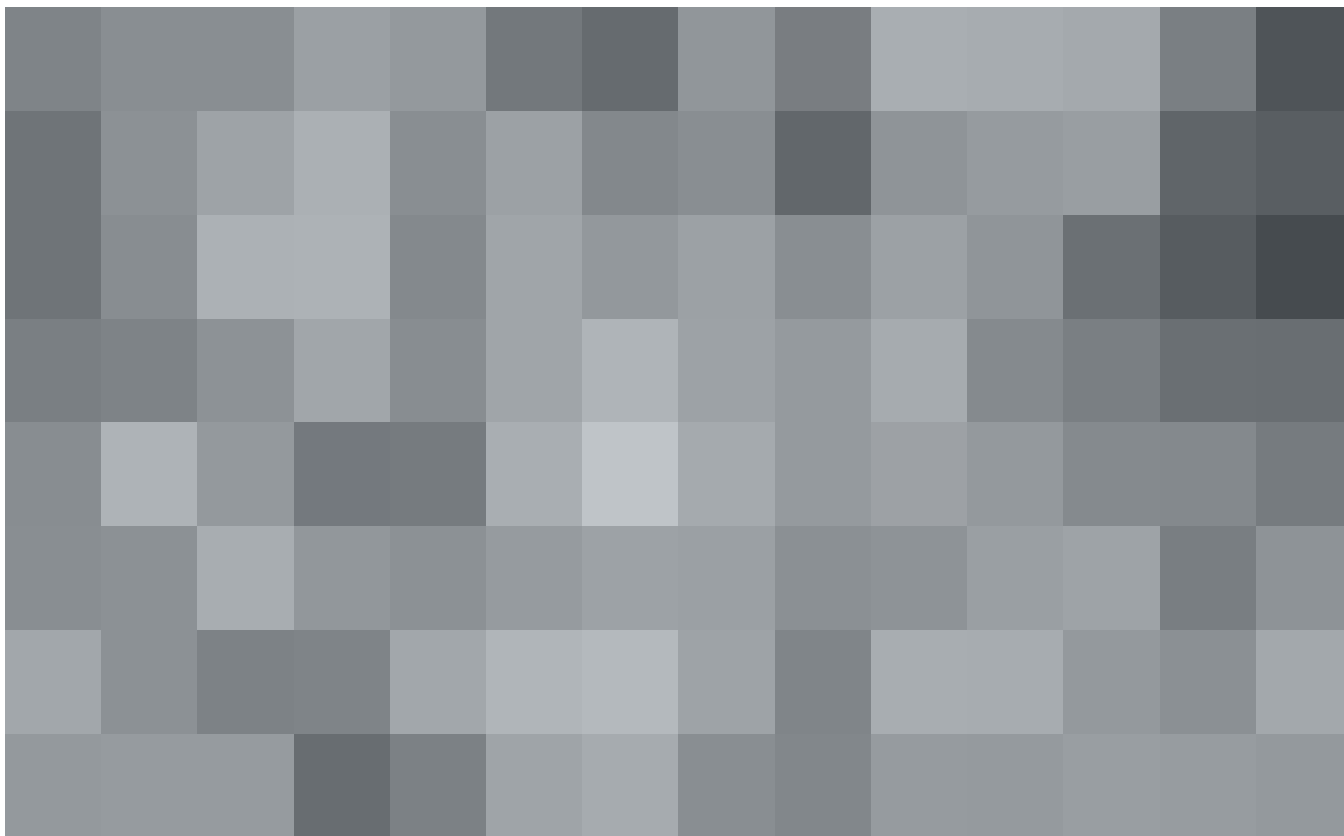


l'unica fibra artificiale che possiede la qualità di assorbire umidità sviluppando calore, si deve concludere ch'esso è pure l'unica fibra artificiale che possa efficacemente sostituire la lana, quando si voglia che gli indumenti mantengano calore e non se ne voglia il raffreddamento dovuto a traspirazione. [...] La sua tenacità a secco è pari ormai a quella della lana, ed anche l'elasticità ha raggiunto dati paragonabili a quelli della stessa. Mentre il comportamento alla tintura fu sul principio il punto debole del prodotto, ora può esser tinto puro o in mescolanza con lana in tutte le proporzioni, e con risultati di assoluta uniformità di tinta e ottima solidità dei colori. [...] La nuova fibra resiste bene alla bollitura prolungata e può quindi essere tinta anche con coloranti al cromo che richiedono nell'applicazione una bollitura di due ore. Da ultimo, ma non ultimo pregio, il Lanital non è attaccato dalle tarme»⁵³. Rispetto alla lana naturale, il Lanital presenta un quantitativo di zolfo decisamente inferiore, fattore che innalza notevolmente il potere coibente della fibra. La maggior percentuale di carbonio, invece, aumenta la resistenza e l'elasticità a secco ed a umido del Lanital.

139

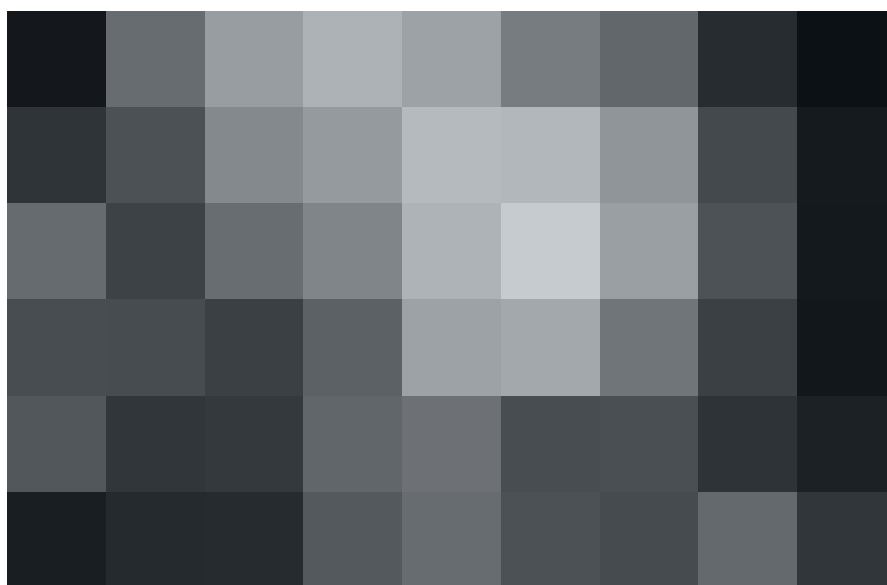
di azoto il 15,30%, al 3,66% di zolfo il 0,60%; allo 0% di fosforo il 0,95%. Da questi dati comparativi risulta che il lanital, tra tutte le fibre artificiali, possiede, come quelle di origine animale, una notevole percentuale di azoto: oltre il 15%. Esso perciò ha le stesse proprietà della lana: è fibra calda, essendo dotata di altissimo grado di coibenza; come la lana e la seta, si tinge perfettamente con coloranti acidi senza ricorso alla mordenzatura; resiste bene, all'azione degli acidi e perciò al processo di carbonizzazione; brucia con difficoltà e lentezza, formando grumi carboniosi e spugnosi, ed emanando nel bruciare il caratteristico odore di corna bruciate. [...] Se, poi, si aggiunge che il lanital è

La qualità indiscussa del Lanital e della razionalizzazione del processo produttivo, nel giro di pochi anni della sua vita industriale, ha avuto numerosi e costanti miglioramenti al punto da poter essere introdotte all'estero, in special modo in Germania (nelle fabbriche di Lodz, Cottbus) in Belgio, in Svizzera (attraverso investitori come il tessitore Isacco Leumann) (fig.139) e in Francia (Lilla). Il motivo della importante diffusione del Lanital è rintracciabile nella elevata resa della produzione rispetto all'impiego della materia prima. «È utile accennare che da 1 ettolitro di latte si possono ricavare circa 3kg di caseina tessile, dopo che si sono ottenuti poco meno di 4kg di burro per centrifugazione: e il siero residuo, dopo la separazione del burro e la precipitazione della caseina, può essere impiegato come alimento per gli animali»⁵⁴.



140

Dal punto di vista macromolecolare, il Lanital (così come le declinazioni nazionali e internazionali del prodotto) si presenta come un polimero lineare a sezione piena punteggiato e con lievi striature molto regolari; in sezione si presentano tondeggianti e con contorni non perfettamente definitivi (figg.140-149). La sezione è priva del tipico canale midollare contenente cheratina che caratterizza le fibre naturali come la lana. L'assenza del canale midollare diminuisce drasticamente la biodegradazione della fibra (che pur mantiene il grado di materiale eco-sostenibile ed eco-compatibile), ponendosi come caratteristica di assoluta importanza soprattutto in caso di impiego dello stesso per l'isolamento termico ed acustico dell'involucro edilizio. Tale proprietà consentirebbe alla rinnovata fibra caseinica, oggetto della sperimentazione della presente tesi, di porsi come valida alternativa all'impiego di fibre naturali e animali per gli interventi di isolamento termico ed acustico. La morfologia dei polimeri di Lanital, inoltre, essendo priva delle tipiche 'scaglie' cuticolari della lana consente alla fibre

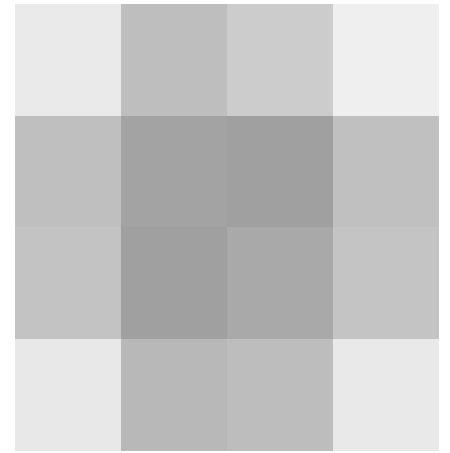
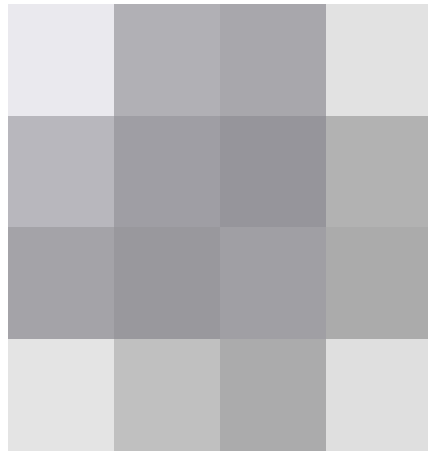


141

caseiniche di essere irrestringibile con la conseguente possibilità di mantenere inalterata la forma ed il volume e quindi la stabilità dimensionale sia termica che meccanica. L'aspetto negativo, invece, dell'assenza di scaglie cuticolari tipiche della lana è la preziosa prerogativa di feltrare, aspetto comunque relegato alla lavorazione tessile del prodotto e di minore importanza nel caso di impiego come materiale isolante per l'edilizia⁵⁵.

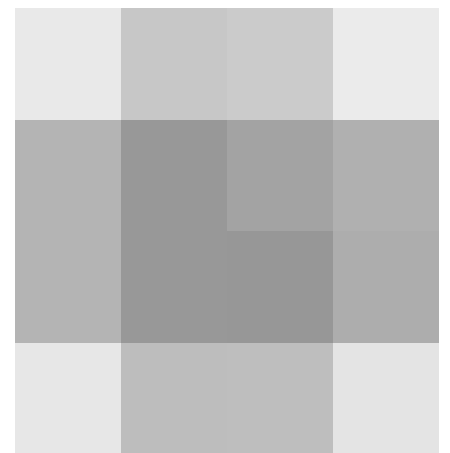
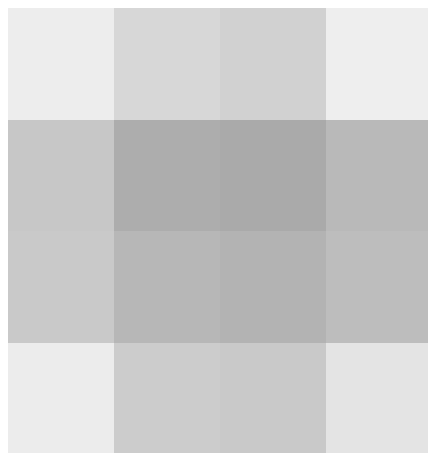
140. Immagine di un vetrino di Lanital per analisi fisiche e chimiche, in Bertarelli E., "Una rivoluzione nell'industria tessile. Precisazione sulla lana artificiale Italiana (Lanital)", in rivista "Sapere. Quindicinale di divulgazione" del 15 Marzo 1937, Hoepli, Milano, pag.153.

141. Immagine fotografica del Lanital, *ibidem*.



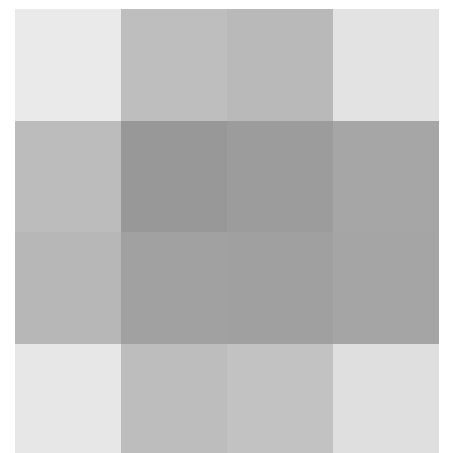
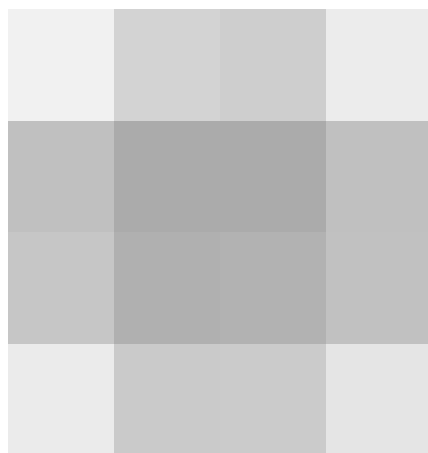
142

143



144

145



146

147

142. Fibra caseinica (Lanital): vista longitudinale al microscopio (x400), in Luniak B., "The identification of textile fibres. Qualitative and quantitative analysis of fibre blends", Sir Isaac Pitman & Sons Ltd., Londra, 1953.

143. Fibra caseinica (Lanital): sezione trasversale al microscopio (x800), *ibidem*.

144. Fibra caseinica (Tiolan): vista longitudinale al microscopio (x160), *ibidem*

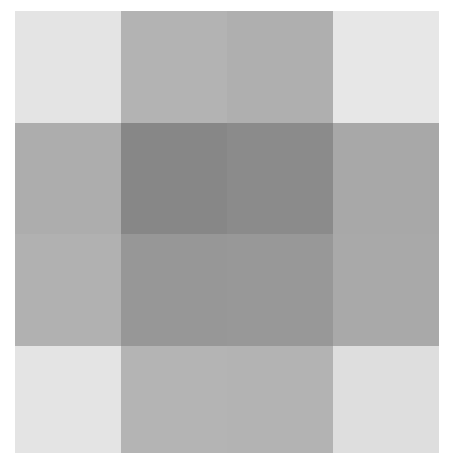
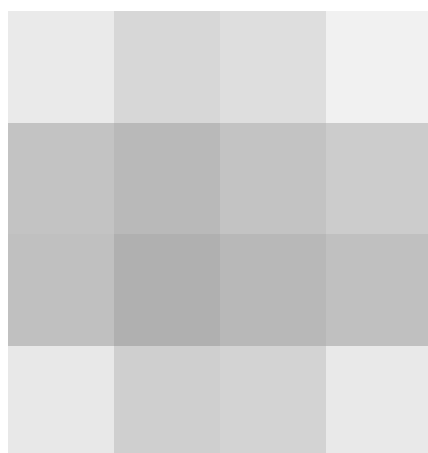
145. Fibra caseinica (Tiolan): sezione trasversale al microscopio (x800), *ibidem*.

146. Fibra caseinica (Fibrolane): vista longitudinale al microscopio (x160), *ibidem*

147. Fibra caseinica (Fibrolane): sezione trasversale al microscopio (x800), *ibidem*.

148. Fibra caseinica (Aralac): vista longitudinale al microscopio (x160), *ibidem*

149. Fibra caseinica (Aralac): sezione trasversale al microscopio (x800), *ibidem*.



148

149

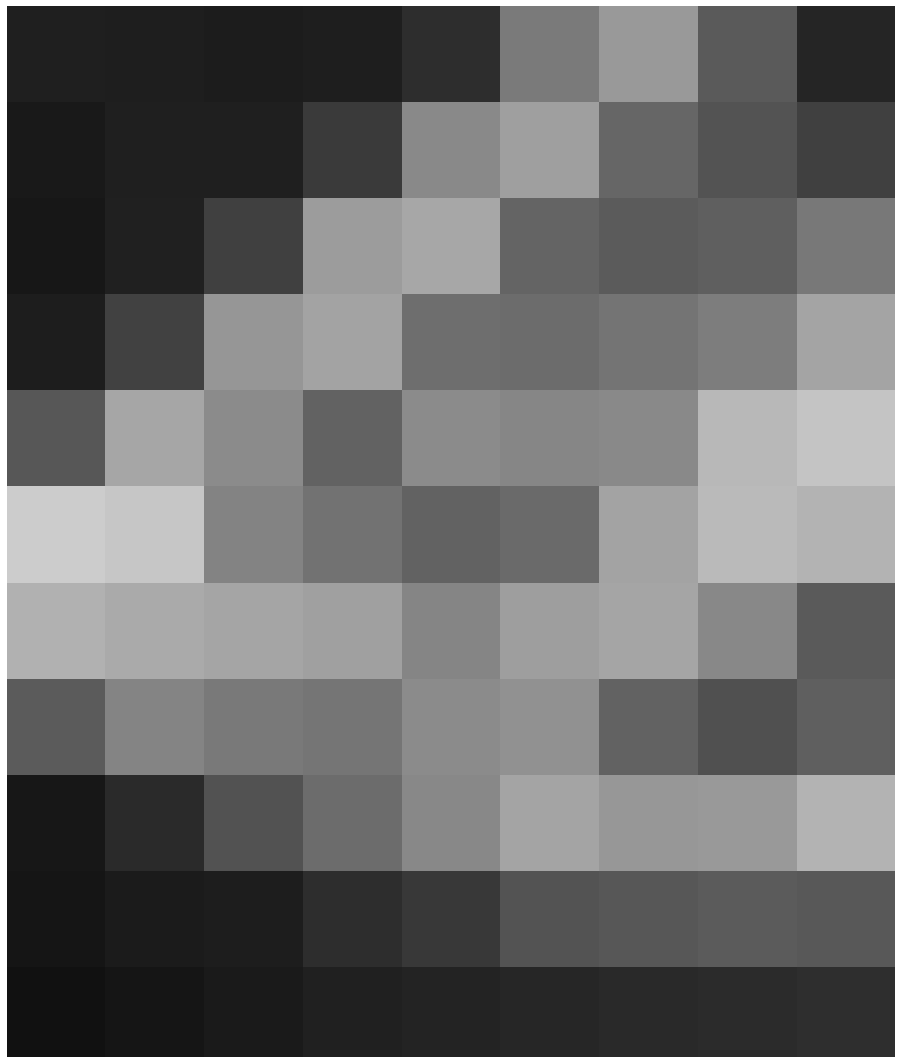
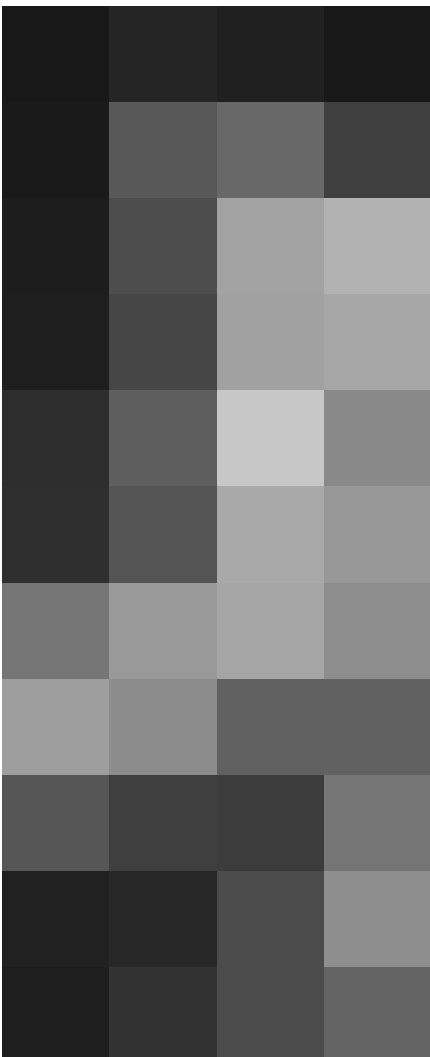
La fibra Merinova ha, rispetto al Lanital, una tenacità superiore (1,4g/den rispetto all'1,0g/den del Lanital), un minor allungamento a umido e una minore igroscopicità. Ha una densità uguale a 1,3g/cm³ e un tasso di umidità da ripresa di 13,5%. Brucia come la lana, ma con odore meno marcato; allontanata dalla fiamma si spegne, lasciando ceneri grumose; ha un'alta coibenza termica.

Solitamente sia il Lanital che la Merinova sono miste con la lana, il cotone o oltre fibre naturali, per migliorare le caratteristiche fisiche e meccaniche.

Il comportamento del Lanital e della Merinova nei confronti degli agenti chimici è simile a quello della lana: sono solubili a caldo in NaOH al 10%; si sciolgono parzialmente colorandosi di giallo in HNO₃; resistono molto bene all'acido solforico, ma non a quello concentrato a caldo.



150



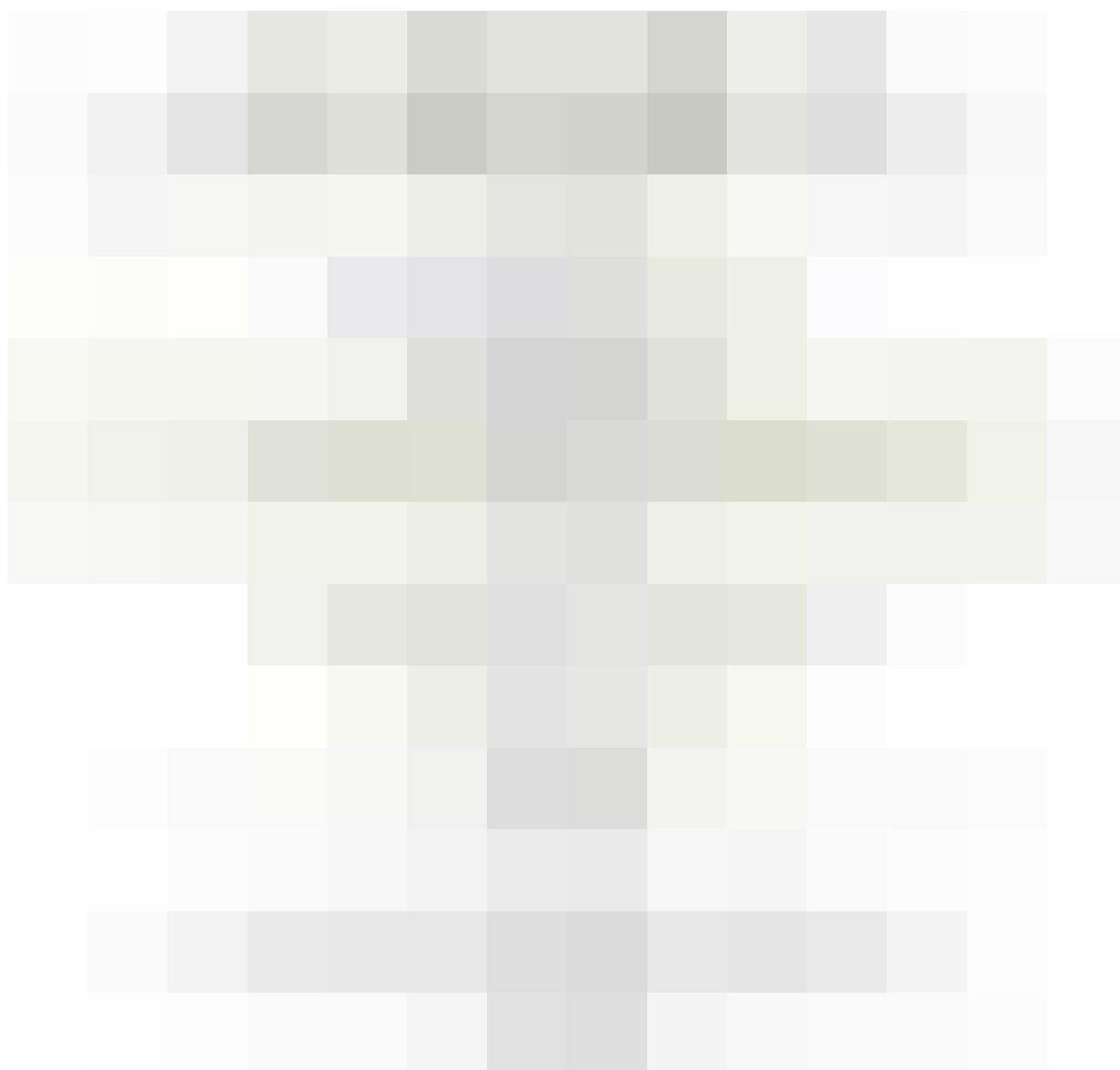
151

150. Tessuti di Lanita, in *"Vedere. Le fibre tessili artificiali"*, periodico unico supplementare della rivista *"Sapere"*, fascicolo n.153, Milano, Maggio 1941, Hoepli, Milano, 1941, pag.93.
151. Schema comparativo delle caratteristiche meccaniche, fisiche e chimiche tra il Lanital e la lana. Ingrandimento di una matassa di Lanita, in Bertarelli E., *"Una rivoluzione nell'industria tessile. Precisazione sulla lana artificiale Italiana (Lanital)"*, in rivista *"Sapere. Quindicinale di divulgazione"* del 15 Marzo 1937, Hoepli, Milano, pag.154.
152. Schema comparativo delle caratteristiche meccaniche, fisiche e chimiche tra il Lanital e la lana.

Il Lanital è molto sensibile agli alcali e agli acidi della Merinova; in soluzione, infatti, tende a rigonfiarsi ed a idrolizzarsi lentamente⁵⁶. Inoltre, il Lanital è una fibra atossica, antibatterica e traspirante, grazie alle sue capacità termo-regolatrici. È inattaccabile dalle tarme. È molto leggera: presenta un peso inferiore del 10% rispetto alla lana e del 13% rispetto al poliestere. Nella produzione, c'è un basso livello di composti chimici dannosi.

In conclusione, ai fini della ricerca e della sperimentazione di una nuova fibra a matrice biopolimerica a base di caseina, il confronto tra il

Lanital (e Merinova) e lana naturale è indispensabile per fissare in maniera empirica le proprietà qualitative e quantitative della nuova fibra e conseguentemente indirizzare lo sviluppo della stessa nel settore più confacente a tali parametri, che, nella presente ricerca, ricade nell'isolamento termico ed acustico di un sistema edificio-impianto. Si riporta, quindi, uno schema riassuntivo delle caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche del Lanital confrontate con la lana naturale, materiale molto simile nella morfologia e nella struttura fisico-chimica e già impiegata in edilizia come isolante (fig.152).



Processo di produzione sostenibile di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina

Il procedimento autarchico per la produzione del Lanital a distanza di quasi un secolo risulta valido e validante per la sperimentazione di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina apportando alcune modifiche sia nelle materie prime utilizzate (solventi e soluzioni chimiche) impiegate, sia nel procedimento razionale adoperato per la produzione. Quest'ultimo, infatti, può vantare *ipso facto* del progresso tecnico e tecnologico raggiunto dall'industria nella realizzazione di macchine sempre più efficienti e multifunzionali, riducendo drasticamente lo spazio necessario per l'allocazione delle stesse, la richiesta di energia per alimentarle, la manutenzione e la manodopera richiesta (sostituita in parte dal controllo numerico e dalla digitalizzazione delle macchine di produzione). Ridondante, invece, disquisire in merito al processo autarchico per la produzione del Lanital, foriero di un sapiente e approfondito ingegno 'italico' ed una conoscenza d'avanguardia, ancora oggi valido e che può essere, senza eccessivo zelo, solamente affinato ed epurato da incoerenze con gli odierni precetti ecologisti.



Parallelamente al miglioramento dei processi di produzione, nella sperimentazione e nella prototipazione del nuovo materiale a matrice fibrosa a base caseinica, è imprescindibile l'adozione di criteri, metodologie e validazioni aggiornate, soprattutto in una contemporaneità caratterizzata da una crescente consapevolezza vocata alla sostenibilità ambientale,

all'ottimizzazione delle risorse, all'utilizzo di energia 'verde' e alla implementazione di processi eco-sostenibili ed eco-compatibili. Sono sempre più numerose le aziende che stanno innovando tecniche di produzione per ridurre al minimo il loro impatto sull'ambiente mediante strategie preventive dell'inquinamento e sistemi di gestione ambientale per migliorare le loro prestazioni. Uno di questi strumenti è indubbiamente il *Life Cycle Assessment - L.C.A.*, con il quale viene valutato l'impatto ambientale di un materiale durante il suo intero ciclo di vita (estrazione, trasporto, produzione, posa in opera, utilizzazione, dismissione)⁵⁷, favorendo una logica collettiva vocata anche all'uso, al reimpiego, alla rigenerazione ed alla riciclabilità del prodotto alla fine del suo ciclo di vita.

L'analisi e la sperimentazione di una nuova fibra di natura biopolimerica è, inoltre, confutata da normazioni sempre più complete ed esigenti nel panorama europeo. La produzione dei biopolimeri, infatti, è alla base della visione della Commissione Europea, che accoglie con favore il passaggio da un'economia lineare ad una economia circolare, esortando i legislatori a prendere in considerazione misure che catalizzino il processo di sviluppo sostenibile della bioeconomia europea. I biopolimeri, come già descritti precedentemente, si adattano perfettamente al concetto economico circolare, allontanandosi dall'economia lineare caratterizzata dal processo di *creazione-utilizzazione-eliminazione* a favore del processo di *creazione-utilizzazione-riciclo*. Per garantirlo è indispensabile concentrarsi sia sul *ciclo tecnico* che sul *ciclo biologico* per la produzione di nuovi materiali sostenibili, supportati da un quadro politico che migliori l'efficienza della gestione dell'intero ciclo e affrontando le barriere legali e di mercato che ostacolano la diffusione di materiali a matrice biopolimerica. I biopolimeri o le bioplastiche sono una grande famiglia di materiali e sostanze diverse, con proprietà e applicazioni differenti. Il confisso "bio-" sta ad indicare polimeri o plastiche

che presentano una base biologica e biodegradabile o entrambe le proprietà. La base biologica suggerisce la derivazione dei polimeri dalle biomasse, quali piante, mais, canna da zucchero, etc. o la derivazione animale, come nel caso in esame, dell'utilizzo delle proteine, quali la caseina; *biodegradabile*, invece, indica il processo chimico di biodegradazione, durante il quale i microrganismi convertono il materiale in sostanze naturali come acqua, biossido di carbonio e compost. A tal proposito intervengono ulteriori certificazioni ed etichette ("Ok biobased", "Ok compost home", "DIN-Geprüft Biobased"), già approfondite a inizio del presente capitolo, che si riferiscono al contenuto di materie plastiche a base biologica e alle sostanze inquinanti presenti nel materiale in esame.

Tale disquisizione di carattere informativo si pone come prassi metodologica fondante, un *vademecum* per l'ottenimento del miglior risultato sperimentale, ottimizzando il dispiegamento di ogni risorsa conoscitiva ed analitica in possesso. La fase conoscitiva della presente ricerca risulterà, inoltre, indispensabile anche per validazione dei risultati e per la successiva fase di prototipazione del prodotto.

La sperimentazione, dunque, riguarda lo sviluppo di un campione di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina, declinando la sperimentazione storica del Lanital a metodologie moderne e sostenibili, fornendo una panoramica il più possibile completa per la successiva fase di sviluppo e prototipazione di prodotti sperimentali da applicarsi nel settore delle costruzioni, del design e dell'architettura.

Sarà sviscerato preliminarmente l'esperimento scientifico di laboratorio atto alla creazione della fibra biopolimerica partendo da un prodotto di scarto: la caseina, che opportunamente estratta ed elaborata con metodi non dissimili dai procedimenti storici anzidetti, costituirà la base materica della nuova fibra.

Saranno, quindi, analizzate le proprietà del nuovo materiale e opportunamente paragonate con i valori rinvenuti dalla letteratura tecnico-scientifica e dall'analisi conoscitiva delle fibre caseiniche quali il Lanital e la Merinova. Sempre mediante analisi di laboratorio, saranno validati i dati, indispensabili per la prototipazione e/o la brevettazione per invenzione industriale, costituenti il *diktat*, il complesso di condizioni imposte per procedere alla creazione di prodotti industriali finiti, prossimi - o quasi - ad una eventuale immissione sul mercato. Saranno, quindi, progettati *ad hoc* numerose tipologie di pannelli isolanti compatibili alle diverse contingenze tecniche, energetiche e formali, prime tra tutte, la utilizzazione della nuova fibra biopolimerica a base di caseina, valorizzando al meglio le relative proprietà e le prestazioni che potrà esplicare per l'isolamento termico ed acustico dell'involucro edilizio.

La fase finale è volta alla verifica delle possibilità applicative del sistema innovativo elaborato dal progetto di ricerca, con un raggiungimento di ancor più profonda comprensione dei sistemi costruttivi proposti, attraverso la sperimentazione diretta del processo, nonché l'eventuale realizzazione di modelli reali su cui poter effettuare validazioni e sperimentazione su casi campione, al fine di definirne il comportamento strutturale, prestazionale ed energetico, secondo i criteri della sostenibilità.

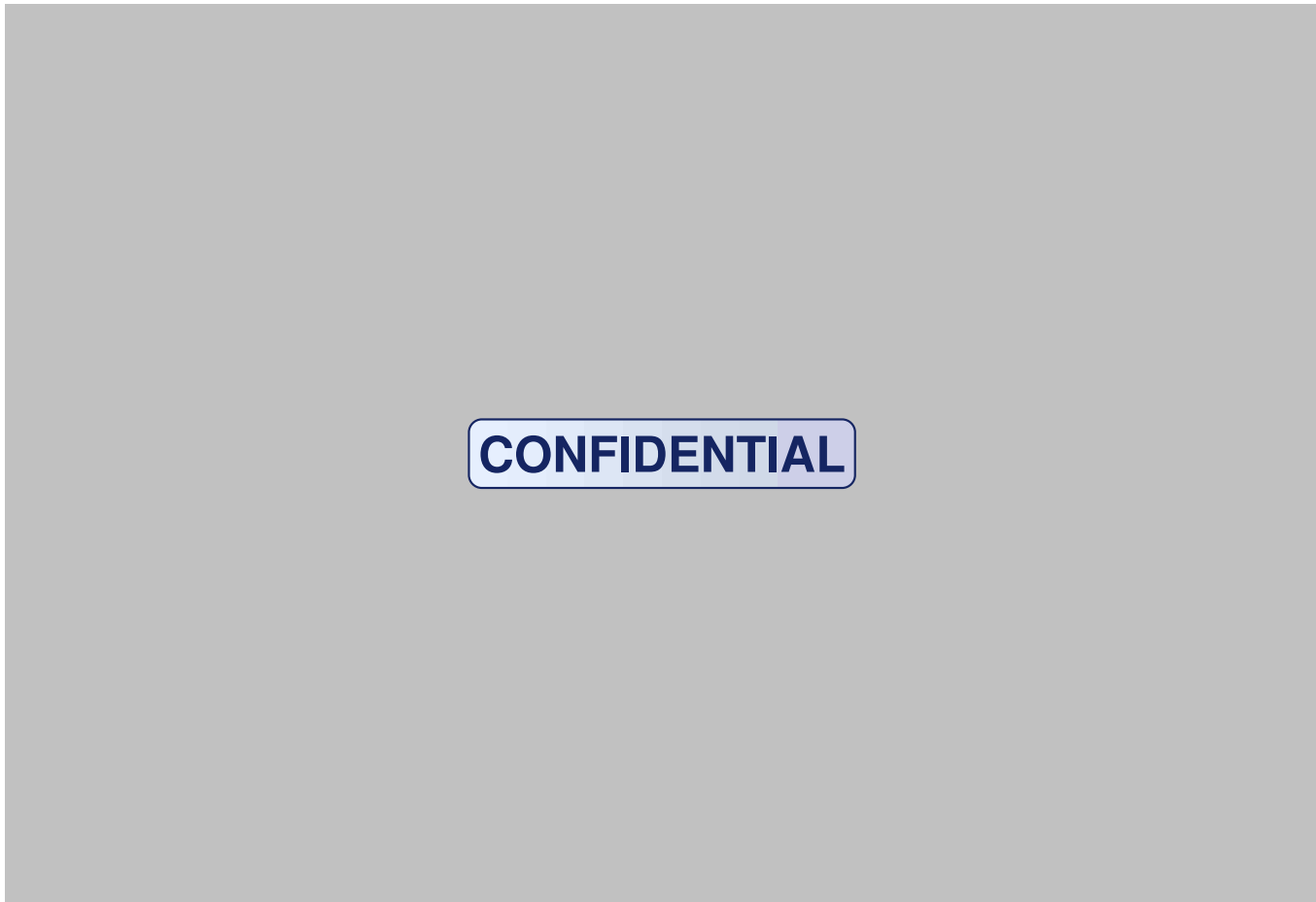
In questa fase, attraverso la stretta collaborazione con l'industria delle costruzioni e le aziende di settore, sarà possibile recepire le più attuali sperimentazioni e, coadiuvando la ricerca con la metodologia adottata, fornire criteri progettuali per l'applicazione dei sistemi di involucro analizzati mediante sviluppi di prototipi e supporti tecnologici che potranno essere messi a disposizione per professionisti del settore, aziende ed enti pubblici preposti alla tutela e gestione del patrimonio edilizio storico e contemporaneo, italiano, europeo ed internazionale.



Estrazione della caseina



CONFIDENTIAL



CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

154

CONFIDENTIAL

155

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

Sperimentazione della fibra di caseina

157. Strumentazioni e prodotti impiegati nella dimostrazione per la produzione di una fibra biopolimerica a base di caseina.

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

159

CONFIDENTIAL

160

CONFIDENTIAL

161

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

162

CONFIDENTIAL

163

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

165

CONFIDENTIAL

166

CONFIDENTIAL

168

CONFIDENTIAL

167

CONFIDENTIAL

169

CONFIDENTIAL

170

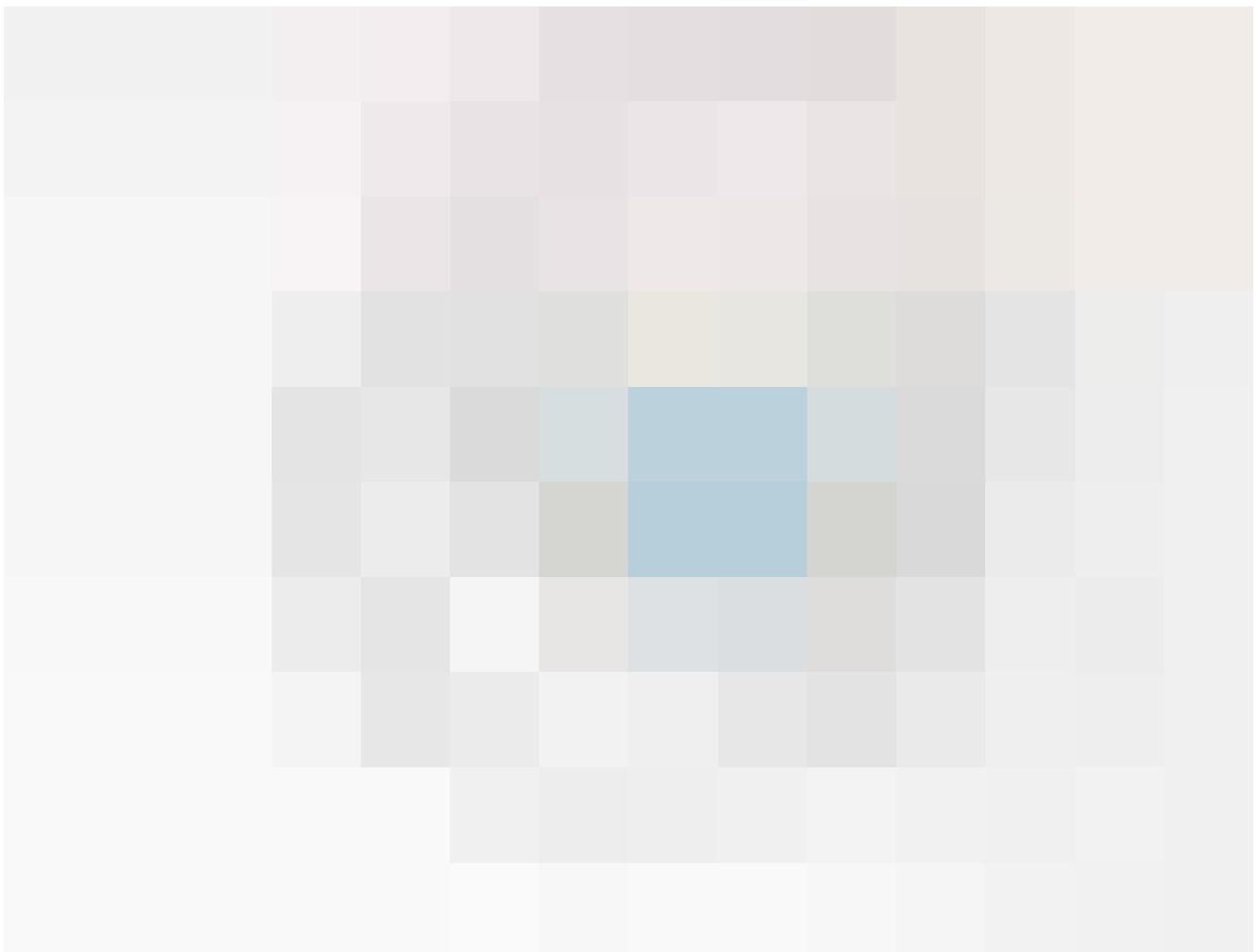
CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

Proprietà fisiche e chimiche del campione prototipale

CONFIDENTIAL

173. Prova di assorbimento d'acqua a lungo termine per immersione totale.

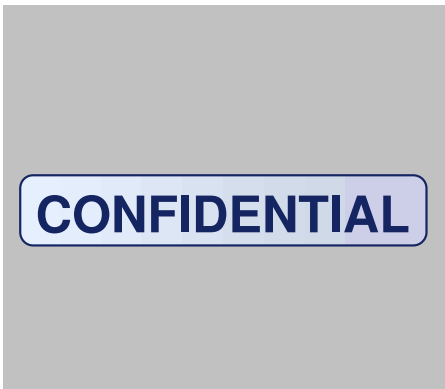




Comportamento al fuoco



Coibenza termica



Comportamento nei confronti degli agenti chimici



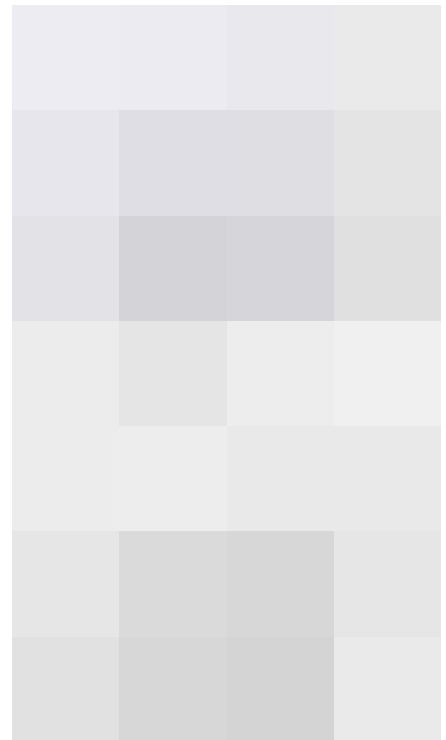
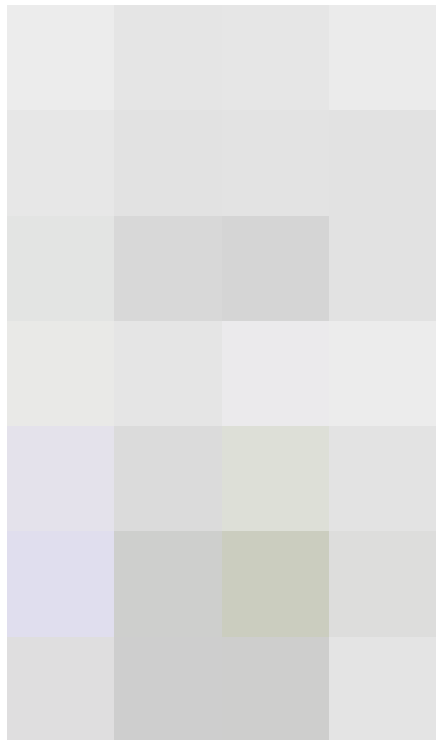


Altre proprietà

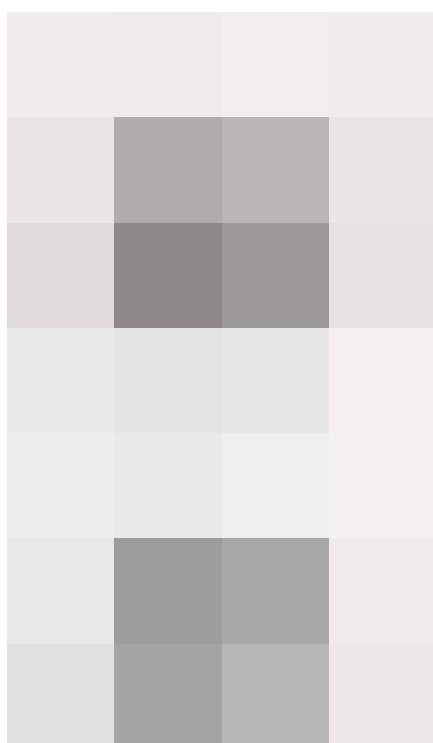
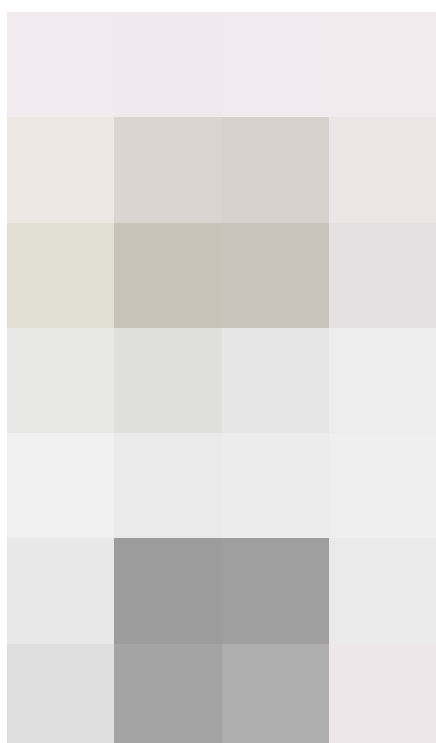


174. Analisi del comportamento al fuoco del campione di fibra biopolimerica di caseina.

175. Analisi del comportamento al fuoco del campione di fibra di cotone idrofilo.



174



175

Introduzione ai processi di produzione sostenibile e Life Cycle Assessment in edilizia

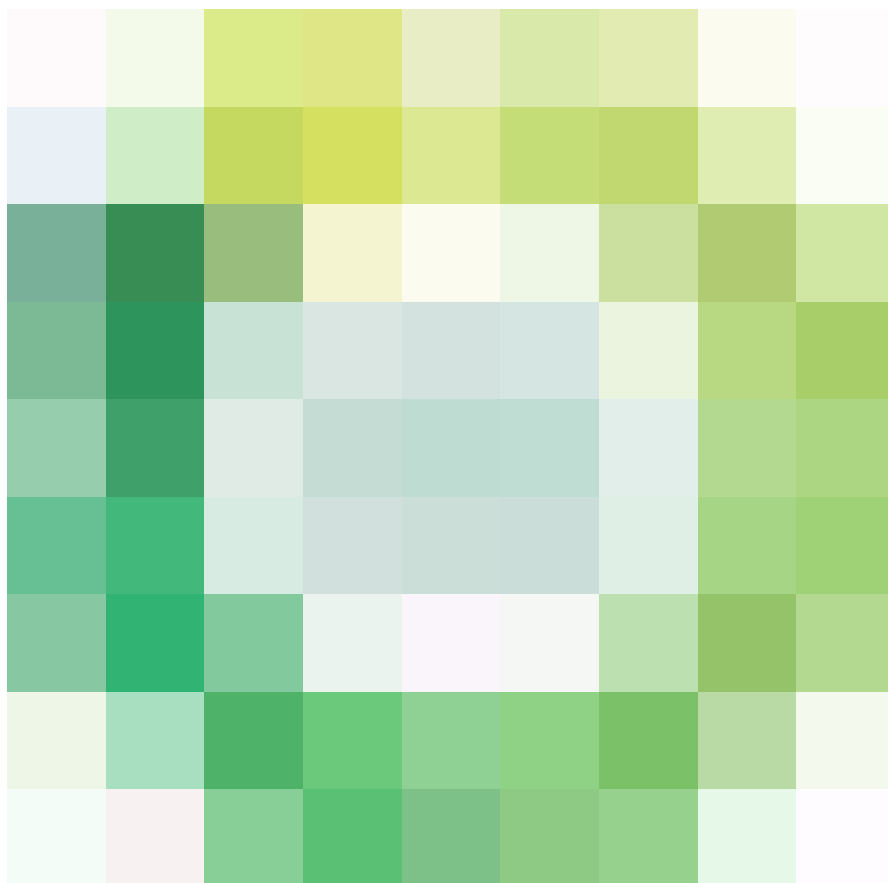
La fibra biopolimerica a base di caseina ottenuta dal processo chimico di polimerizzazione e reticolazione si presenta come un insieme di fibre discontinue, disordinate e di lunghezza variabile. Per ottenere un materiale isolante da impiegare in edilizia è necessario effettuare alcune operazioni per rendere la fibra sfusa un pannello (o rotolo) morfologicamente definito e strutturalmente stabile. Uno studio attento del processo di produzione del campione prototipale e quindi del futuro prodotto commerciale, contribuisce a rendere la fibra caseinica un materiale eco-compatibile. Per considerare un materiale sostenibile, quindi, occorre considerare molteplici variabili nell'intero ciclo di vita: non è sufficiente, infatti, impiegare solo materie di scarto (caseina), ma limitare in modo particolare l'utilizzo di energia ed acqua, le emissioni inquinanti nell'ambiente ed estendere il ciclo di vita dei prodotti considerati erroneamente obsoleti.

L'adozione di processi di lavorazione sostenibili, limitare il trasporto del materiale, adottare logiche di commercializzazione, utilizzazione e smaltimento smart, consente di ambire alla diffusione di un materiale isolante di derivazione naturale e con un ecobilancio positivo, inserendosi in quella classe di isolanti che svolgeranno in futuro un ruolo sempre più importante nella valutazione del loro impatto ambientale e nella scelta di soluzioni più idonee alla gestione degli scarti e alla riduzione di sostanze inquinanti nell'ambiente, nonché alla incentivazione della bioedilizia. A tal proposito è essenziale adottare il metodo *Life Cycle Assessment*, che valuta l'impatto ambientale sulla base della quantità di energia e di materia prima necessarie all'intero ciclo di vita di un prodotto o servizio e definire la scelta più ecologica e sostenibile da adottare (fig.176). Lo svolgimento del metodo L.C.A. avviene in quattro distinte fasi, ognuna normata dalla ISO di riferimento:

- stabilire gli obiettivi;
- analisi dell'inventario;
- valutazione degli impatti;
- analisi dei risultati.

La prima fase è quella di stabilire il campo di applicazione del metodo L.C.A. (*Goal and Scope Definition* - ISO 14041) definendo gli obiettivi fondamentali per quantificare sia i flussi di energia richiesta sia per creare un sistema di riferimento che permetta di comparare il campione prototipale con i diversi prodotti presenti sul mercato. La fase successiva è quella di quantificare i flussi di input e di output (come per esempio le materie prime richieste, l'energia consumata, le emissioni, etc.) attraverso una analisi dell'inventario (LCI, *Life Cycle Inventory Analysis* - ISO 14041), in cui sono sviluppati tutti i processi oggetto di studio. La terza fase prevede la valutazione degli impatti (LCIA, *Life Cycle Impact Analysis* - ISO 14042), sistematizzando i dati raccolti nell'analisi dell'inventario in modo da poter aggregare tra loro impatti simili e ricorrere ad opportuni fattori di peso.

176. Life Cycle Assessment nel settore delle costruzioni.



L'ultima fase è quella di analisi e interpretazione dei risultati (*Life Cycle Interpretation* - ISO 14043), in relazione agli obiettivi iniziali, effettuando confronti e individuando i maggiori impatti ambientali.

Dalla metodologia è possibile elencare i vantaggi e gli svantaggi della valutazione del ciclo di vita. Tra i vantaggi si possono:

- quantificare in ciascuna fase del ciclo di vita, l'impatto ambientale e le emissioni associate al prodotto;
- individuare cambiamenti tra le fasi del ciclo di vita;
- analizzare l'impatto ambientale delle scelte relative al prodotto o ai processi di produzione;
- confrontare le prestazioni e i processi tra prodotti;
- valutare gli effetti derivanti dal consumo delle risorse e di emissioni nell'ambiente a vari livelli territoriali.

Tra gli svantaggi, invece, si possono elencare:

- i "confini di sistema" derivanti da valutazioni soggettive;
- l'accuratezza del metodo, inficiato dalla disponibilità e attendibilità dei dati;
- modelli di calcolo non adatti al caso specifico;
- la variabilità dei dati in relazione al contesto territoriale.

La qualità e l'idoneità dei dati raccolti durante la fase di inventario si ripercuotono sulla qualità finale dell'intera analisi.

Un'altra variabile imprescindibile, spesso trascurata nella progettazione e nel metodo L.C.A. è la scelta di materiali isolanti che non proteggono solamente durante la stagione invernale, ma che assicurino prestazioni elevate anche nella stagione estiva (in funzione di smorzamento e sfasamento molto diversa a seconda della tipologia di isolante), nella protezione acustica, nella protezione antincendio e nella risposta al fattore umidità.

Soltanto dopo un'attenta analisi

dell'edificio da isolare e della tipologia di involucro si potrà decidere quale materiale più adatto utilizzare. Anche l'analisi finale dei costi è valutata con attenzione nel rapporto costi/prestazioni, in quanto un materiale isolante poco costoso normalmente è in grado di garantire soltanto la protezione invernale.

Sempre in merito alla sostenibilità ambientale, spesso, erroneamente, si pensa che un isolante di origine sintetica - e quindi di derivazione fossile, come ad esempio il polistirene ed il poliuretano - sia un materiale ad alto impatto ambientale.

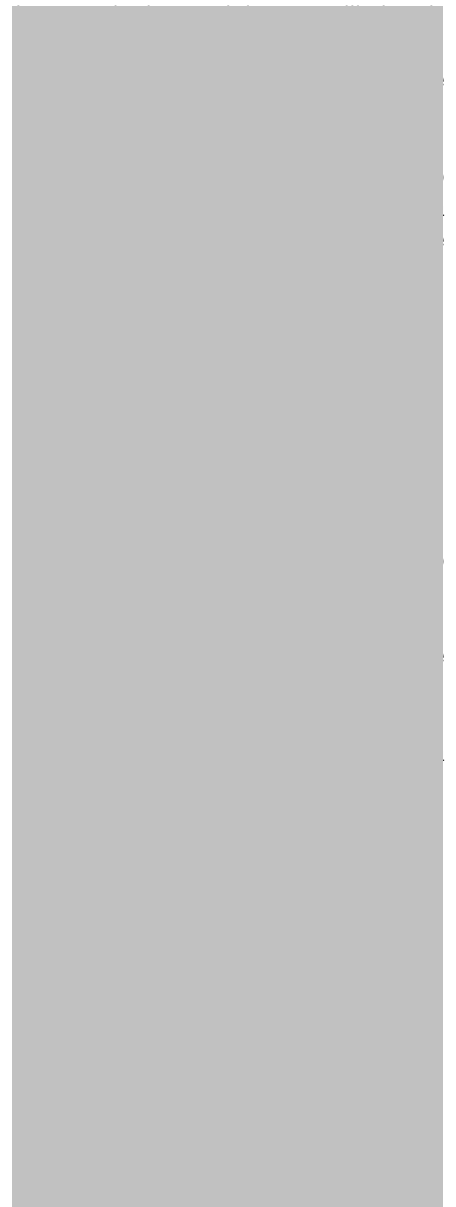
È pur vero che questi materiali isolanti sono prodotti con un combustibile fossile (e quindi con una produzione di energia grigia elevata), però hanno un impatto ambientale molto limitato. Infatti, l'efficienza energetica che producono durante la loro vita nominale portano ad una riduzione di emissioni prodotte dall'utilizzazione di un edificio, ammortizzando l'iniziale scarsa sostenibilità del prodotto.

Quindi dopo un certo tempo, anche un materiale isolante di origine fossile può considerarsi sostenibile e il corretto approccio al metodo L.C.A., potrà solamente confermare scientificamente la tesi.

In conclusione, richiamando la metodologia L.C.A. dell'analisi del ciclo di vita quale strumento per valutare l'eco-compatibilità e il carico ambientale complessivo di un prodotto è possibile affermare che un prodotto è a tutti gli effetti un materiale sostenibile. I risultati ottenuti in termini di consumi di energia GER (*Gross Energy Requirements*, misurato in MJ) e di inquinamento mediante il GWP₁₀₀ (*Global Warming Potential*, misurato in kg di CO₂ equivalente) mostrano come anche un polistirene espanso o estrusa presenta valori molto competitivi anche in riferimento a materiali alternativi di diversa origine.

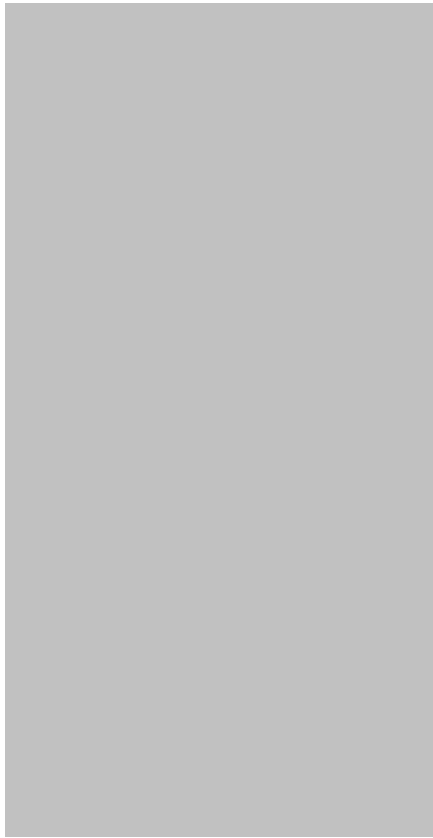
Questo dimostra che non è la fonte che determina il minor impatto ambientale, ma il processo di produzione, la fase d'uso e il fine vita⁶⁴.

Processo di produzione del campione prototipale. Verso l'impiego in edilizia

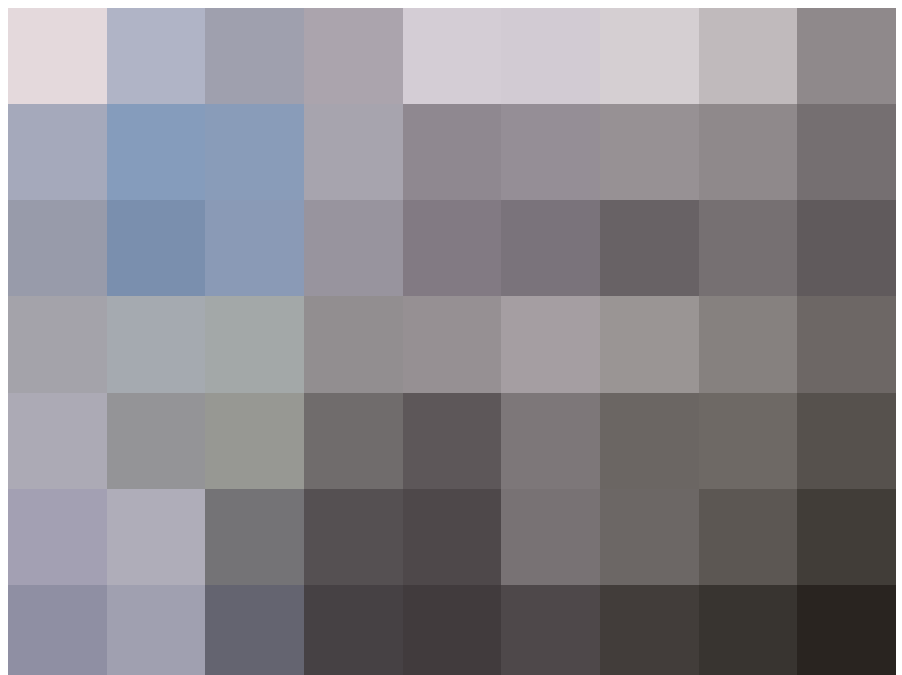


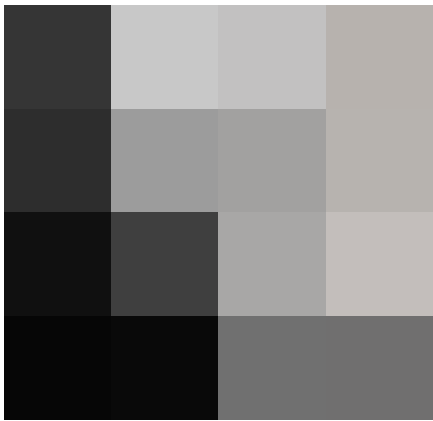
177. Sezione di un velo di materiale isolante a matrice fibrosa con orientamento isotropo delle fibre.





Alimentazione e dosatura

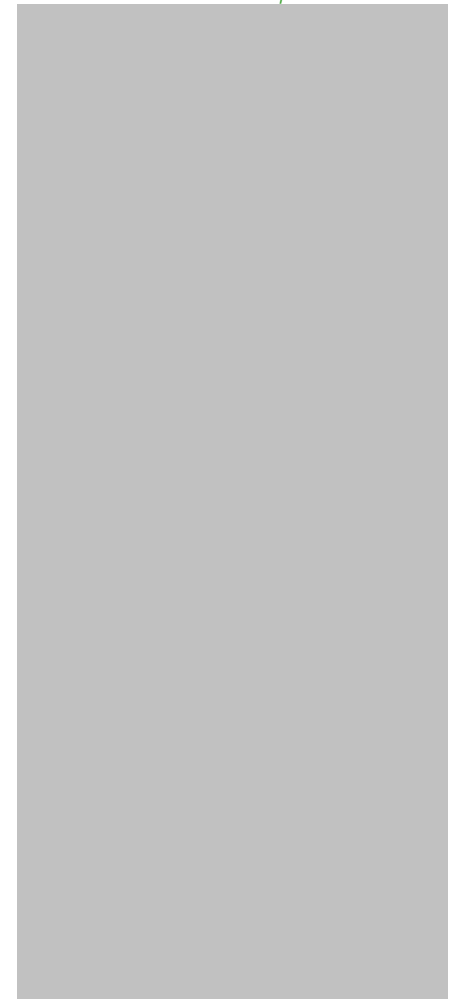




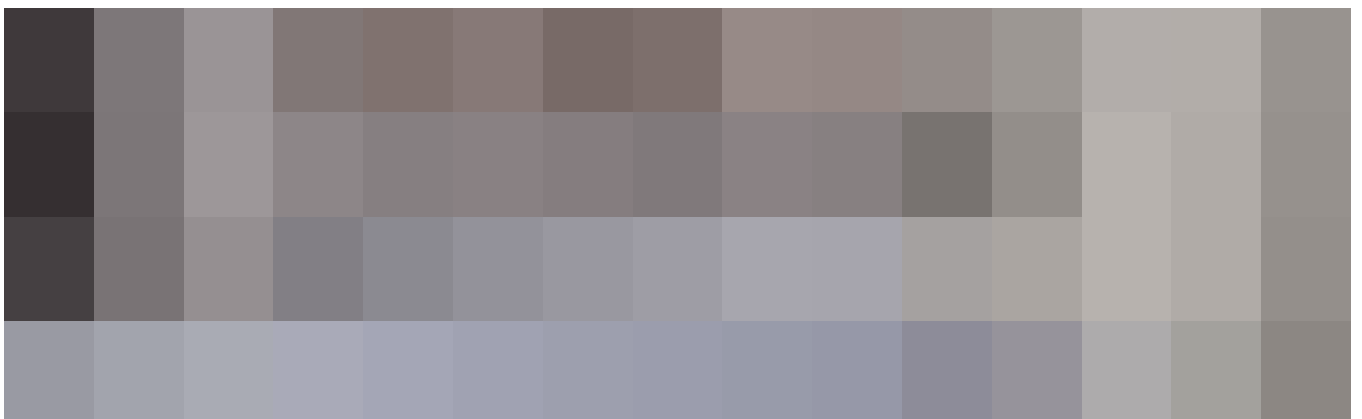
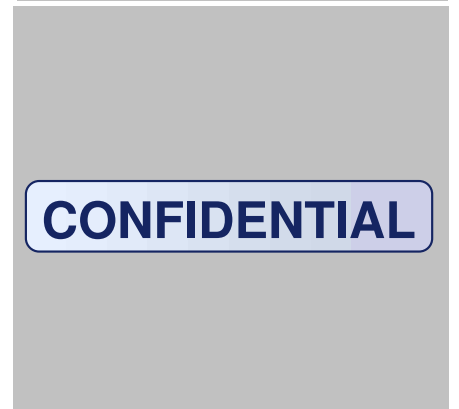
180



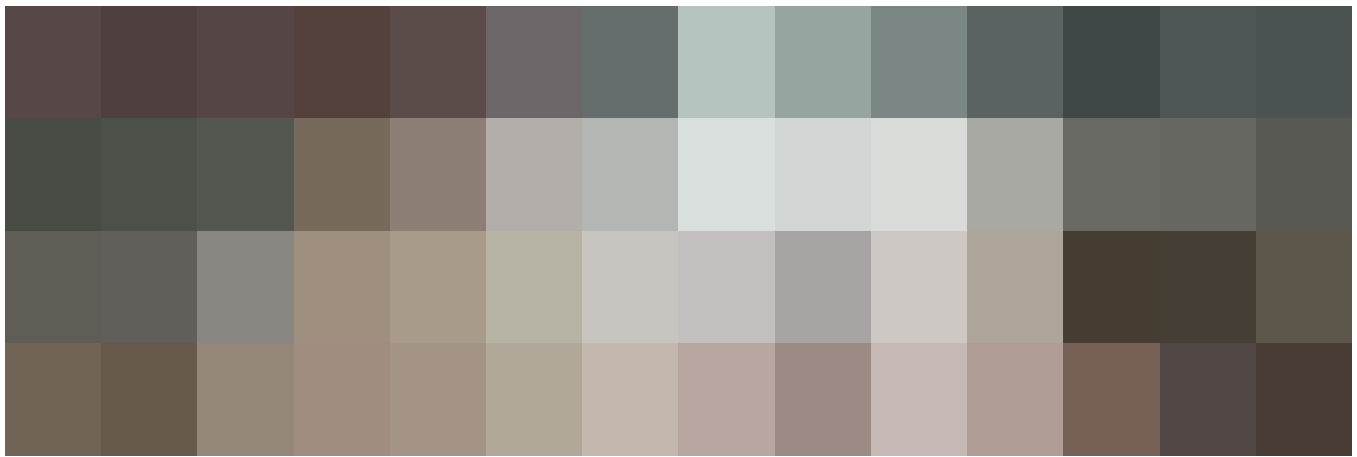
Formatura e controllo peso



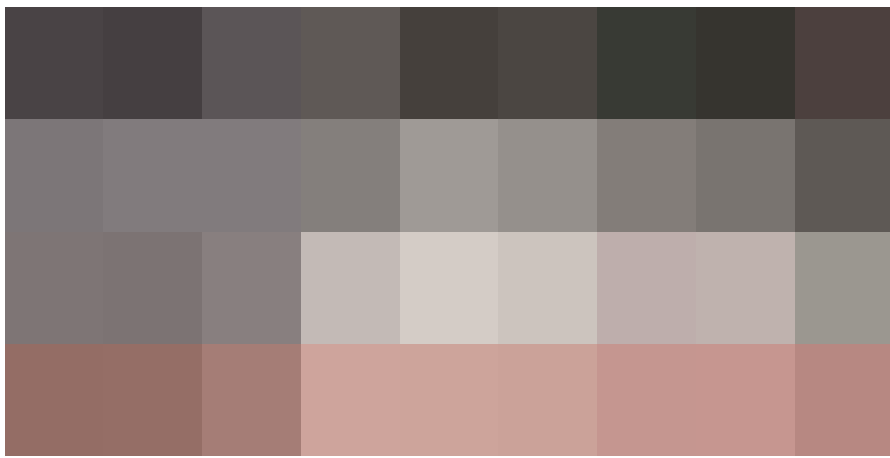
181



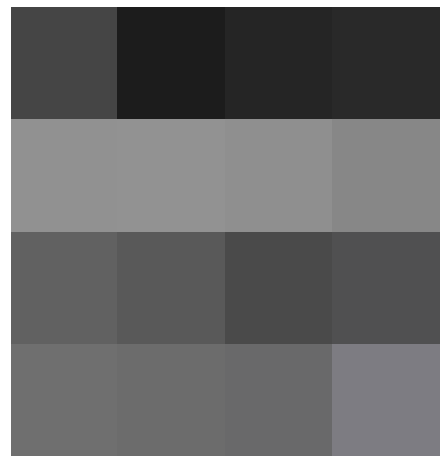
182



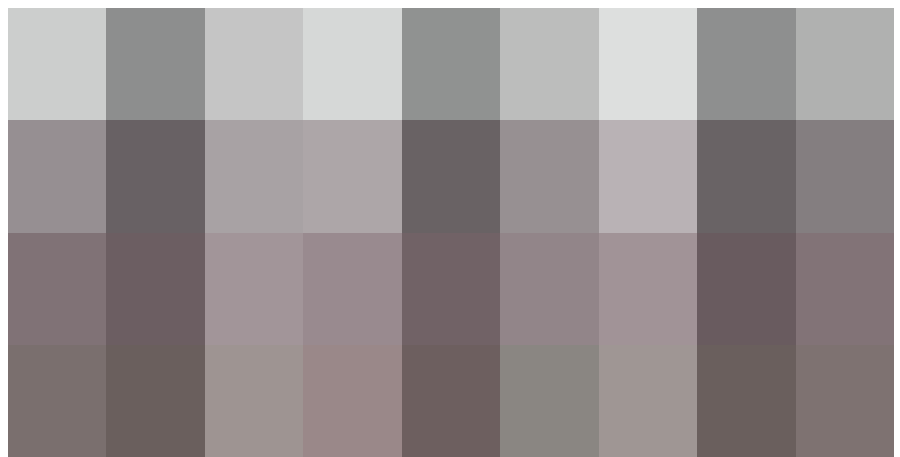
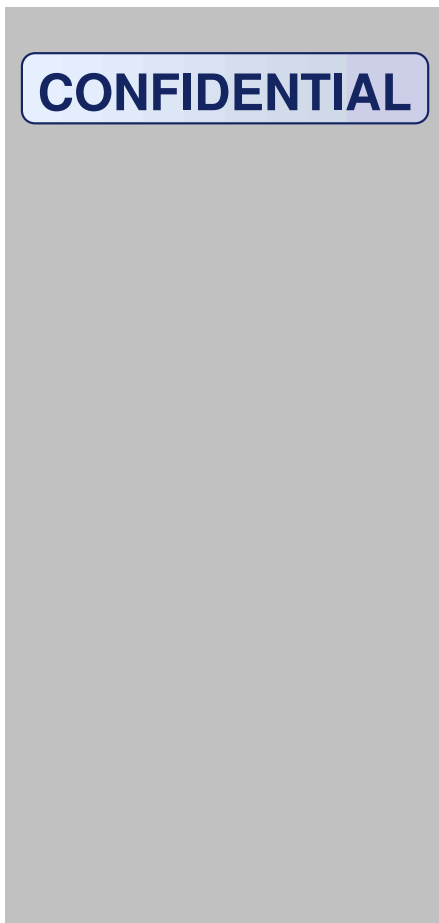
183



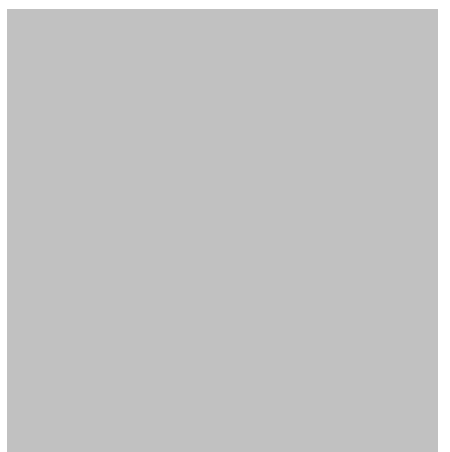
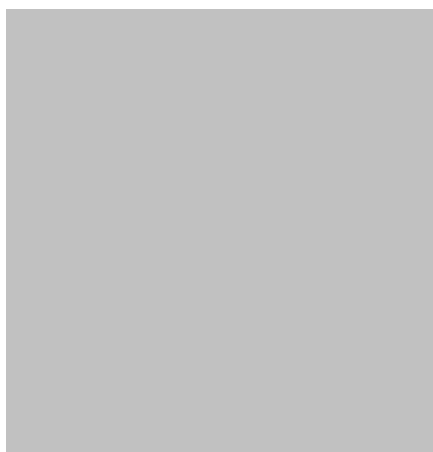
184

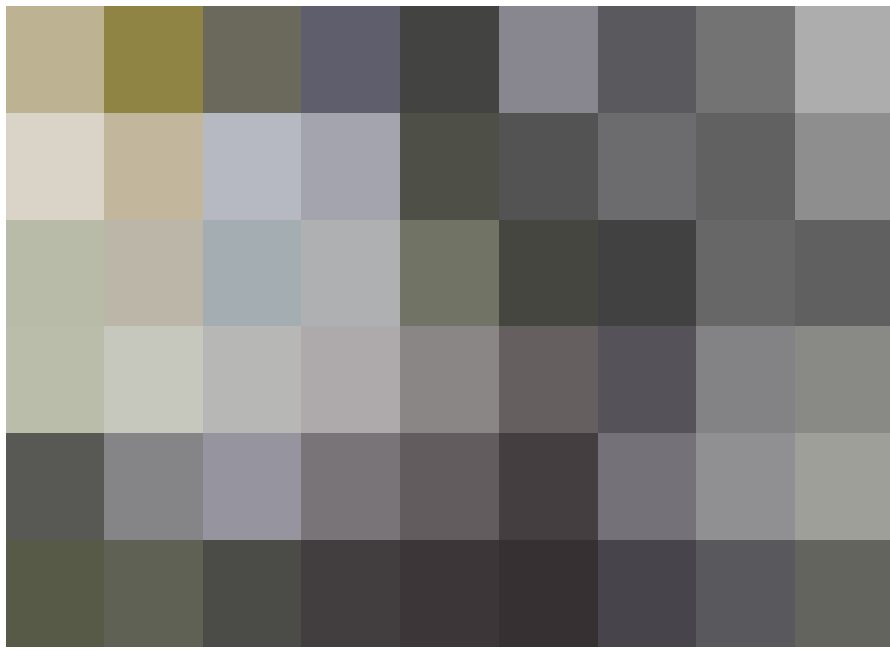
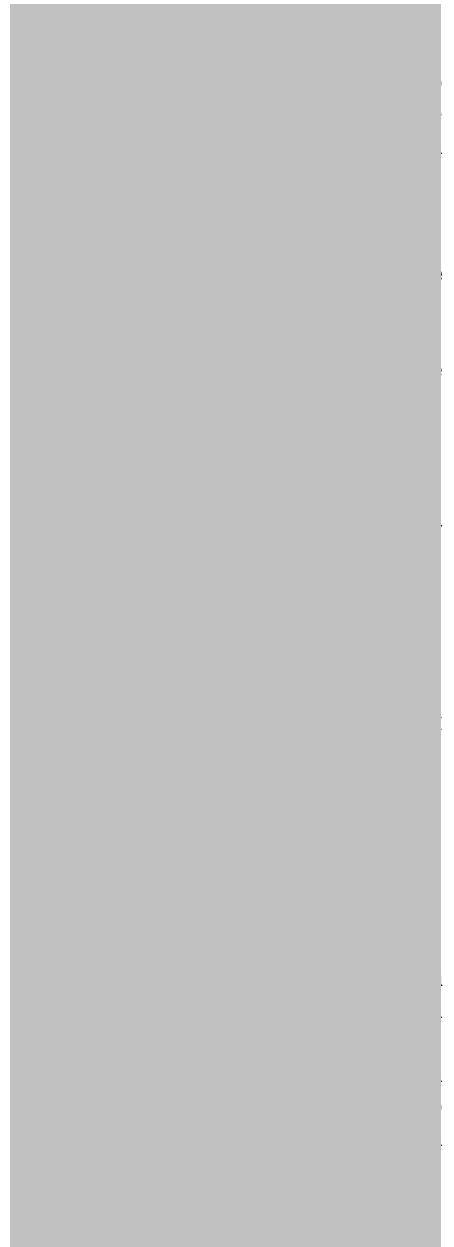
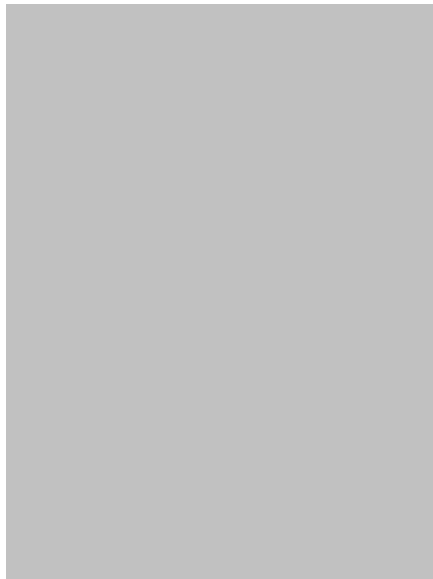


185



186

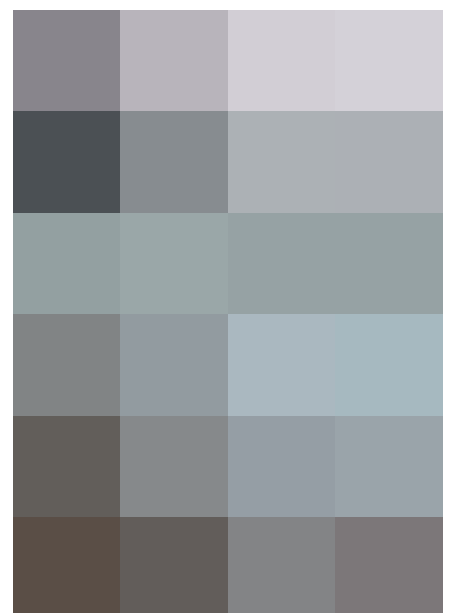




187



188

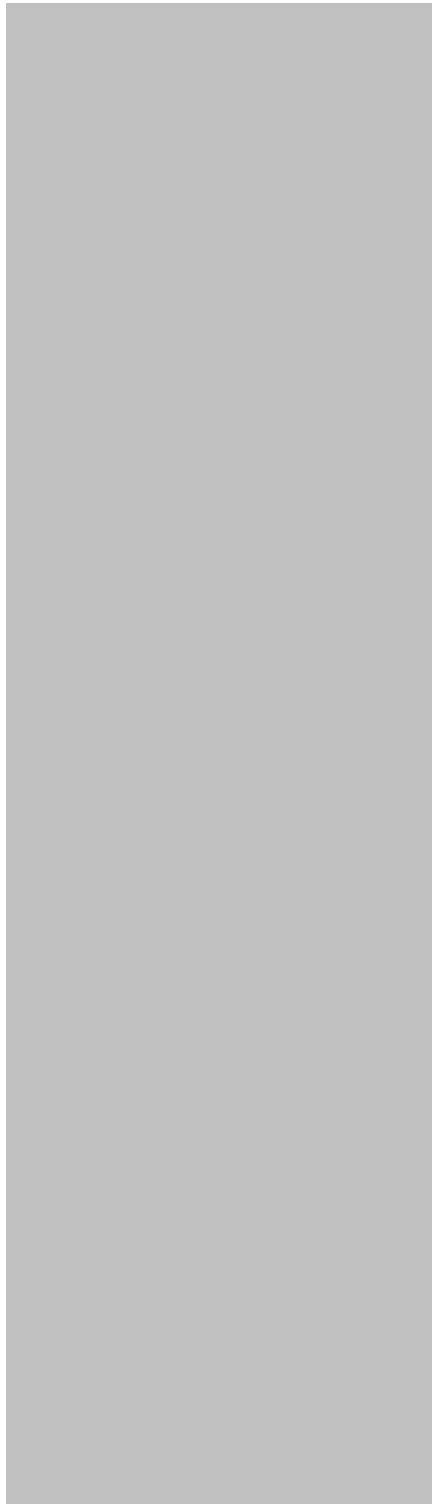


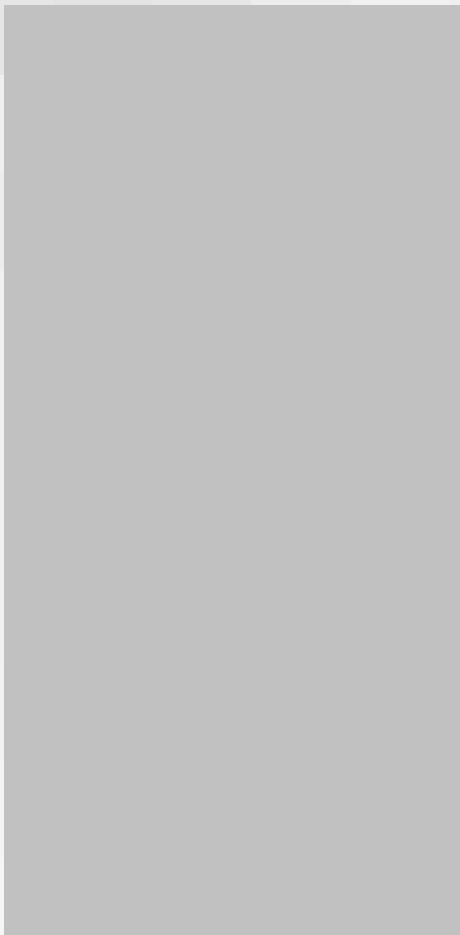
189

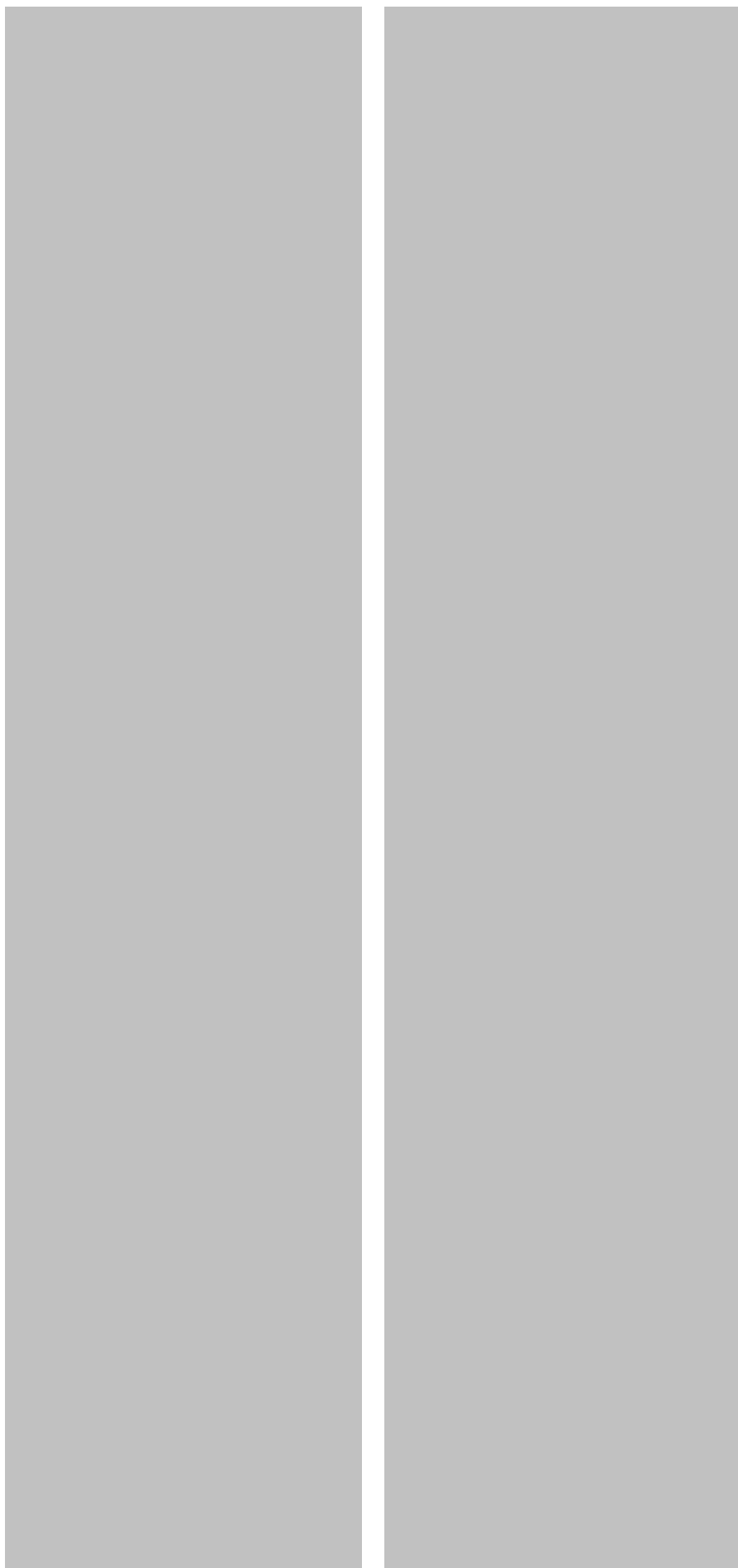




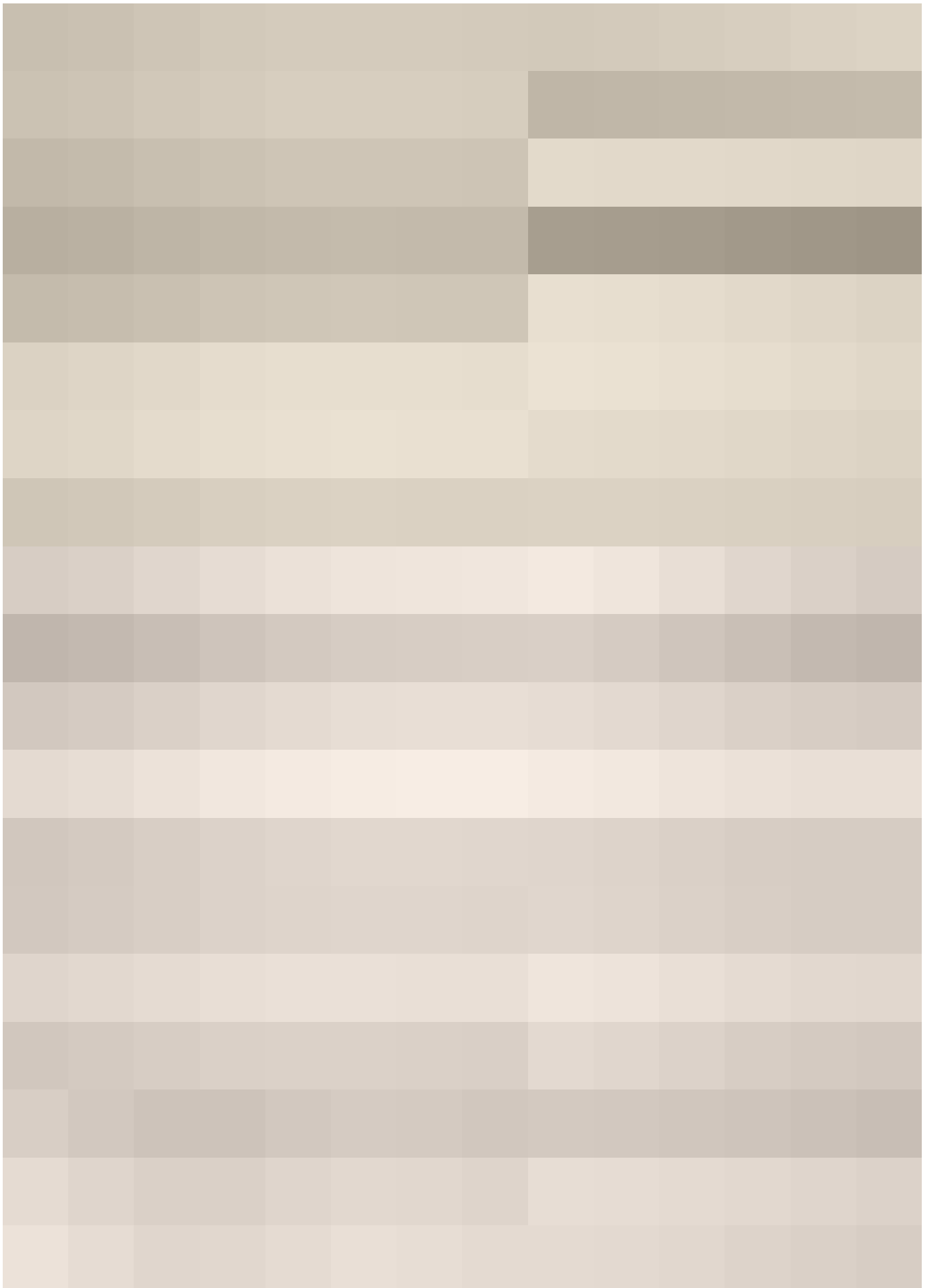
Campione prototipale di un pannello termoisolante in fibra a matrice biopolimerica a base di caseina







190. Elaborazione digitale del pannello termoisolante a matrice biopolimerica in fibra di caseina.



Note bibliografiche

- 1 Zavanella V., Leti E., Veggetti P., *Progettazione, costruzioni e impianti, volume 1 - approfondimenti*, Zanichelli, 2012, pagg.1-2.
- 2 Frassine R., Levi M., Marano C., Rink M., *Struttura e proprietà dei materiali polimerici*, in Del Curto B., Marano C., Pedferri M. (a cura di), *Materiali per il Design*, Casa Editrice Ambrosiana, Rozzano (Milano), Settembre 2015, pag.242.
- 3 *Ivi*, pag.247.
- 4 *Ivi*, pag.277.
- 5 *Ivi*, pag.273.
- 6 *Ivi*, pag.279.
- 7 *Ivi*, pag.282.
- 8 *Ivi*, pag.284.
- 9 Smith W.F., *Scienza e tecnologia dei materiali*, McGraw-Hill, Milano, 1993, pag.382.
- 10 Bruice P.Y., *Chimica Organica*, EdiSES, 2005, pag.1146-1147.
- 11 Vezzoli C., Veneziano R., *Pratiche sostenibili. Itinerari del design nella ricerca italiana*, Alinea Editrice, Firenze, 2009, pag.97.
- 12 McClements D., *Food emulsions: principles, practices and techniques*, CRC press, pag.543.
- 13 Atkins P., Loretta J., *Principi di chimica*, Zanichelli, 2005, pagg.893-895.
- 14 Bruice P.Y. (2005), op. cit. (vedi nota 10), pagg.959-960.
- 15 Damodaran S., Parkin K.L., Fennema O.R., *Amino acids, peptides and proteins*, in Damodaran S., Parkin K.L., Fennema O.R. (a cura di), *Fennema's food chemistry*, CRC press, New York, 2007, pagg.219-323.
- 16 Bruice P.Y. (2005), op. cit. (vedi nota 10), pag.946-949.
- 17 Brown W.H., Poon T., *Introduzione alla chimica organica*, EdiSES, Napoli, 2006, pag.594.
- 18 Bruice P.Y. (2005), op. cit. (vedi nota 10), pag.1075-1103.
- 19 Quaglierini C., *"Chimica delle fibre tessili"*, Zanichelli, Bologna, 2012, pagg.2-3.
- 20 *Ivi*, pagg.3-4.
- 21 *Ivi*, pag.5.
- 22 *Ibidem*.
- 23 *Ivi*, pag.6.
- 24 *Ivi*, pagg.9-15.
- 25 *Ivi*, pag.132.
- 26 *Ivi*, pag.58.
- 27 Osservatorio Industriale della Camera di Commercio Industria e Agricoltura, *"Tecnologie tessili"*, in *"Rassegna tecnico-Industriale"*, rubrica della rivista *"Cronache Economiche"* n.101, Torino, Maggio, 1951, pag.43.
- 28 Brevetto BP 6.700, 1898.
- 29 Quaglierini C. (2012), op. cit. (vedi nota 19), pag.145.
- 30 Horne D.S., Davidson C.M., *Influence of heat treatment on gel formation in acidified milks. Protein and fat globule modification*, in *Proceedings of IDF Seminar*, 1993, pag.267.
- 31 De Kruif C.G., Holt C., *Casein micelle structure, function and interactions*, in Fox P.F., McSweeney P.L.H. (a cura di), *Advanced Dairy Chemistry. Proteins*, Kluwe Academic, Plenum Publishers, New York, 2003, pagg.76-233.
- 32 Slattery C.W., Evard R., *A model for the formation and structure of casein micelles form subunits of variable composition*, *Acta*, pagg.317-529.
- 33 Quaglierini C. (2012), op. cit. (vedi nota 19), pag.145.
- 34 Finessi B., *Il design italiano oltre la crisi. Autarchia, austerità, autoproduzione*, Corraini, Mantova, 2014, pagg.62-68.
- 35 Giudici O., *La rifinitura dei tessuti di lana e dei tessuti autarchici*, Hoepli, Milano, 1944, pag.22.
- 36 Luniak B., *The identification of textile fibres. Qualitative and quantitative analysis of fibre blends*, Sir Isaac Pitman & Sons Ltd., Londra, 1953, pag.9.
- 37 Munari B., *La lana*, in *La rivista illustrata del popolo d'Italia*, n.4, Aprile 1936, Alfieri & Lacroix, Milano.
- 38 Marinetti F.T., *Il poema del vestito di latte*, Ufficio Propaganda della SNIA Viscosa (Officine grafiche Esperia), Milano, 1937, pag.8.
- 39 Gentile E., *Fascismo. Storia e interpretazione*, Laterza, Bari, 2002, pag.27.
- 40 Ruzzenenti M., *L'Autarchia verde. Un involontario laboratorio della green economy*, Jaca Book,

- Milano, 2011.
- 41 Dal Falco F., *Materiali e tipi autarchici. La cultura del prodotto tra industria e artigianato nell'Italia dei primi anni Quaranta*, in "AIS/ Design Storia e Ricerche", n.4, Novembre, 2014.
- 42 Pagliuca A., *L'architettura del grano a Matera: il Mulino Alvino. Frammenti di tecnologie costruttive del '900*, Gangemi Editore, Roma, 2016, pag.243.
- 43 Minucci G., *Isolamento acustico degli edifici*, in Notiziario tecnico del periodico *Architettura e Arti Decorative: rivista d'arte e di storia*, n.14, vol.1, Organo del sindacato nazionale Architetti, Bettetti e Tumminelli, Milano-Roma, 1931, pagg.749-755.
- 44 Griffini E., *Costruzione Razionale della Casa*, Hoepli, Milano, 1947, pag.298.
- 45 *Ibidem*.
- 46 *Ivi*, pagg.47-48.
- 47 La produzione delle fibre tessili artificiali in Italia e nel mondo, in *Vedere. Le fibre tessili artificiali*, periodico unico supplementare della rivista *Sapere*, fascicolo n.153, Milano, Maggio 1941, Hoepli, Milano, 1941, pag.137.
- 48 Pagliuca A., *Materiali Made in Italy. Avanguardia italiana nell'industria delle costruzioni del primo '900*, Gangemi Editore, Roma, 2019, pagg.626-646.
- 49 *La scrematrice a centrifuga, inventata da Gustav de Laval nel 1877, in breve tempo divenne la pietra angolare delle cooperative casearie in Danimarca, Olanda e Irlanda*, in Andreson P., *Storia d'Europa*, volume 1, Giulio Einaudi Editore, 1996, pag.350.
- 50 La produzione delle fibre tessili artificiali in Italia e nel mondo, in *Vedere. Le fibre tessili artificiali*, periodico unico supplementare della rivista *Sapere*, fascicolo n.153, Milano, Maggio 1941, Hoepli, Milano, 1941, pag.86.
- 51 *Ibidem*.
- 52 Rivista *Sapere. Quindicinale di divulgazione* del 15 Marzo 1937, Hoepli, Milano, pag.153.
- 53 La produzione delle fibre tessili artificiali in Italia e nel mondo, in *Vedere. Le fibre tessili artificiali*, periodico unico supplementare della rivista *Sapere*, fascicolo n.153, Milano, Maggio 1941, Hoepli, Milano, 1941, pagg.88-91.
- 54 Rivista *Sapere. Quindicinale di divulgazione* del 15 Marzo 1937, Hoepli, Milano, pag.155.
- 55 Giudici O. (1944), op. cit. (vedi nota 35).
- 56 Quaglierini C. (2012), op. cit. (vedi nota 19), pag.148.
- 57 Curran M., *Environmental Life-Cycle Assessment*, McGraw-Hill Education, 1996.
- 58 Walstra P., *Physical Chemistry of Foods*, CRC Press, 2002.
- 59 Quaglierini C. (2012), op. cit. (vedi nota 19), pag.37.
- 60 *Ibidem*.
- 61 «Anfotero»: in chimica, sostanza che, potendo cedere o accettare elettroni, è in grado di funzionare sia come acido sia come base. Si comportano in questo modo l'acqua, molti alcoli, alcuni idrossidi metallici, gli amminoacidi etc., in "Treccani - Istituto della Enciclopedia Italiana fondata da Giovanni Treccani S.p.A.".
- 62 Quaglierini C. (2012), op. cit. (vedi nota 19), pag.148.
- 63 Lavagna M., Mondini D., Paleari M. *Murature ad alte prestazioni. Valutazioni termiche, acustiche, ambientali ed economiche di soluzioni di involucro in laterizio*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2011, pagg.243-246.
- 64 A.I.P.E. - Associazione Italiana Polistirene Espanso, *Il piacere della casa isolata*.

04

04 Analisi matriciale comparativa tra la fibra biopolimerica a base di caseina e gli isolanti convenzionali e di nuova generazione

Sinòpsi Nel panorama della sostenibilità e dei modelli di Green Economy e Green Deal, l'isolamento termico ed acustico rappresenta una esigenza imprescindibile per una architettura sempre più efficiente, sotto ogni profilo. Nella riqualificazione e nella rigenerazione del patrimonio edilizio, come anche nell'ambito della costruzione *ex novo*, la scelta di un materiale isolante non è solamente subordinata alla verifica della termotrasmissione ma - per una progettazione completa ed esaustiva - al soddisfacimento di tutti gli obiettivi qualitativi e tecnico prestazionali rilevanti e all'insieme delle caratteristiche materiche e funzionali. Ciò anche in relazione alla sostenibilità dell'intero ciclo di vita ed ai parametri della Green Deal Economy. Il presente capitolo analizza sistematicamente le caratteristiche e le potenzialità commerciali della fibra biopolimerica a base di caseina prototipata rispetto ai prodotti appartenenti alle principali famiglie di isolanti (organici-naturali, organici-sintetici, inorganici-naturali, inorganici-sintetici, anche di nuova generazione) sintetizzando i risultati all'interno di un quadro matriciale comparativo. I materiali isolanti sono presentati in apposite schede di riferimento elaborate al fine di creare una interfaccia semplice e completa, nonché un chiaro strumento comparativo con la nuova fibra sperimentata. Ne deriva uno strumento utile alla conoscenza e selezione consapevole del prodotto (o dei prodotti) più indicati per le specifiche applicazioni edilizie, da valutarci caso per caso, facilmente utilizzabile dai diversi *stakeholders*. In particolare, per ciascun materiale isolante, la ricerca approfondisce il grado di diffusione e di impiego nel mercato italiano, così come la loro sostenibilità ambientale (biodegradabilità, riciclabilità e rinnovabilità), fornendo una panoramica degli aspetti di *Life Cycle Assessment* e del relativo ecobilancio. La sistematizzazione di tali processi ha lo scopo di privilegiare, a parità di prestazioni, la scelta di materiali isolanti a ridotto impatto ambientale (a prescindere dalla natura di derivazione, naturale o sintetica), evidenziando la variabilità di tale parametro in relazione al contesto di impiego, mirando ad una progettazione integrata e oggettiva (non più autoreferenziale) dell'isolamento termico ed acustico. Inoltre, la sistematizzazione attraverso il quadro comparativo, fornisce un valido strumento di indagine di mercato preventiva alla prototipazione e commercializzazione del campione prototipale. La commercializzazione del prodotto è strettamente correlata ad indagini di mercato, all'analisi costi-benefici, alla definizione di forme di incentivazione nazionali ed europee ed alle prescrizioni in termini di efficientamento energetico, analizzando anche quali possono essere i potenziali rischi connessi all'investimento e alla domanda economica degli isolanti 'green' all'interno di un mercato sempre più frammentato. La disgregazione del mercato è sempre più acuita dalla presenza crescente di diverse tipologie di materiali isolanti e per il numero e per le differenti grandezze delle aziende di mercato. A questo si aggiunge la crescente attenzione legata alla validazione ed alla certificazione del prodotto, in linea con legislazione ambientale europea, sempre più vocata alla circolarità economica e alla adozione di modelli sostenibili di Green Economy. L'analisi di mercato condotta nel presente capitolo, infine, si pone come strumento strettamente correlato alla estensione europea ed internazionale del brevetto. Per la fibra biopolimerica a base di caseina e per il relativo pannello termoacustico è, quindi, importante valutare la dimensione del mercato degli isolanti per le diverse aree geografiche, i principali operatori del mercato ed il settore di applicazione (edilizia residenziale, edilizia non residenziale, industriale, richiesta di sistemi HVAC (Heating, Ventilation and Air Concitioning) e OEM (Original Equipement Manufacturer).

1. Differenti tipologie di materiali isolanti applicati per l'isolamento termico e acustico del patrimonio edilizio, © Fraunhofer WKI - Manuela Lingnau, Braunschweig.

4.1. Il mercato dei materiali isolanti nella transizione del Green Deal

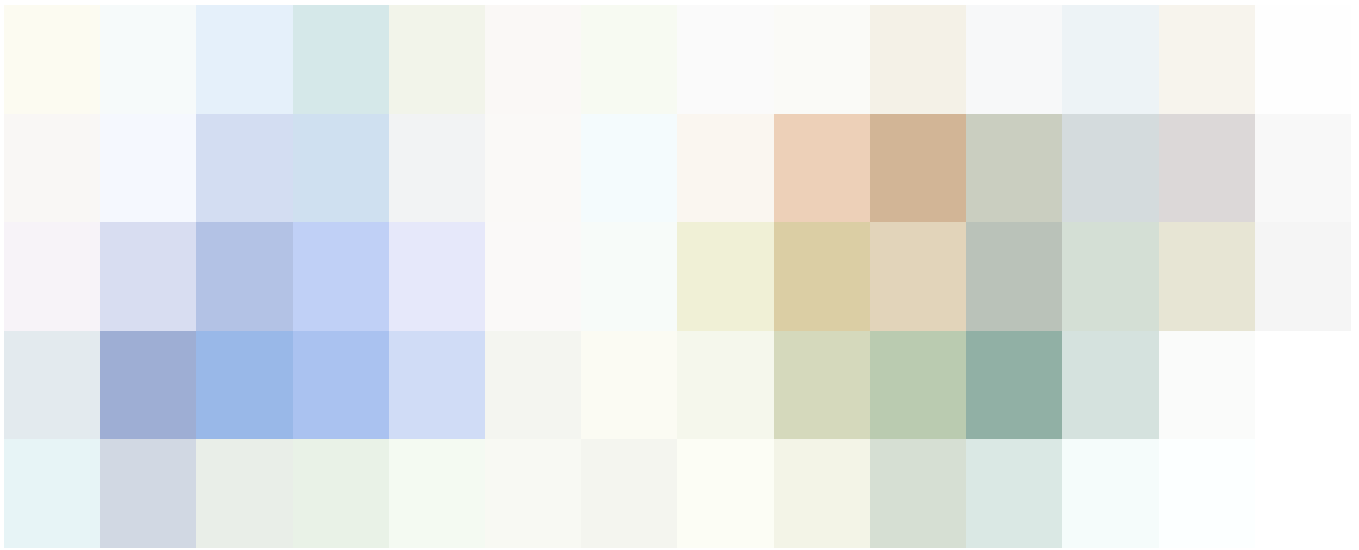
La transizione ecologica

Negli ultimi anni, l'industria delle costruzioni italiana ed europea ha subito una forte contrazione. Le incerte dinamiche del settore sono causate soprattutto dalla mancata ripresa degli investimenti, dall'incertezza economica e politica e da un calo di fiducia dei consumatori che compromettono annualmente le stime positive preannunciate¹. Secondo l'Autorità Europea, il rilancio dell'industria delle costruzioni può avvenire attraverso una "normativa prudenziale" atta a superare la logica liquidatoria che finora ha caratterizzato l'operatività delle banche e dei fondi di investimento, sviluppando un nuovo modello di economia circolare in grado di tutelare gli *stakeholders* incentivandoli mediante finanziamenti agevolati o crediti d'imposta e processi di riqualificazione edilizia con impatto positivo nei confronti dell'ambiente² sullo sfondo del processo transitorio ambientale del Green Deal (fig.2).

L'intento del Green Deal europeo è quello di trasformare la problematica ambientale e le sfide ambientali in opportunità in tutti i settori, tra i quali quello dell'efficiamento energetico degli edifici, della decarbonizzazione del settore energetico, del sostentamento dell'industria nell'innovazione e nella riduzione di inquinanti nei materiali. Nonostante l'inibizione del settore delle costruzioni, il mercato dell'isolamento termico è in costante crescita in tutta Europa e protagonista nella rivoluzione dell'economia sostenibile del Green Deal europeo. Complice è lo sviluppo della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio, catalizzato da una legislazione ambientale nazionale (Decreto Crescita, Legge di Bilancio, *Project bond*, Piano città, etc.), europea (*Green Deal*, EPBD - *Energy Performance of Buildings Directive*; Europa 2020, Direttiva 2018/844/UE, Codici Edilizi Europei, etc.) ed internazionali (Regolamenti sull'efficienza energetica del Dipartimento Statunitense per l'Energia - DOE, le USGBC - *US Green Building Council*, la EPA - *United States Environmental Protection*

2. Il piano di investimenti del Green Deal europeo, in Comunicazione della Commissione, *Il Green Deal europeo*, Bruxelles, 2019.





3

3. Mercato europeo dell'isolamento termico per regione europea (a sinistra) e per prodotto isolante (a destra). Elaborazione grafica in relazione ai dati forniti dalla società di consulenza IAL Consultants.

Agency, etc.), sempre più vocata alla sostenibilità e da una normazione dei prodotti sempre più propensa agli aspetti di rinnovabilità, riciclabilità, biodegradabilità, anche in relazione a protocolli di certificazione (CAM - Criteri Ambientali Minimi, EPD - *Environmental Product Declaration*, etc.)³⁻⁴ e dalla crescente richiesta di raggiungere elevati standard prestazionali dal punto di vista energetico⁵. Secondo le stime fornite dalla so-

Il mercato mondiale dei materiali isolanti

cietà di analisi di mercato *Grand View Research Inc.*, il mercato globale dell'isolamento si attesta a 27,98 miliardi di dollari (23,68 miliardi di euro) con un tasso composto di crescita annuale (CAGR - *Compound Annual Growth Rate*) del 4,8%⁶. L'aumento dei prezzi della plastica e la sua bassa biodegradabilità, danneggerà sempre più la crescita del settore degli isolanti sintetici, portando così allo sviluppo di prodotti alternativi.

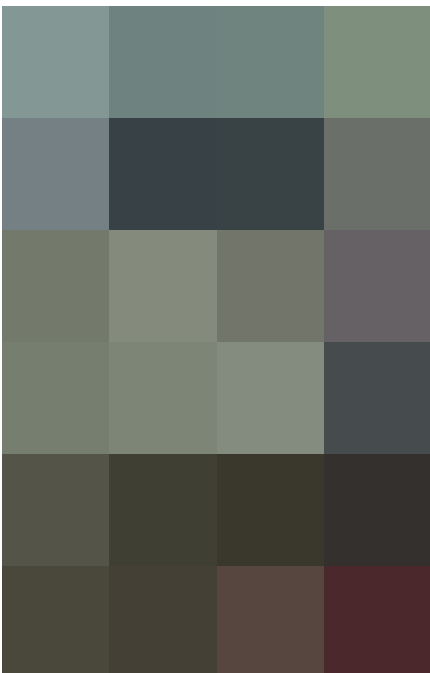
Secondo, invece, ricerche di mercato della società di consulenza *IAL Consultants*, emerge come il mercato totale dei prodotti per l'isolamento termico in Europa si è attestato a 270 milioni di metri cubi nel 2018 ed a 274,5 milioni di metri cubi nel 2019 con un aumento dell'1,6% rispetto al 2018 (fig.3). Secondo gli esperti, il mercato dell'isolamento termico è de-

stinato a crescere ad un tasso annuo del 2,2% fino al 2023. Ciò equivale ad un volume d'affari annuale intorno ai 15,1 miliardi di Euro⁷.

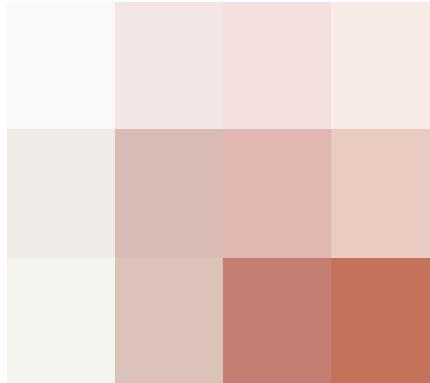
Il mercato globale dell'isolamento termico è comunque molto frammentato. Il problema risiede nella difficoltà di sistematizzare le diverse aziende produttrici presenti sul territorio nazionale ed europeo e distinguere le aziende che producono e vendono al mercato da aziende che si occupano della sola commercializzazione o della sola produzione. Inoltre, sono sempre più numerosi i nuovi materiali isolanti che subentrano nel mercato e che si differenziano - talvolta - nella sola denominazione, a parità di caratteristiche. Nella attuale situazione di mercato dell'industria delle costruzioni, la conoscenza approfondita di proprietà e caratteristiche dei diversi materiali isolanti diviene imprescindibile; la scelta (spesso autoreferenziale) del prodotto da utilizzarsi per l'isolamento termico in un intervento edilizio è invece spesso relegata all'analisi di poche caratteristiche. Lo dimostra il fatto che gran parte del mercato (56%) sia dominato dalla lana di vetro e di roccia (materiali principalmente utilizzati per le loro caratteristiche di resistenza al fuoco) e dal polistirene sinterizzato - EPS e dal polistirene espanso - XPS (31%), la cui commercializzazione è favorita dal prezzo molto basso rispetto agli altri competitor⁷. Gli stessi produttori nell'intento di

scardinare logiche di scelta tradizionali e approssimative, stanno cercando di promuovere materiali *green* ed eco-compatibili in un mercato sempre più vocato alla sostenibilità ambientale ed energetica, del *Life Cycle Assessment* dei materiali e del relativo ecobilancio. Per tale motivo, le moderne industrie hanno virato la propria attività produttiva verso modelli di sviluppo economico ecosostenibili⁸.

Tra questi, la Green Economy valuta l'impatto che le azioni umane e dei relativi processi di produzione hanno sull'ambiente, cercando di innescare un modello virtuoso che permetta di gestire al meglio le risorse, ottimizzando quanto più possibile la produzione, accrescendo il PIL e diminuendo drasticamente le emissioni di CO₂ nell'ambiente preservando l'ecosistema e la biodiversità. Un modello economico che per assonanza ("lotta agli sprechi, risparmio energetico, tutela e valorizzazione del suolo naturalizzato, bioedilizia, energie rinnovabili, mobilità sostenibile") ricorda quella che Marino Ruzzenenti definisce «*Autarchia Verde. Un involontario laboratorio della Green Economy*»⁹, rilettura contemporanea delle logiche economiche sviluppate a partire dal New Deal dopo la crisi del 1929¹⁰.



4



5

4. Manifesto "Torino e l'autarchia", @ Domenico Chiaudrero, 1937.
5. Elaborazione grafica della locandina storica "Acquistate prodotti italiani" del Comitato Prodotto Italiano.

"In questo 'attimo' l'umanità ha saputo approfittare di un'enorme, ma non infinita, quantità di energia che il Pianeta aveva accumulato in milioni di anni, i combustibili fossili [...] impiantando apparati industriali che hanno cambiato il volto del Pianeta; ha costruito una tecnosfera che si è sovrapposta alla biosfera. [...] Con il New Deal a seguito della crisi del 1929, [...] ogni nazione dovette far fronte alla necessità di rimodellare la propria economia e società facendo affidamento esclusivamente su risorse che, a parte un po' di metano e di carbone e alcuni minerali, erano essenzialmente quelle dell'agricoltura e del sole; la stessa condizione che si prospetta in un prossimo futuro all'intero Pianeta con l'esaurimento dei combustibili fossili, [...] in un involontario e obbligato esperimento di "economia verde". Volenti o nolenti, il 'passato è prologo'"

- Marino Ruzzenenti

Il mercato italiano dei materiali isolanti

Per valutare il potenziale commerciale del campione prototipale è necessario analizzare sistematicamente le caratteristiche dei prodotti appartenenti alle principali famiglie di isolanti (*organici-naturali, organici-sintetici, inorganici-naturali, inorganici-sintetici*, anche di *nuova generazione*) sintetizzando i risultati all'interno di un quadro matriciale comparativo e comparandolo con le caratteristiche del campione prototipale in fibra biopolimerica a base di caseina (fig.6).

Ne deriva uno strumento utile alla conoscenza e selezione consapevole del prodotto (o dei prodotti) più indicati per le specifiche applicazioni edilizie, da valutarsi caso per caso, facilmente utilizzabile dai diversi *stakeholders* (tecnici, imprese, aziende fornitrici, enti accademici e di ricerca, etc.). Per ciascun materiale isolante, inoltre, sono state effettuate indagini di mercato prendendo in esame alcune delle fonti più accreditate e aggiornate in termini di diffusione dei prodotti isolanti maggiormente impiegati nel territorio nazionale.

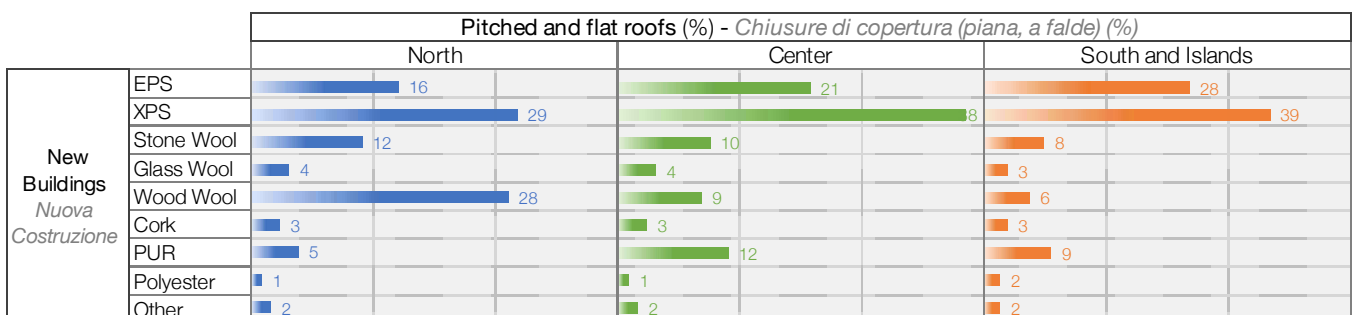
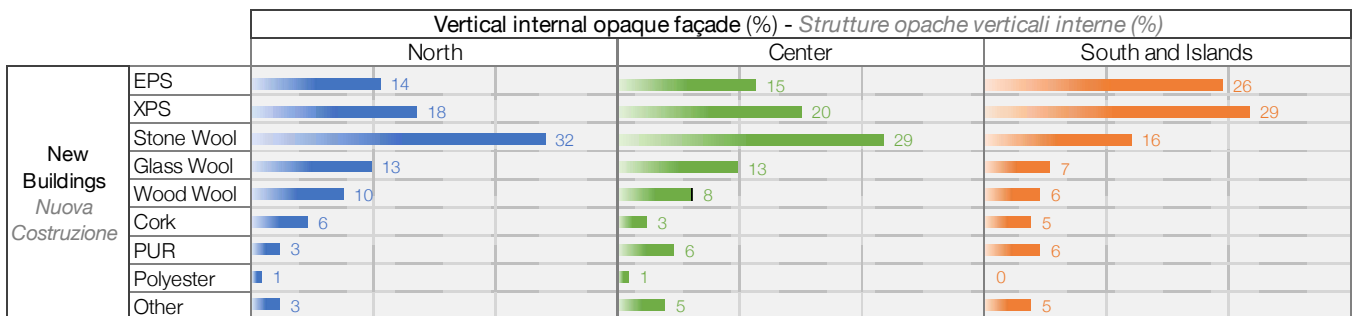
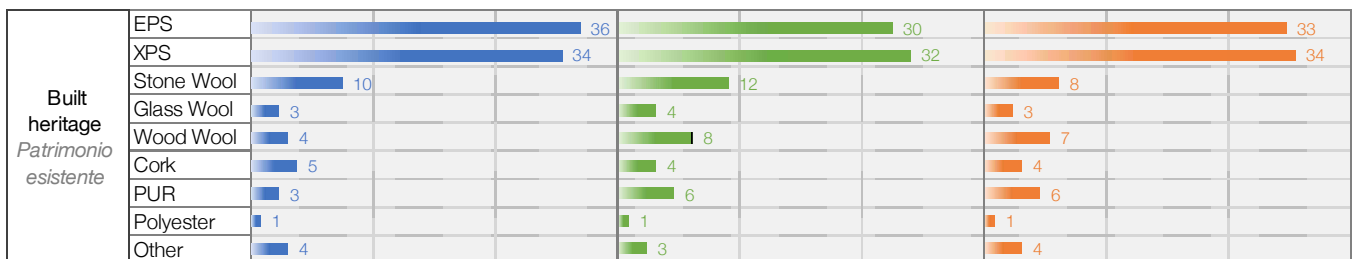
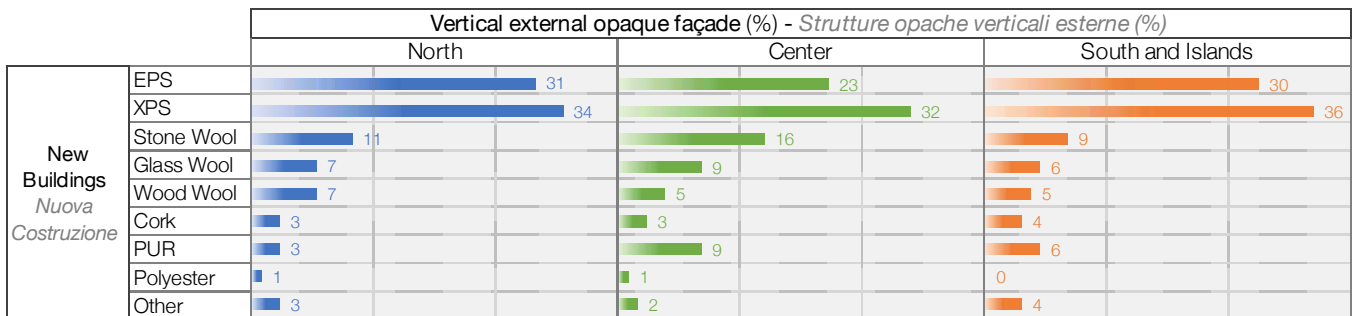
6. **Differenti famiglie di materiali isolanti applicati per l'isolamento termico e acustico del patrimonio edilizio, © Fraunhofer WKI - Manuela Lingnau, Braunschweig.**

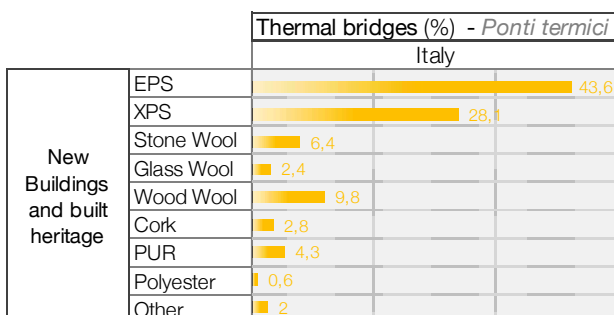
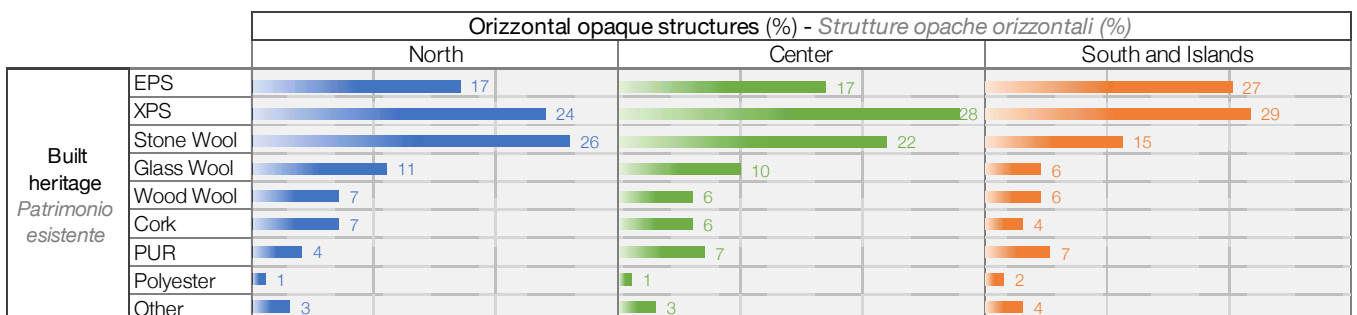
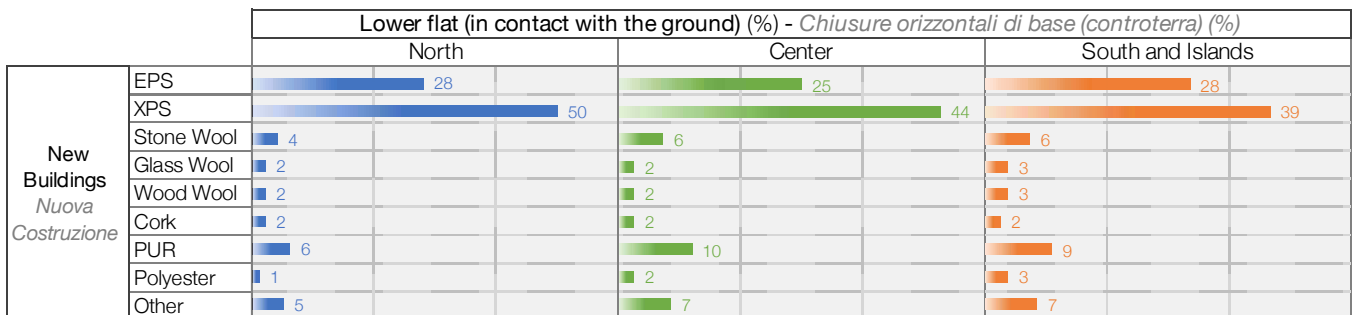
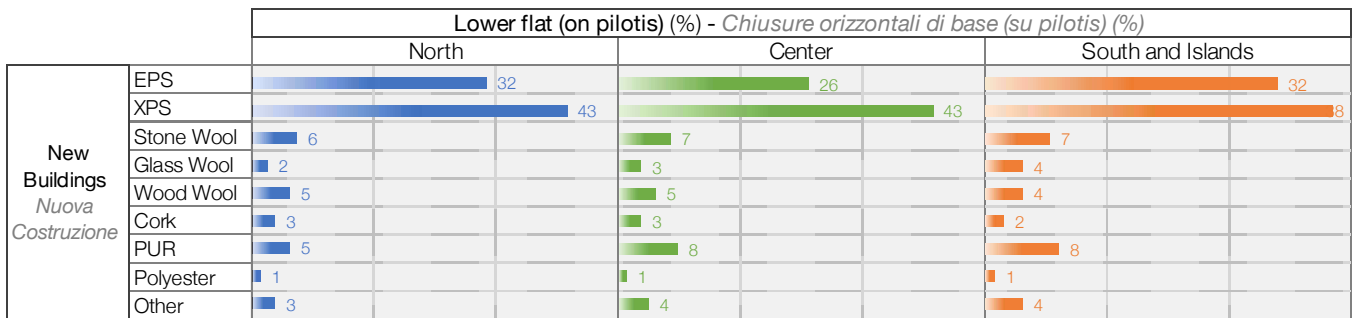
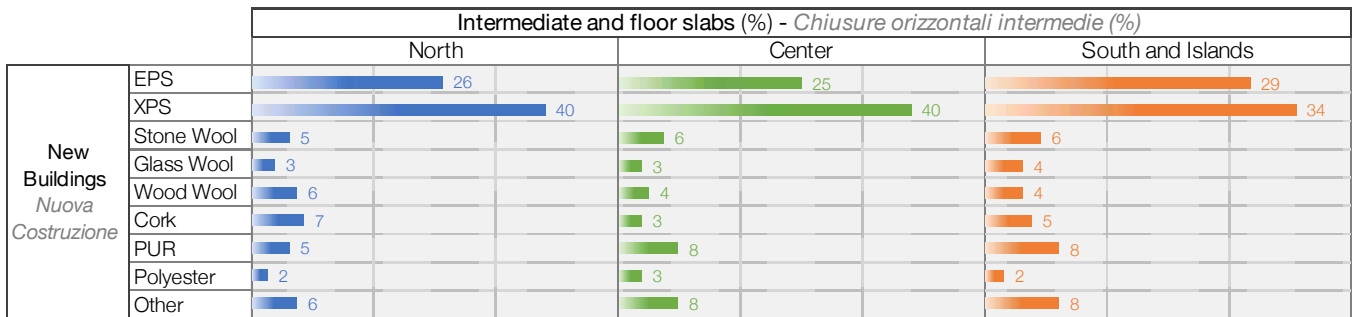


Lo scopo è fornire all'attualità l'indice di diffusione commerciale attualizzato relativo ai materiali isolanti più diffusi nella nuova costruzione e nella riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente, considerando la specificità di applicazione in diversi sistemi costruttivi e tecnologici (*strutture opache verticali esterne ed interne, chiusure di copertura piana, a falda, chiusure orizzontali intermedie, chiusure orizzontali di base su pilotis, chiusure orizzontali di base controterra, ponti termici*) e l'area geografica di riferimento (*Nord, Centro, Sud e Isole*).

I risultati elaborati forniscono una panoramica generale del mercato italiano degli isolanti e quali tra questi sono maggiormente allineati alle politiche europee di sostenibilità ambientale e Green Economy. Dalla elaborazione tabellare, inoltre, si evince quali sono le necessità di isolamento in relazione al sistema costruttivo analizzato, alla tipologia di intervento (*nuova costruzione o riqualificazione del patrimonio edilizio esistente*), e all'area geografica interessata (fig.7). Per esempio, tra Nord e Sud si riscontra una differenza di impiego

7. Indice di diffusione commerciale attualizzato relativo ai materiali isolanti più diffusi in commercio sia per edifici di nuova costruzione, sia per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente. Elaborazione grafico-matriciale sulla base dei dati forniti dal Rapporto Anit - Il mercato dei materiali isolanti in Italia, redatto da TEP srl.



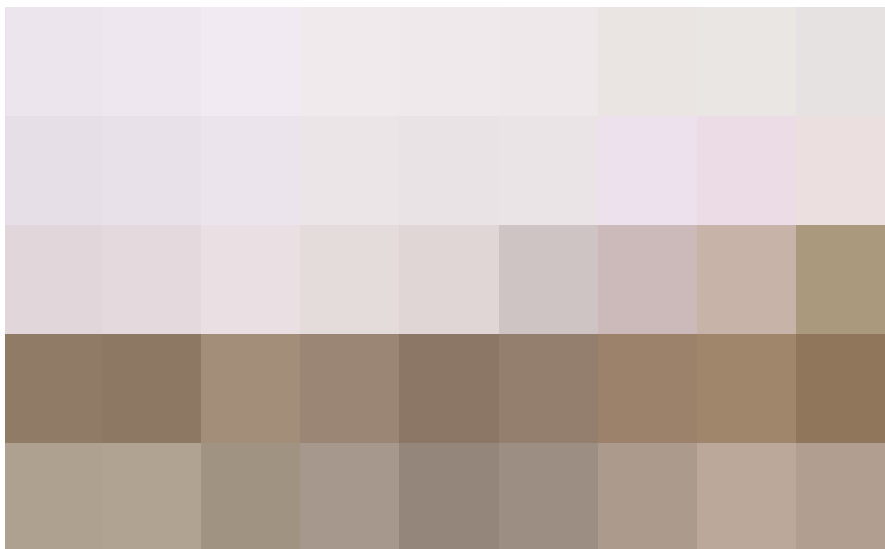


di materiali isolanti nel sistema costruttivo delle chiusure di copertura, in cui al Nord è predominante l'utilizzo di fibra di legno (28% rispetto al 6% dell'area meridionale), mentre al Centro-Sud si denota un maggiore impiego di isolanti sintetici come il poliuretano (12% rispetto al 5% dell'area settentrionale). In generale si può dedurre come in Italia il mercato degli isolanti vede il dominio sostanziale dei polistireni (EPS - XPS), seguiti dal poliuretano (PU) e dagli isolanti fibrosi (lana di vetro e lana di roccia), mentre i materiali isolanti naturali sono ancora relegati a sporadici interventi su tutto il territorio.

La preliminare indagine di mercato dei materiali isolanti non solo dimostra l'attuale avversione nell'impiego di materiali sostenibili in Italia, ma vuole comprovare come tra i professionisti e le imprese, la conoscenza di materiali alternativi a quelli consolidati, sia relegata ancora a pochi casi di bioedilizia (figg.8-9).

Il quadro comparativo, quindi, si pone come *vademecum* facilmente utilizzabile dagli addetti ai lavori in campo professionale, come pure da studenti e ricercatori che si immedesimano per la prima volta nella progettazione architettonica sostenibile in un panorama economico sempre più caratterizzato dai nascenti modelli di Green Economy e Green Deal.

8. Edificio residenziale nZEB per 40 abitazioni e locali commerciali realizzato con tecnologie costruttive in Biomattone di Canapa e Calce e sistema passivo con serre solari, realizzato a Bisceglie tra il 2012 ed il 2016 da Pedone Working srl.
9. Biomattone di Natural Beton © di canapa e calce, biocomposto naturale che riesce a soddisfare i requisiti di isolamento termico, acustico e igrometrico.



9

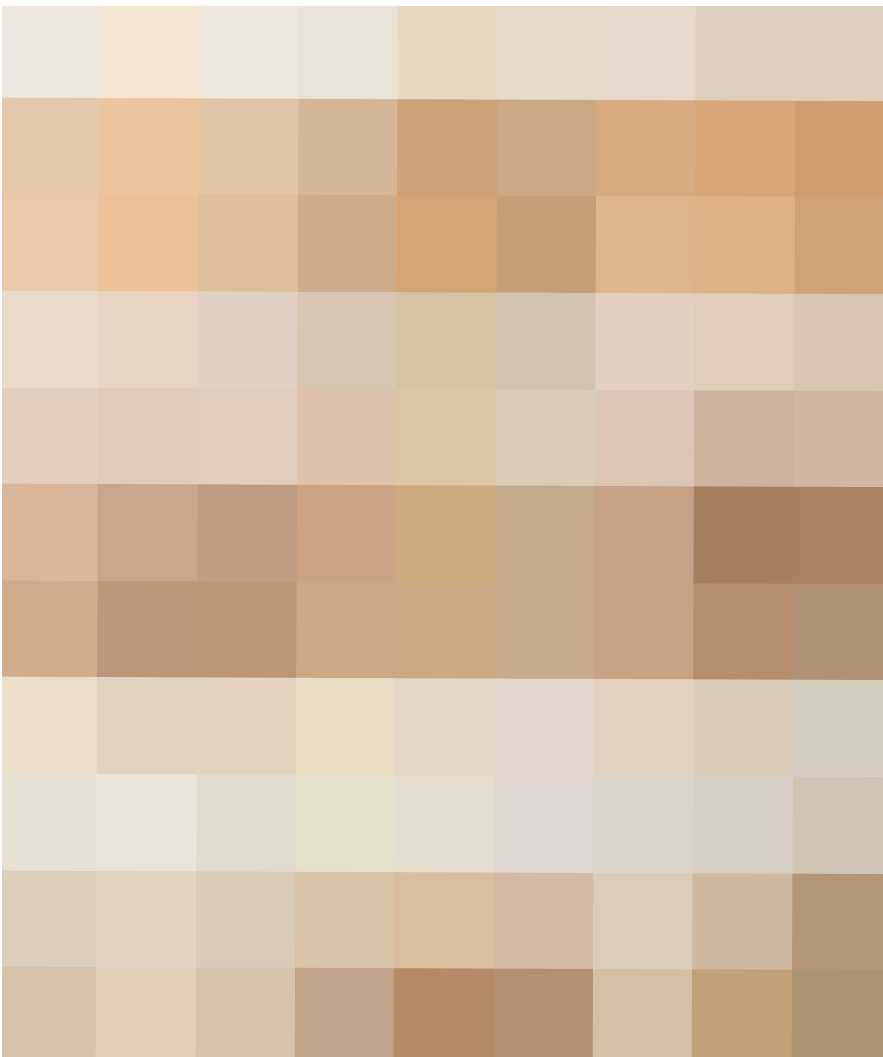


8

Specifico oggetto d'indagine della ricerca è anche la sperimentazione di innovativi materiali a matrice biopolimerica (tra cui il campione prototipale di fibra di caseina), che si presentano come valida alternativa nel vasto campionario dei materiali isolanti convenzionali, nel sempre più consolidato settore della bioedilizia e nella integrazione in architettura della filosofia del «*Material Ecology*»¹¹. Materiali talvolta sconosciuti (come gli isolanti naturali prodotti a partire da alghe marine, scarti di fico d'india, funghi (fig.10), etc.) che sono ampiamente analizzati nel quadro matriciale comparativo fornendo - con una lettura immediata - i requisiti, le caratteristiche tecniche e i vantaggi/svantaggi in termini prestazionali in relazione al sistema costruttivo preso in esame. Attraverso lo schema è possibile, inoltre, confrontare i dati di materiali isolanti green/innovativi con i mate-

riali isolanti convenzionali o consolidati nel mercato: si denota come 'materiale green' non è sempre sinonimo di materiale sostenibile e, viceversa, materiali sintetici (come i polistireni) non sempre possono ritenersi materiali dal bilancio ambientale negativo. A titolo esemplificativo, la fibra di cocco è un materiale isolante naturale, ma presenta un bilancio ambientale negativo legato al trasporto, soprattutto se impiegato in Italia. Anche la fibra di kenaf, isolante sempre più impiegato in Italia, presenta un bilancio ambientale decisamente negativo, dovuto non solo all'energia consumata (e alla immissione di CO₂ nell'ambiente) nella fase trasporto dalle regioni tropicali, ma soprattutto dalla ingente richiesta di acqua utilizzata per drenare costantemente il suolo di coltivazione. Per contro, i materiali isolanti polistirenici (EPS e XPS) e il poliuretano, nonostante la loro produzione di natura sintetica e quindi di natura fossile, possono considerarsi dei materiali isolanti sostenibili e con un impatto ambientale ridotto, in quanto l'efficienza energetica che producono durante il loro ciclo di vita, porta ad una riduzione delle emissioni di CO₂ derivante dal riscaldamento e dal raffrescamento di un edificio compensando, quindi il consumo di energia necessaria per l'estrazione del combustibile e per la produzione del prodotto. Tale sistematizzazione di tali processi ha lo scopo di privilegiare, a parità di prestazioni, la scelta di materiali isolanti a ridotto impatto ambientale (a prescindere dalla natura di derivazione, naturale o sintetica), evidenziando la variabilità che tale parametro può assumere in relazione al contesto, ad una adeguata progettazione integrata ed a basso costo e, talvolta, dall'oggettività del professionista demandato alla scelta del materiale¹²⁻¹³. Tale obiettivo, infatti, è raggiungibile nel progetto di interventi che recepiscono elementi costruttivi industrializzati, impianti efficienti e nuovi materiali per la realizzazione di rivestimenti con stratificazioni ad alte prestazioni con sistemi costruttivi a secco¹⁴⁻¹⁵⁻¹⁶.

10. Mogu@, biomateriale isolante prodotto da Mycoplast (azienda di Inarzo - Varese) mediante una miscela di funghi, © Mogu srl - Inarzo (Varese).



Tornando ai dati elaborati in fig.7, essi sono desunti dal report «Il mercato dei materiali isolanti in Italia - Dati di volume generali e andamento 2005-2013» sviluppato dalla A.N.I.T. (Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e acustico), che ha ricostruito l'andamento del mercato dei materiali isolanti in Italia elaborando i seguenti dati:

- *dati di volume di vendita*, espressi in m³ e resi disponibili dalle aziende;
- *dati di fatturato*, espressi in €, resi disponibili dalle aziende;
- *dati di conti economici* derivanti dalle Camere di Commercio o da altre fonti ad esse riconducibili;
- *dati di volume* derivanti dal fatturato o viceversa sulla base di valutazioni relative al rapporto fatturato medio/volume per le diverse tipologie di materiale.

I dati, assunti singolarmente, talvolta sono affetti da discordanze dal momento che il mercato dei materiali isolanti è caratterizzato da numerose tipologie, diverse modalità di applicazioni e diversi soggetti (grandi e piccole imprese) che producono, commercializzano e installano tali prodotti. Per questo motivo i dati sono stati 'corretti', mediante un metodo di calcolo matriciale con lo scopo di intersecare i dati del rapporto A.N.I.T. con altre fonti ufficiali e specifiche per settori merceologici, fornendo dei valori più attendibili degli isolanti più commercializzati in Italia. Le fonti consultate sono:

- Rapporto C.R.E.S.M.E. (Centro Ricerche Economiche Sociologiche e di Mercato nell'Edilizia) – «Valutazione della convenienza e

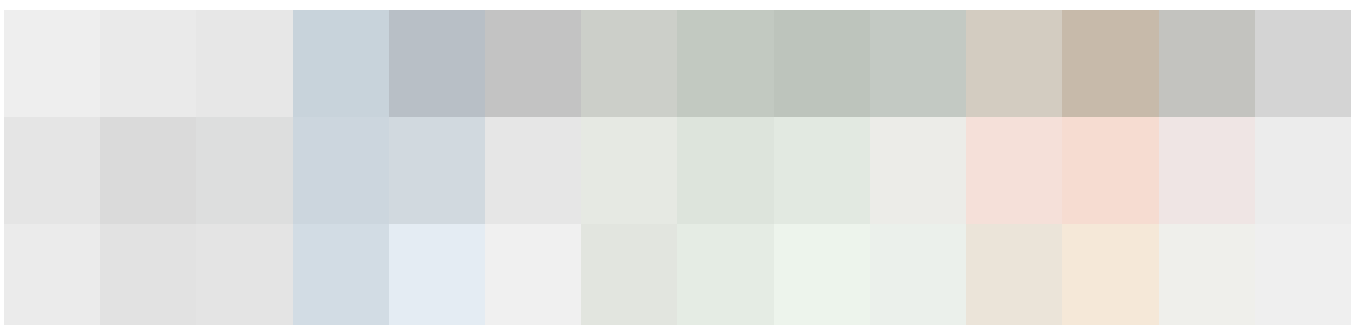
*dell'impatto economico dell'isolamento termo-acustico degli edifici»*¹⁷;

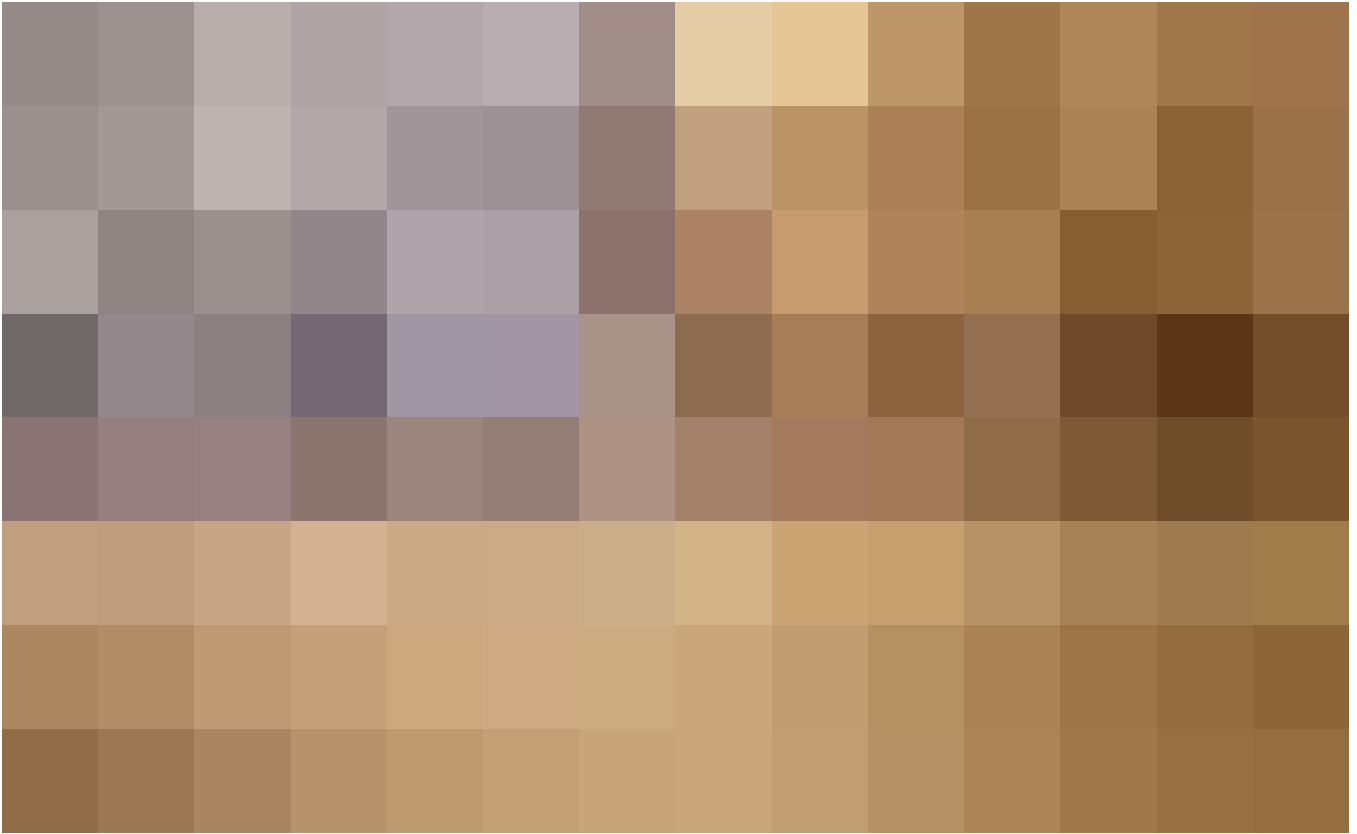
- Studio di mercato A.I.P.E. (Associazione Italiana Polistirene Espanso);
- Studio di mercato F.I.V.R.A. (Associazione italiana dei produttori di lane minerali);
- Rapporto A.N.I.C.T.A. (Associazione Nazionale Imprenditori Coibentazioni Termiche Acustiche);
- Rapporto Federchimica – Confindustria – «Il ruolo della chimica nel sistema delle costruzioni»¹⁸;
- Rapporto A.N.C.E. (Associazione Nazionale Costruttori Edili) a cura della Direzione Affari Economici e Centro Studi – «Osservatorio congiunturale sull'industria delle costruzioni»;
- Indagini telematiche ad aziende di settore.

A titolo esemplificativo, si riporta in fig.11 la validazione dei dati eseguita con il confronto tra il rapporto A.N.I.T. e i valori medi desunti dai rapporti A.I.P.E. – C.R.E.S.M.E. – A.N.C.E., eseguito nel 2005, in cui si evidenzia una minima discordanza dei dati dovuta alla esclusione di quote parte dedicate all'industria. Dei relativi dati, è stata effettuata una media aritmetica per l'ottenimento di una distribuzione media più precisa ed in linea con i dati effettivi di mercato (fig.11).

Trattandosi di un dato remoto (2005) e conoscendo la variazione percentuale del volume del mercato dei materiali isolanti fino al 2013, il valore medio è stato corretto ottenendo dei dati prossimi a quelli del mercato attuale: conoscendo, infatti, l'indice di incremento medio (4,50%) degli anni 2013-2021, fornito dal rapporto

11. Confronto dati della distribuzione percentuale stimata del mercato italiano degli isolanti nel 2005, tra il rapporto di mercato A.N.I.T. e la media aritmetica tra i valori desunti dai rapporti A.I.P.E., C.R.E.S.M.E. e A.N.C.E.. L'ultima colonna della tabella fornisce la distribuzione media di tutti i valori di mercato di ciascun rapporto (A.N.I.T., A.I.P.E., C.R.E.S.M.E. e A.N.C.E.).



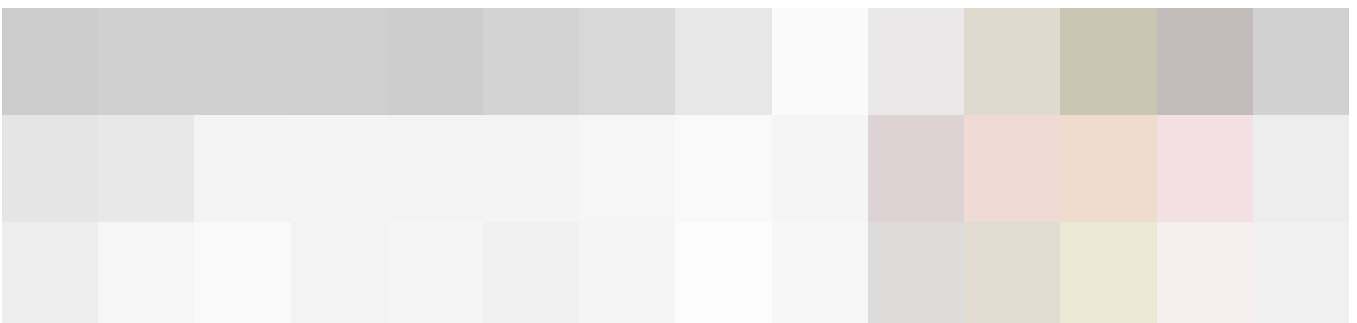


12

- 12. **Differenti famiglie di materiali isolanti applicati per l'isolamento termico e acustico del patrimonio edilizio, © Fraunhofer WKI - Manuela Lingnau, Braunschweig.**
- 13. **Variazione percentuale del volume di mercato dei materiali isolanti dal 2006 al 2013. Il dato remoto (riferito alla parentesi temporale 2006-2013) è stato corretto con un valore di attualità di incremento (pari al 4,50%) per allineare il dato storico all'attualità. I risultati attualizzati sono rappresentati nella tabella dei dati corretti (correct data).**

Anit, i valori percentuali ottenuti nella distribuzione media per ciascun materiale isolante sono stati moltiplicati per l'indice di incremento medio, ottenendo dei dati corretti all'attuale situazione di mercato. I dati, sintetizzati, forniscono un quadro complessivo dei materiali isolanti maggiormente impiegati in Italia (fig.12). Tralasciando gli isolanti in fibra di legno, in sughero e poliestere (dei quali non è stato possibile reperire delle informazioni attendibili), si conferma come il mercato degli isolanti attuale in Italia è all'attualità ancora dominato dai materiali sintetici e inorganici (EPS, XPS, PUR, fibra di vetro), mentre nel valore 11,60% sono inglobati tutti i restanti materiali isolanti di origine naturale e di nuova generazione (fig.13).

Inoltre, l'andamento percentuale del mercato complessivo non è direttamente correlabile all'andamento del mercato per le singole tipologie di materiali isolanti in quanto sono influenzati da una serie di fattori estrinseci. Il dato, quindi, dovrebbe tenere conto di ulteriori fattori come il grado di importanza del sistema costruttivo analizzato e del relativo contributo nella dispersione energetica, le prescrizioni legislative che all'attualità impongono obbligatoriamente l'impiego di isolanti certificati e armonizzati in merito al comportamento al fuoco, alla sostenibilità ambientale, ai limiti di trasmittanza e alla necessità di correzione dei ponti termici, delle differenti zone climatiche nazionali, la facilità di posa in opera ed il grado di soggettività del tecnico.



13

4.2. Analisi matriciale comparativa

Le principali famiglie dei materiali isolanti naturali e sintetici

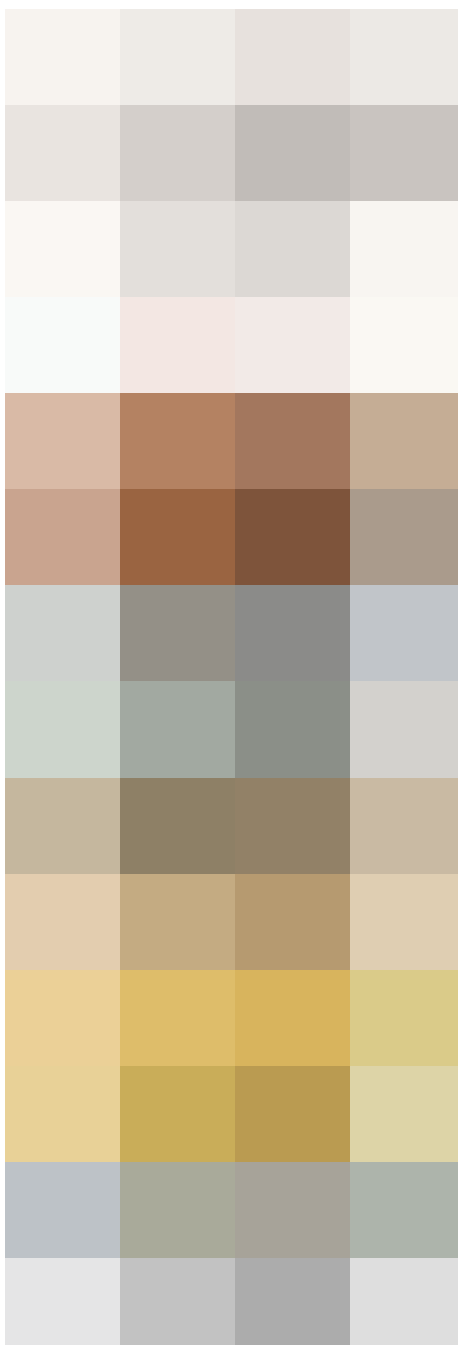
Il quadro matriciale comparativo proposto analizza sistematicamente caratteristiche, prestazioni e metodi di applicazione delle principali famiglie di isolanti (fig. 14), comparandoli con il campione prototipale del pannello termoisolante in fibra a matrice biopolimerica a base di caseina, ovvero:

- *materiali isolanti organici di origine naturale*: derivati da materie di

origine naturale, che non presentano componenti di origine sintetica o petrolchimica. Essi sono prodotti a partire da materie prime rinnovabili, riciclate e biodegradabili ed hanno un ecobilancio positivo grazie al basso contenuto di energia richiesto per il loro ciclo di vita¹⁹;

- *materiali isolanti organici di origine sintetica*: derivati da materie prime naturali (carbonio), prodotti con metodi industriali di origine chimico-sintetica e petrolchimica. Essi - in relazione al metodo

14. Principali famiglie di isolanti sintetizzate all'interno del quadro matriciale comparativo tra gli isolanti convenzionali ed il campione prototipale in fibra biopolimerica a base di caseina.



Campione prototipale

Pannello termoisolante in fibra a matrice biopolimerica a base di caseina

A. Materiali isolanti organici-naturali

Fibre di lana, di canapa, di kenaf, di lino, di legno, di cocco, di juta, di cotone, di cellulosa, di paglia, di alga, Lana di legno mineralizzata Sughero naturale ed espanso canna palustre, terra cruda e fibra di juta.

B. Materiali isolanti organici-sintetici

Fibra di poliestere, Polistirene espanso ed estruso (e con grafite), Poliuretano espanso fossile e naturale, Polietilene espanso, Polipropilene espanso, Resine ureiche e fenoliche, Gomma, Elastomeri, Fibre tessili.

C. Materiali isolanti inorganici-naturali

Vermiculite espansa, Vermiculite espansa e legante idraulico, Argilla espansa sfusa, Argilla espansa e legante idraulico, Perlite espansa sfusa, Perlite espansa e legante idraulico, Pomice naturale.

D. Materiali isolanti inorganici-sintetici

Lana di vetro, Lana di vetro e alluminio, Lana di roccia, Lana di roccia bitumata, Lana di roccia e gesso rivestito, Vetro cellulare espanso, Silicato di calcio.

E. Materiali isolanti di nuova generazione

Aerogel, Vacuum insulating panels - VIP, Phase change Materials - PCM, Isolanti riflettenti, Rasante termico fotocatalitico, Super Insulating materials - SIMs, Gas-Filled panels - GIPs.

Proprietà primarie

Densità o massa volumica (ρ);
Conducibilità termica (λ);
Calore specifico (C_p);
Resistenza alla diffusione del vapore (μ);
Coefficiente di assorbimento acustico (α);
Reazione al fuoco (classe);
Rilascio di fumi (s) e gocce (d);
Assorbimento d'acqua;
Resistenza meccanica.

Caratteristiche complementari

Leggerezza;
Facilità di posa in opera;
Basso spessore;
Elastico;
Inalterabile;
Res. meccanica, fisico/chimica, abrasione;
Resistenza ai microrganismi;
Stabilità dimensionale termica;
Igroscopticità e Idrofilia;
Ermeticità;
Imputrescibilità.

Sistema tecnologico

Chiusure orizzontali di base;
Chiusure di copertura;
Chiusure orizzontali intermedie;
Chiusure verticali;
Partizioni interne;
Contropareti, controsoffitti;
Rivestimenti e finiture.

Sostenibilità

Biodegradabile;
Rinnovabile;
Riciclabile.

Posa in opera

Posa in opera "a secco";
Posa in opera con malte;

di produzione chimica - possono essere della tipologia fibrosa o cellulare¹⁹;

- *materiali isolanti inorganici di origine naturale*: derivati da materie di origine inorganico naturale (minerali), prodotti con processi meccanici di lavorazione dei minerali (frantumazione, espansione, etc.). Essi possono essere di tipo fibroso e poroso¹⁹;
- *materiali isolanti inorganici di origine sintetica*: derivati da materie di origine inorganico naturale (minerali) e da scarti di lavorazione (vetro riciclato, scorie d'altoforno, etc.), prodotti con processi chimici e meccanici di lavorazione dei minerali. Essi possono essere di tipo fibroso, cellulare e poroso¹⁹;
- *materiali isolanti di nuova generazione*: materiali innovativi che comprendono isolanti compositi, riflettenti, sottovuoto, a cambiamento di fase, etc.¹⁹.

Nomenclatura, norme e proprietà primarie degli isolanti

Ogni materiale isolante è corredato con una scheda sintetica delle relative proprietà primarie, che forniscono una panoramica completa delle prestazioni espletate. In modo particolare, avremo:

- *Densità o massa volumica (ρ)*: la norma UNI EN ISO 7345:2018 definisce le grandezze fisiche utilizzate per la prestazione termica degli edifici, tra cui la densità, espressa come quantità di massa per unità di volume. La formula è:

$$\rho = m/V$$

in cui m rappresenta la massa (kg) e V il volume (m^3). La densità, quindi, si misura in kg/m^3 . La densità o la massa volumica sono certificati mediante prove di laboratorio e normazioni omologate ed il loro valore definisce la capacità transitorie dei materiali; solitamente valori elevati di densità

corrisponde valori di *sfasamento*²⁰ e *smorzamento*²¹ più elevati che migliorano sostanzialmente il comportamento energetico del sistema edificio e il comfort indoor. La densità e la massa volumica (quest'ultima determinata secondo la normativa UNI EN ISO 1602:2013), sono suscettibili dal contenuto di umidità; perciò esse devono essere ottenute in condizioni di equilibrio (Ur pari al 60%), come definito dalla normativa UNI EN ISO 10456:2008. La densità di un materiale è variabile, ovvero esiste un intervallo di valori di massa specifica che incide anche sulle prestazioni termiche dell'isolante: a densità inferiori, infatti, aumenta la trasmissione del calore per irraggiamento e convezione; a densità superiori, invece, aumenta la quota del flusso di calore trasportata per conduzione.

- *Conducibilità termica (λ)*: tale parametro, ottenuto in conformità alle normative (UNI EN 12664:2002; UNI EN 12667:2002; UNI EN 12939:2002; DIN 52612), definisce in condizioni stazionarie, il rapporto tra il flusso di calore ed il gradiente di temperatura che provoca il passaggio di calore. In altri termini, la conducibilità termica, indica la capacità del materiale isolante di trasmettere più o meno bene il calore. Questa capacità dipende dalla natura del materiale e non dall'aspetto morfologico e dimensionale. Nel Sistema Internazionale, la conducibilità termica si misura in $W/(m \cdot K)$ ed indica la potenza termica che attraversa un cubo di materiale con lato di un metro, per differenza di un grado Kelvin fra le due facce parallele²². Più basso è il valore di conducibilità termica migliore è la prestazione isolante del materiale. Secondo la norma DIN 4108, un materiale per definirsi "termo-isolante" deve possedere un valore di conducibilità termica minore o uguale $0,10 W/(m \cdot K)$. Tale valore può essere influenzato da numerosi fattori, come la composizione materica, la densità, la macrostruttura e

la microstruttura, il contenuto di umidità (generalmente un aumento del contenuto di umidità, comporta un innalzamento del valore di conducibilità) ed eventuali gas contenuti nelle cavità (es. isolanti porosi) e dalla temperatura.

- **Calore specifico (Cp):** la norma UNI EN ISO 10456:2008 e la ASTM E 1296, definiscono il calore specifico come la quantità di calore necessaria per aumentare di un grado Kelvin la temperatura di un'unità di massa (generalmente assunta di un chilogrammo) del materiale, ovvero:

$$C_p = Q / (m \cdot \Delta T)$$

in cui Q rappresenta la quantità di calore necessaria (J), m la massa (kg) e ΔT la differenza di temperature (K) tra le due superfici piane sollecitate. Il calore specifico, quindi, si misura, secondo il Sistema Internazionale, in J/(kg·K). Maggiore è il calore specifico, maggiore sarà la capacità di accumulo termico e di inerzia termica²³ del materiale, migliorando sensibilmente il comportamento delle strutture di involucro nella stagione estiva.

- **Resistenza alla diffusione del vapore (μ):** tale parametro si determina in conformità alla normativa UNI EN ISO 12086:2013. È un numero adimensionale che indica di quante volte il materiale è più resistente al passaggio di vapore rispetto ad uno strato equivalente di aria ferma. Tale parametro rappresenta la resistenza offerta alla diffusione del vapore: a valori elevati corrispondono maggiori resistenze e viceversa²⁴. Il parametro è altresì impiegato per analizzare il comportamento delle componenti di involucro nello studio della diffusione del vapore acqueo e nella valutazione al rischio di condensazione interstiziale²⁵. Solitamente i materiali isolanti sono permeabili al vapore con valori che dipendono dal tipo di struttura costituente il materiale (porosa, fibrosa, espansa, cellulare, etc.)

a eccezion fatta di tutti quei materiali isolanti compositi dotati di barriera al vapore (μ infinito) o del vetro cellulare, anch'esso considerato impermeabile al vapore.

- **Coefficiente di assorbimento acustico (α):** rappresenta la proprietà di un materiale di assorbire l'energia acustica. Il coefficiente è definito come il rapporto tra la potenza sonora assorbita e la potenza sonora incidente. Il valore di α rappresenta, quindi, la frazione di energia assorbita da un determinato materiale e può variare fra 0 (tutta l'energia incidente è riflessa), e 1 (tutta l'energia incidente è assorbita). Pertanto, se il valore del coefficiente di assorbimento acustico è $\alpha=0,6$, significa che il 60% dell'energia incidente sulla superficie del materiale è assorbita. Tuttavia, per un medesimo materiale il valore del coefficiente varia al variare delle frequenze, dell'angolo di incidenza dell'onda acustica e dalla morfologia della superficie²⁶ (fig.15). Per tale motivo è utilizzato il *coefficiente di assorbimento acustico ponderato* (α_w) ottenuto mediante confronto con una curva di riferimento secondo il metodo indicato dalla norma UNI EN ISO 11654²⁷.

15. Particolare della superficie booleana di un isolante acustico.



- 16. Prova di laboratorio per calcolare la classe di reazione al fuoco di un isolante, © Fraunhofer WKI - Manuela Lingnau, Braunschweig.
- 17. Simbologia della tabella delle Classi di reazione al fuoco, in D.M. 10 Marzo 2005.
- 18. Classi di reazione all'azione dell'incendio per i materiali da costruzione ad eccezione dei pavimenti, in D.M. 10 Marzo 2005.



16

Simbologia	
T	Aumento di temperatura
m	Perdita di massa
t	Durata dell'incendio
PCS	Potenziale calorifico lordo
FIGRA	Tasso di incremento dell'incendio
THR600s	Rilascio totale di calore
LFS	Propagazione laterale del fuoco
SMOGRA	Tasso di incremento di fumo
TSP600s	Produzione totale di fumo
Fs	Propagazione del fuoco

17

- *Reazione al fuoco (classe), Rilascio di fumi (s) e di gocce (d):* ogni Paese della comunità Europea prevede una normativa per la prevenzioni incendi e che tutti gli edifici siano realizzati in modo da prevenire l'insorgere degli incendi e di salvaguardare l'incolumità delle persone. L'Italia, con il D.M. del 10 Marzo 2005 ha adottato la classificazione in "Euroclassi" secondo la norma armonizzata UNI EN 13501 che definisce sette

classi di reazione al fuoco (A1, A2, B, C, D, E, F) ed introduce una classificazione accessoria quali: lo *sviluppo di fumo* (s1, s2, s3) e la *formazione di gocciolamento* durante la combustione (d0, d1, d2) (figg.17-18). Le classi di reazione al fuoco riguardano tutti i materiali da costruzione ad eccezione dei pavimenti. Per i materiali non ancora classificabili è ancora possibile utilizzare le normative o le legislature nazionali precedenti.

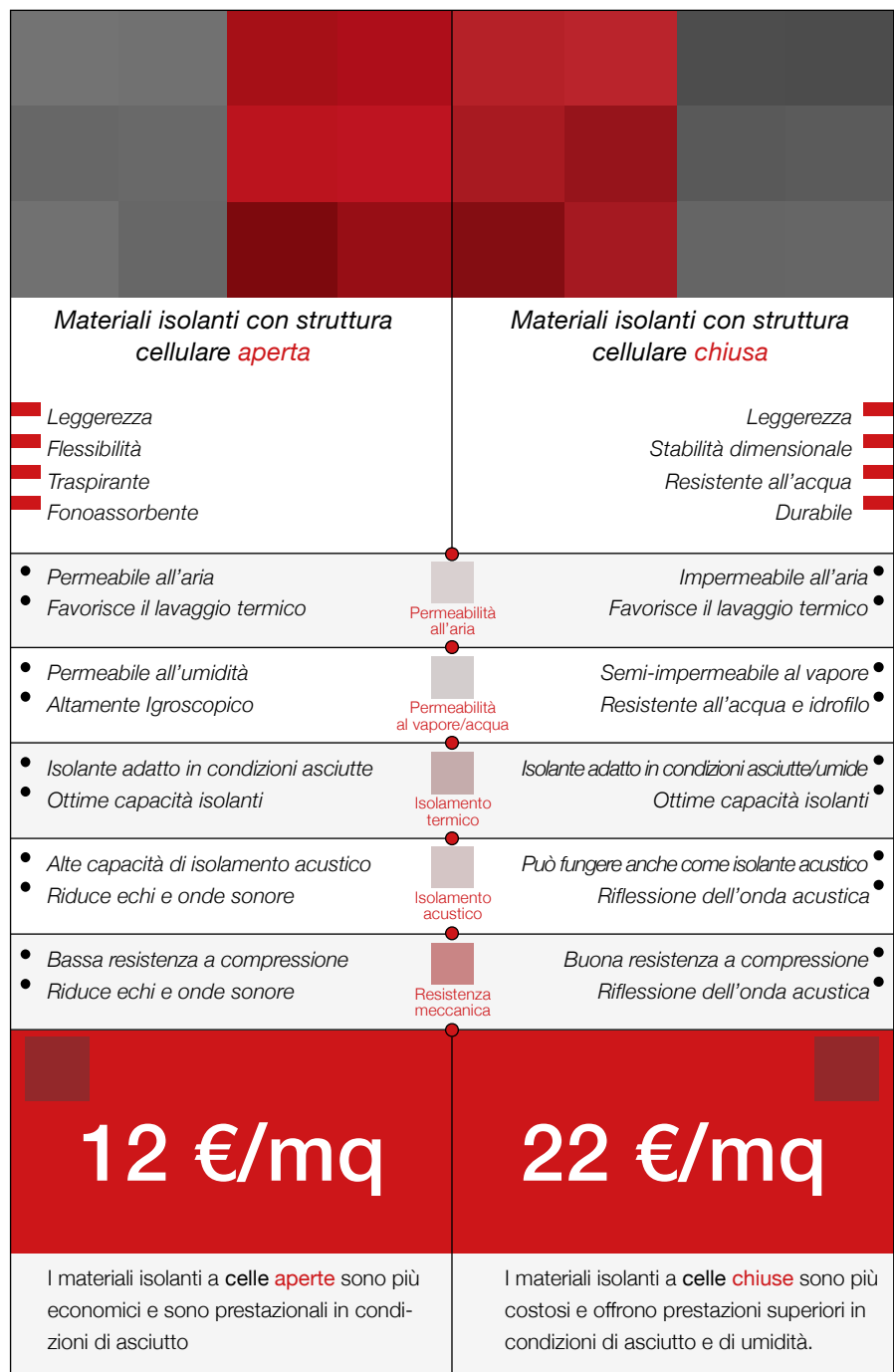
Classi di Reazione al fuoco			
Classe	Metodo (i) di prova	Criteri di classificazione	Classificazione aggiuntiva
A1	EN ISO 1182	T 30°C e m 50% e t= 0 (cioè incendio non persistente)	-
A2	EN ISO 1716	PCS 2,0 MJ kg-1; e PCS 2,0 MJ kg-1; e PCS 1,4 MJ kg-2; e PCS 2,0 MJ kg-1.	-
	EN ISO 1182	T 50°C e m 50% e t= 20s	-
	EN ISO 1716	PCS 3,0 MJ kg-1; e PCS 4,0 MJ m-2; e PCS 4,0 MJ m-2; e PCS 3,0 MJ kg-1.	-
	EN 13823 (SBI)	FIGRA 120 W s-1; e LFS margine del campione; e THR600s 7,5 MJ	Produzione di fumo; e gocce/particelle ardenti
B	EN 13823 (SBI)	FIGRA 120 W s-1; e LFS margine del campione; e THR600s 7,5 MJ	Produzione di fumo; e gocce/particelle ardenti
	EN ISO 11925-2 Esposizione = 30s	Fs 150mm entro 60s	
C	EN 13823 (SBI)	FIGRA 250 W s-1; e LFS margine del campione; e THR600s 15 MJ	Produzione di fumo; e gocce/particelle ardenti
	EN ISO 11925-2 Esposizione = 30s	Fs 150mm entro 60s	
D	EN 13823 (SBI)	FIGRA 750 W s-1	Produzione di fumo; e gocce/particelle ardenti
	EN ISO 11925-2 Esposizione = 30s	Fs 150mm entro 60s	
E	EN ISO 11925-2 Esposizione = 15s	Fs 150mm entro 20s	Gocce/particelle ardenti
F	Reazione non determinata		

18

• **Assorbimento d'acqua:** l'acqua rappresenta il nemico numero uno degli isolanti in quanto determina un peggioramento prestazionale del potere isolante. Durante le stagioni miti (in particolare l'autunno), l'umidità ambientale cresce notevolmente: questa condizione favorisce l'accumulo di umidità nei materiali con un conseguente aumento dello scambio termico tra ambiente interno ed ambiente esterno. Durante eventi piovosi si ha un aumento dell'umidità relativa, le temperature medio basse riducono l'evaporazione e si forma l'accumulo che può essere in forma d'acqua o come elevato grado di umidità interna. Il comportamento all'acqua dei materiali isolanti è regolato da due fattori: l'*igroscopicità* e l'*idrofilia*. L'*igroscopicità* è la capacità del materiale isolante di trattenere l'umidità, cioè l'acqua allo stato di vapore. L'*idrofilia*, invece, è la capacità di un materiale di legarsi con l'acqua allo stato liquido. Il legame è dovuto alla polarizzazione chimica del materiale che può o meno creare legami con l'acqua. Solitamente il potere idrofilo di un materiale tende a creare maggiori problemi rispetto alla capacità igroscopica: i materiali idrofili, infatti, hanno una scarsa propensione a rilasciare l'acqua accumulata e quindi - una volta imbibiti - non favoriscono l'evaporazione ed il lavaggio termico. Esse sono due proprietà distinte, ma a volte sono direttamente correlate, altre no. Ad esempio, nel caso della lana di pecora, sono totalmente opposte: è igroscopica ma non idrofila, quindi tende a respingere l'acqua. I materiali isolanti sia igroscopici sia idrofili, richiederanno particolari attenzioni riguardo la posa in opera e la protezione dagli agenti atmosferici. Nei materiali espansi, inoltre, il concetto di assorbimento d'acqua, assume un carattere mutevole in relazione alle due strutture: isolante a *celle aperte* e isolante a *celle chiuse*. I materiali espansi con struttura cellulare aperta sono contraddistinti da proprietà quali leggerezza, flessi-

bilità, ottimo isolamento termico e acustico. Per contro presentano scarsa resistenza a compressione ed una tendenza all'assorbimento dell'umidità e dell'acqua, riducendo drasticamente la capacità coibente del materiale. I materiali espansi a struttura cellulare chiusa, invece, presentano una ridotta permeabilità al vapore e una minore tendenza all'assorbimento d'acqua, una buona resistenza a compressione ed una buona resistenza termica, ma presentano costi più elevati (fig.19).

19. Schema comparativo tra materiali isolanti con struttura cellulare aperta e materiali isolanti con struttura cellulare chiusa.



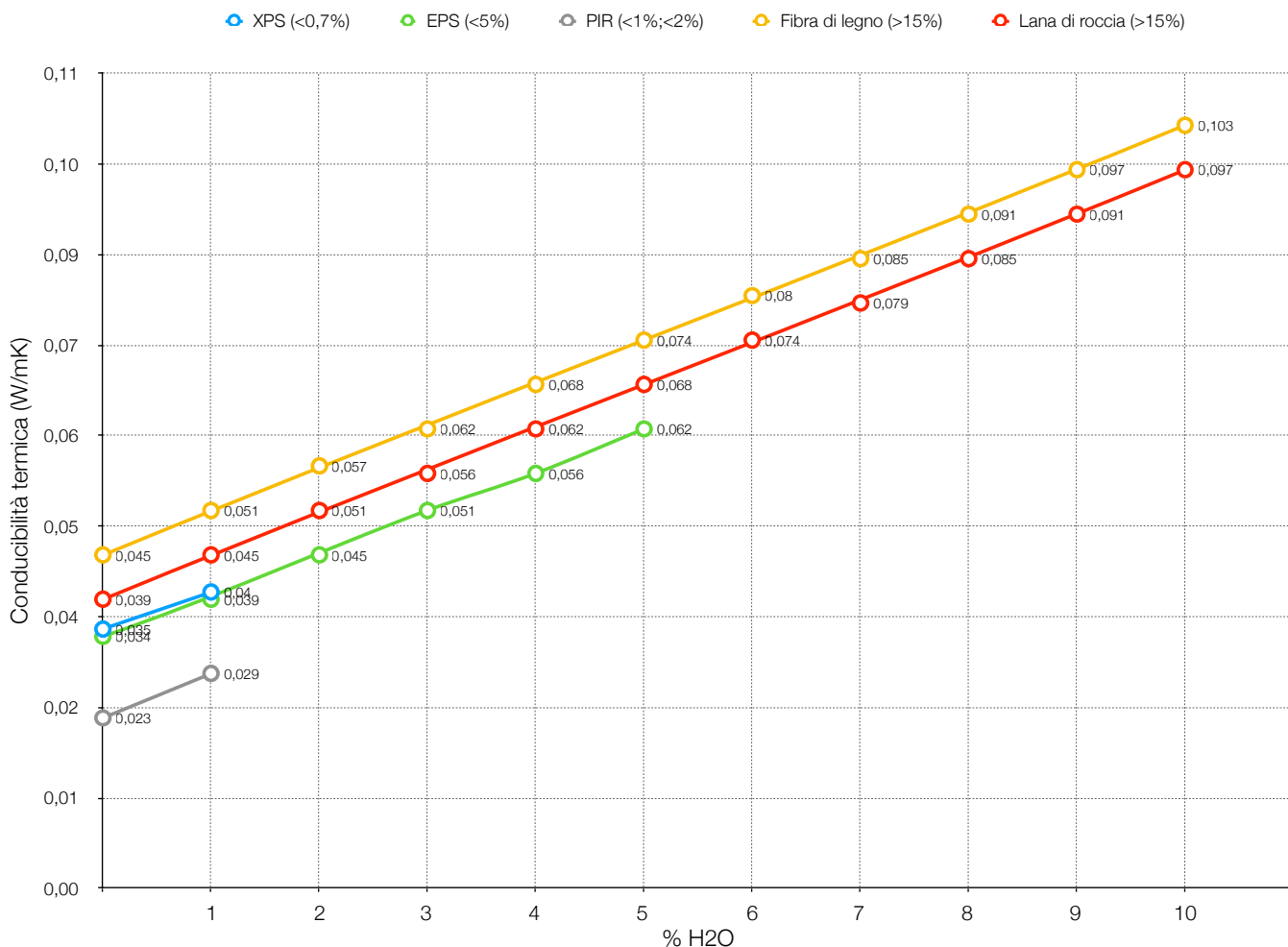
La normativa di riferimento per il calcolo dell'assorbimento d'acqua è la UNI EN ISO 16535:2019 e la UNI EN ISO 16536:2019, che definiscono rispettivamente l'assorbimento d'acqua a lungo termine per immersione e l'assorbimento d'acqua a lungo termine per diffusione.

L'assorbimento d'acqua a lungo termine per immersione viene determinato misurando la massa dei provini prima e dopo immersione totale per 28 giorni e viene indicato come volume %. Il codice di designazione nelle schede tecniche e nell'etichettatura CE è WL(T)i dove "i" è l'assorbimento percentuale. Ad esempio WL(T)3 vuol dire che il materiale assorbe una quantità inferiore al 3% in volume d'acqua. L'assorbimento d'acqua a lungo termine per diffusione, invece, indica la quantità d'acqua che il prodotto è in grado di assorbire quando è esposto a umidità relativa molto elevata (quasi

il 100% su entrambi i lati). Il codice di designazione nelle schede tecniche e nell'etichettatura CE è WD(V)i dove "i" è l'assorbimento percentuale. Ad esempio WD(V)5 vuol dire che il materiale assorbe una quantità inferiore al 5% in volume d'acqua. La norma UNI EN ISO 29767:2019, infine, definisce l'assorbimento d'acqua nel breve periodo per immersione parziale e specifica l'apparecchiatura e le procedure per terminare l'assorbimento d'acqua su breve periodo di provini tramite immersione parziale. Il codice di designazione nelle schede tecniche e nell'etichettatura CE è WS ed è espresso in Kg/m².

In conclusione è possibile affermare come anche una piccolissima percentuale di acqua (5-10%) porti ad un peggioramento esponenziale della conducibilità termica (doppia nel caso di materiali igroscopici) (fig.20).

20. Variazione della conducibilità termica in funzione dell'aumento del contenuto di umidità del materiale. Elaborazione grafica tratta dall'articolo di Ursini Casalena A., "Assorbimento d'acqua e conduttività termica dei materiali isolanti".



- Resistenza ai cicli di gelo/disgelo:** la presenza di umidità all'interno della struttura di una materiale isolante incide negativamente sulle prestazioni termiche. Durante la stagione invernale questa condizione è acuita nel caso di temperature prossime allo zero, in grado di innescare all'interno della stratigrafia isolante cicli di gelo e disgelo. Il congelamento dell'acqua produce un aumento di volume del liquido pari a circa il 10%, innescando uno stato tensionale soprattutto all'interno della struttura di isolanti macroporosi (fig.21). I numerosi cicli ripetuti durante il ciclo di vita dell'isolante comportano una riduzione della resistenza a compressione ed un aumento dell'assorbimento d'acqua nel tempo.

La normativa di riferimento per la determinazione della resistenza al gelo-disgelo è la UNI EN 12091:2013 che specifica l'apparecchiatura ed i procedimenti per determinare l'effetto di successivi cicli da condizioni di secco a -20°C a condizioni di umido a 20°C, sulle caratteristiche meccaniche e sul contenuto di umidità del prodotto. I codici di designazione nelle schede tecniche e nell'etichettatura CE sono: FTCDi dove "CD" indica che la tipologia di prova gelo/disgelo è avvenuta a seguito della prova di assorbimento d'acqua per diffusione, mentre "i" indica numericamente il livello raggiunto in funzione dell'assorbimento percentuale; FTDIi, dove "DI" indica che la tipologia di prova gelo/disgelo è avvenuta a seguito della prova di assorbimento d'acqua per immersione, mentre "i" indica numericamente il livello raggiunto in funzione dell'assorbimento percentuale.
- Resistenza meccanica:** i materiali isolanti sono generalmente elementi leggeri e, pertanto, presentano scarse resistenze meccaniche. Tale proprietà è strettamente correlata alla tipologia di struttura, dalla composizione materica e soprattutto dalla densità o massa volumica. Più la massa è elevata, tanto più il materiale è resistente a determinate sollecitazioni.

La resistenza meccanica è un requisito particolarmente importante quando il materiale isolante è impiegato nella stratigrafia orizzontale (soggetta alle sollecitazioni di compressione derivanti dai carichi permanenti e accidentali) o nella stratigrafia verticale (in cui è richiesta una resistenza maggiore agli urti). Per applicazioni specifiche, dove un certo livello di resistenza alla compressione è un requisito tecnico, i materiali isolanti che non sono in grado di resistere alla compressione, attraverso la deformazione possono causare microfessurazioni agli strati orizzontali (inficiando anche eventuali sistemi impiantistici), generando infiltrazioni, dispersioni e ponti termici.

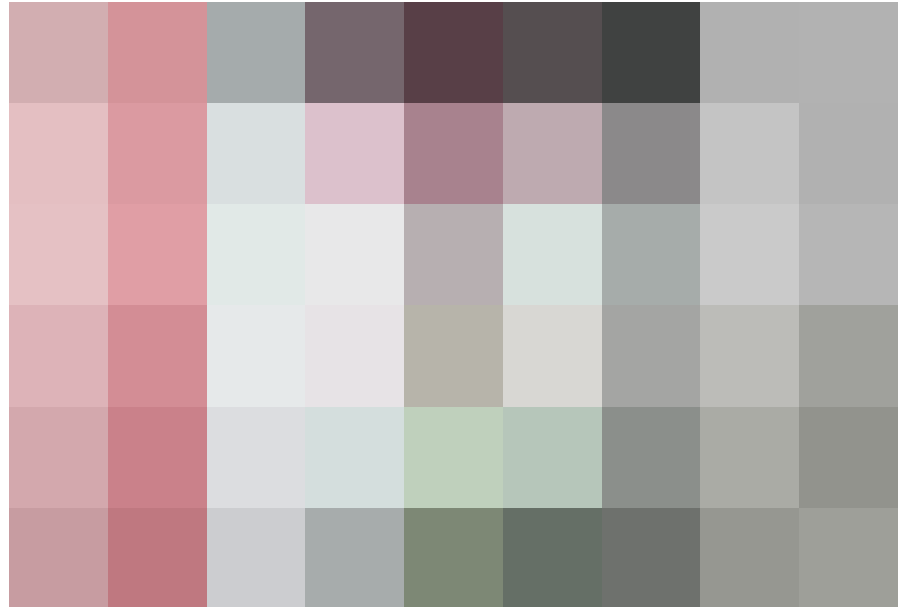
La *Resistenza alla compressione al 10% di deformazione* (definita nella norma UNI EN 826:2013) è un indice limite di compressione, misurato in kPa di un materiale isolante per la quale esso riduce del 10% il suo spessore (o la resistenza a compressione massima raggiunta quando la deformazione a snervamento o rottura è minore del 10%). Nelle schede tecniche e ne codice di designazione delle etichettature è riportato il più piccolo valore secondo le seguenti modalità:

 - CS(10)100, in cui la sollecitazione

21. Schema comparativo dei valori di variazione d'acqua e della resistenza a compressione dopo cicli di gelo/disgelo di alcuni materiali isolanti. Elaborazione grafica tratta dall'articolo di Ursini Casalena A., "Assorbimento d'acqua e conduttività termica dei materiali isolanti".

	Assorbimento d'acqua per immersione i (%)	Assorbimento d'acqua per diffusione i (%)		Riduzione percentuale di assorbimento d'acqua (%)	Riduzione percentuale di resistenza a compressione
XPS	< 0,7	< 3	>>>	< 1	< 10
EPS	3-5	5-20	300 cicli di gelo/disgelo	< 10-20	< 20
PUR	2-3	< 8	UNI EN 12091	< 15	< 20
Vetro cellulare	0	0		0	0

22. Prova di laboratorio su un provino di isolante XPS per la definizione della resistenza alla compressione al 10% di deformazione, definita dalla norma UNI EN 826:2013, © Styrodur.



22

ne che provoca la deformazione del 10% è di 100 kPa, quindi è minore della resistenza massima a compressione;

- CS(Y)100, ovvero la resistenza a compressione è di 100 kPa, in quanto non tutti gli isolanti raggiungono elasticamente il 10% di deformazione;
- CS(10/Y)100, è utilizzato quando non è possibile individuare il valore minimo tra i due indici anzidetti (CS(10)100 e CS(Y)100) (fig.22).

In determinate applicazioni (come l'isolamento di platee di fondazione o coperture carrabili), riveste un ruolo determinante la *Resistenza a compressione a lungo termine con una deformazione massima del 2%* (definita dalla norma UNI EN 1606:2013), in quanto non è corretto considerare un rapporto di proporzionalità tra le due resistenze. Il metodo di calcolo permette di determinare lo scorrimento viscoso (*creep*) a compressione dei provini in varie condizioni. In base alla durata della prova (122, 304, 608 giorni) è possibile estrapolare il comportamento meccanico rispettivamente a 10, 25 e 50 anni e di valutare il livello di carico che il campione può sopportare nel periodo di vita mantenendo le caratteristiche fisiche-meccaniche e dimensionali sostanzialmente simili a quelle

iniziali. Il codice di designazione nelle schede tecniche e nelle etichette CE per definire il comportamento viscoso è indicato con la sigla $CC(i1/i2/y)\sigma_c$, dove "i1" è la deformazione totale (espressa in % o mm); "i2" è la deformazione viscosa (espressa anch'essa in % o mm); "y" sono gli anni e " σ_c " è il valore della pressione permanente, espressa in kPa^{28} .

Per alcuni isolanti è importante anche valutare il comportamento sotto carico concentrato, calcolando la *Resistenza a carico concentrato*, definito nella norma UNI EN 12430:2013 fornendo come risultato i millimetri di deformazione a seguito dell'applicazione di un carico concentrato, espresso Newton. La sigla, secondo il codice di designazione nelle schede tecniche e nelle etichette Ce è PL(i)s, dove "i" rappresenta la deformazione espressa in mm, mentre "s" il carico massimo ad intervalli di 50N.




In conclusione, la normativa, ed in particolar modo la UNI EN 1607:2013, determina il valore della *Resistenza a trazione perpendicolare alle facce* dell'isolante. Il codice di designazione nelle schede tecniche e nelle etichette CE è TRi, dove "i" rappresenta il valore di sollecitazione espressa in kPa.

Propensioni funzionali e caratteristiche complementari degli isolanti

Nella scelta in fase di progettazione del materiale isolante più adatto al contesto di riferimento, numerosi sono i parametri che definiscono le prestazioni termiche ed acustiche richieste dal sistema edificio-impianto.




Per rendere più chiara e immediata la lettura delle proprietà primarie, ogni valore prestazionale - per ciascun materiale isolante analizzato nel quadro sinottico - è corredato da un simbolo grafico delle *propensioni funzionali*, e da un valore qualitativo (alto, medio, basso) per ogni relativa propensione.

In modo particolare avremo per le proprietà di conducibilità termica e di calore specifico, una propensione (alta, medio o bassa) relativa al *comportamento stagionale* (estate, inverno, estate-inverno):



-  in estate;
-  in inverno;
-  in estate/inverno.

Il valori di conducibilità termica hanno propensione alta ($\rho < 0,037$ W/mK), media ($0,037 < \rho < 0,055$ W/mK) e bassa ($\rho > 0,055$ W/mK); i valori del calore specifico, invece, avranno una propensione alta ($C_p > 1600$ J/kgK), media ($1600 < C_p < 1400$ J/kgK) e bassa ($C_p < 1400$ J/kgK).


Riguardo la propensione funzionale di resistenza alla diffusione del vapore, avremo isolanti con *diffusione elevata* ($1 < \mu < 50\%$), isolanti con *diffusione limitata* ($\mu > 50\%$) e isolanti con *barriera al vapore* ($\mu = \infty$):

-  *diffusione elevata*;
-  *diffusione limitata*;
-  *barriera al vapore*.

Il coefficiente di assorbimento acustico ha una propensione funzionale della tipologia *fonoassorbente* ($\alpha > 50\%$) e della tipologia *diffondente* ($\alpha < 50\%$):

-  *fonoassorbente*;
-  *diffondente*.

La proprietà di reazione al fuoco è corredata dal simbolo di propensione nel momento in cui il materiale isolante analizzato è altamente infiammabile con *rilascio di fumi tossici e gocce infiammabili*:

-  *rilascio di gas-gocce*.

L'ultima proprietà, ovvero quella relativa alla capacità di assorbimento di acqua è corredata dalla propensione di *idrorepellenza*, ovvero la capacità di un materiale di non subire alterazioni di forma, dimensioni e caratteristiche fisico/chimiche dopo essere stato completamente immerso in acqua:

-  *idrorepellente*.

Si riassume in tabella (fig.23) l'intervallo dei valori delle proprietà primarie che caratterizzano ciascuna delle propensioni funzionali riportate nel quadro sinottico:

23. Schema dei valori di propensione funzionale per ciascuna delle proprietà primarie di un materiale isolante.

Proprietà primaria	Valori di propensione funzionale		
Conducibilità termica (W/mK)	$\rho < 0,037$  	$0,037 < \rho < 0,055$  	$\rho > 0,055$  
Calore specifico (J/kgK)	$C_p > 1600$  	$1600 < C_p < 1400$  	$C_p < 1400$  
Resistenza alla diffusione del vapore (%)	$1 < \mu < 50\%$ 	$\mu > 50\%$ 	$\mu = \infty$ 
Coefficiente di assorbimento acustico (%)	$\alpha > 50\%$ 	$\alpha < 50\%$ 	
Reazione al fuoco, rilascio fumi-gocce	A1; A2	B,C,D,E 	F (reazione non determinata)
Assorbimento d'acqua (%)	Idrorepellente 		
Resistenza meccanica (kPa)	Non definiti		

Le proprietà fisiche, chimiche e meccaniche sono rappresentative della qualità prestazionale di un materiale isolante. Sia fase di progettazione e posa in opera, sia durante il ciclo di vita, un materiale isolante deve assicurare il soddisfacimento di alcune *caratteristiche complementari*. Esse, strettamente correlate alle proprietà primarie, sono elencate nel quadro matriciale comparativo sotto forma di simbologia semplificata ed, in modo particolare:

- leggerezza;
- facilità di posa in opera;
- ridotto spessore;
- elasticità;
- inalterabilità;
- resistenza meccanica;
- resistenza fisico/chimica;
- resistenza all'abrasione;
- resistenza ai microrganismi;
- stabilità dimensionale termica;
- igroscopicità;
- idrofilia;
- ermeticità;
- imputrescibilità.

- Leggerezza, facilità di posa in opera, ridotto spessore ed elasticità, sono caratteristiche strettamente correlate alla proprietà di densità (o massa volumica) e dal tipo di macrostruttura (fibrosa, cellulare, etc.).
- L'inalterabilità è la capacità di un materiale isolante di resistere al deterioramento provocato dagli agenti atmosferici o da sostanze chimiche.
- La *resistenza meccanica* è un requisito particolarmente importante quando il materiale isolante è impiegato nella stratigrafia orizzontale (soggetta alle sollecitazioni di compressione derivanti dai carichi permanenti e accidentali) o nella stratigrafia verticale (in cui è richiesta una resistenza maggiore agli urti).
- La *resistenza fisico/chimica* è la capacità di un materiale isolante di resistere all'azione di agenti atmosferici, acidi e microrganismi.

- La *resistenza all'abrasione* è la capacità di un materiale di resistere alle azioni meccaniche quali sfregamento, raschiatura, erosione, etc.²⁹ Ciò si verifica soprattutto quando il materiale oltre alla funzione di isolamento, svolge anche la funzione di finitura di alcune superfici tecniche, come per esempio, controsoffitti, contropareti o pannellature acustiche di rivestimento.
- La *resistenza ai microrganismi* è la capacità di un materiale isolante di resistere all'azione di microrganismi (funghi, muffe, tarme, etc). I materiali isolanti di origine naturale, soprattutto di natura organica (animale o vegetale), in determinate condizioni si pongono come supporti ideali per la proliferazione di agenti patogeni³⁰⁻³¹.
- La *stabilità dimensionale termica* è la capacità di un materiale isolante di resistere alle variazioni dimensionali dovute alle sollecitazioni meccaniche, termiche e di umidità³².
- L'*igroscopicità* è la capacità del materiale isolante di trattenere l'umidità, cioè l'acqua allo stato di vapore³³.
- L'*idrofilia* è la capacità di un materiale di legarsi con l'acqua allo stato liquido³⁴.
- L'*ermeticità* è la capacità di un materiale isolante di impedire il passaggio di moti d'aria in grado di disperdere il calore dall'ambiente interno. Inoltre, è una caratteristica in grado di proteggere l'ambiente dall'azione dell'umidità ambientale o di risalita/infiltrazione.
- L'*imputrescibilità* è la capacità di un materiale isolante di resistere all'azione acqua (stagnate) e all'azione di batteri e microrganismi, in grado di catalizzare il processo di degrado dell'isolante facendo perdere irreversibilmente le caratteristiche di isolamento termico ed acustico.

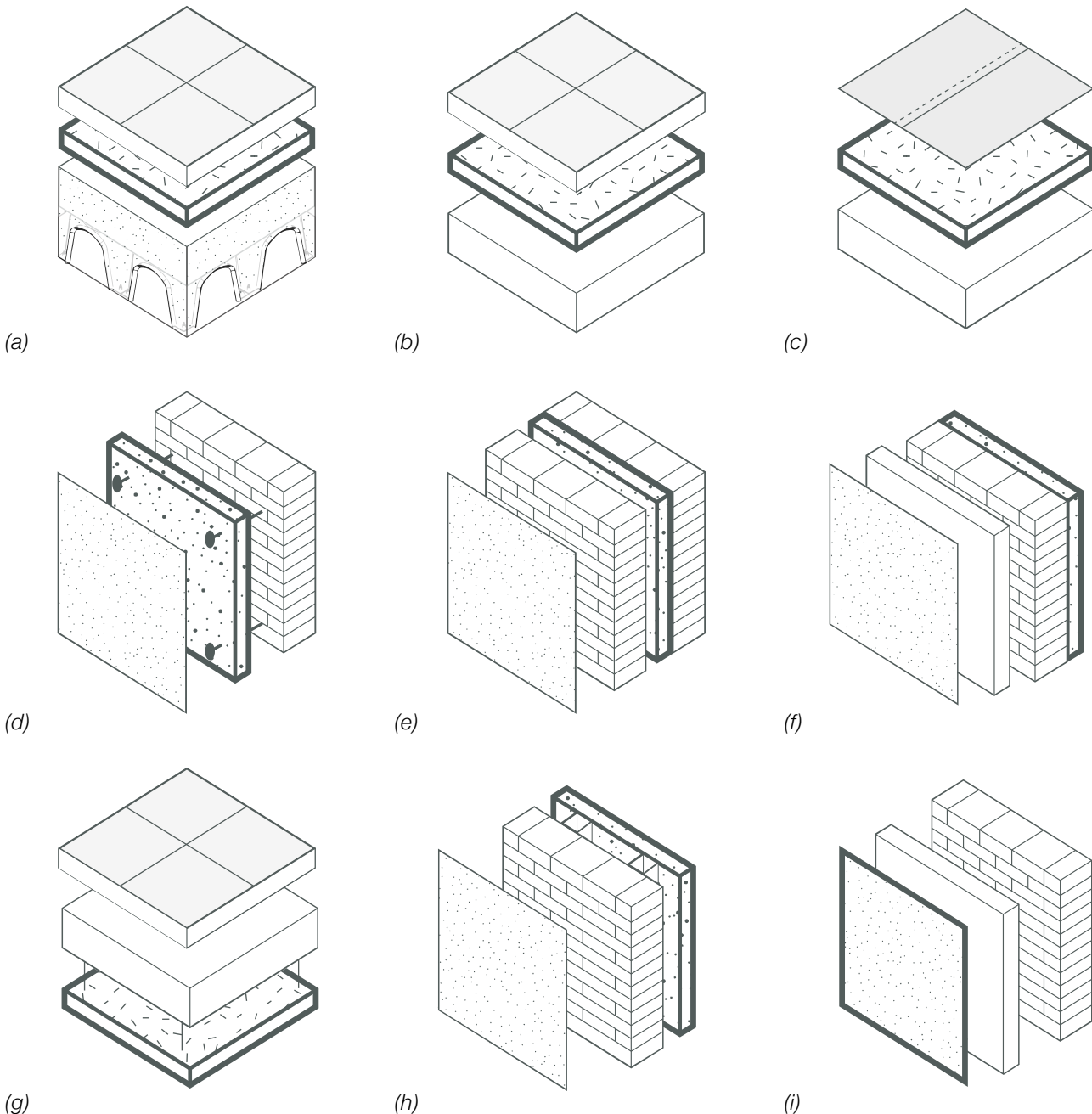
Sistema tecnologico di applicabilità degli isolanti

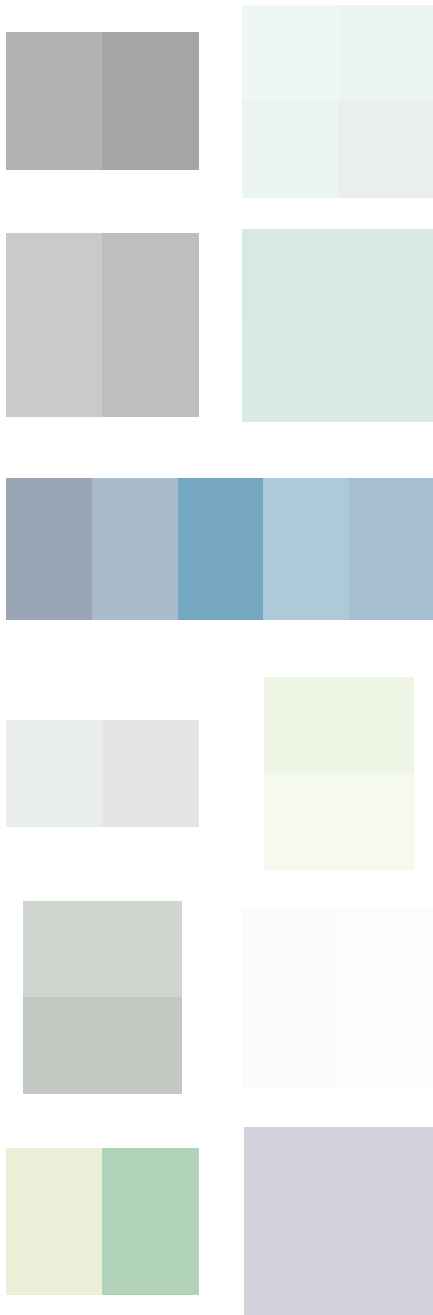
Il diagramma di applicabilità schematizza tutti i sistemi tecnologici (o componenti edilizie) compatibili a ricevere la posa in opera del materiale isolante. Il diagramma, inoltre, schematizza mediante un grafico l'indice di produzione (o tasso di utilizzo) di ciascun materiale isolante per ogni sistema tecnologico, secondo la normativa DIN 4108-10 (non cogente in Italia, ma l'unico strumento normativo a livello europeo), schede tecniche e letteratura scientifica.

I sistemi tecnologici e il relativo sistema di isolamento analizza:

- chiusure orizzontali di base;
- chiusure orizzontali intermedie;
- chiusure di copertura;
- chiusure verticali esterne, con isolamento esterno;
- chiusure verticali esterne, con isolamento nell'intercapedine;
- chiusure verticali esterne, con isolamento interno;
- controsoffitti e plafonature;
- partizioni interne e contropareti;
- rivestimenti e finiture (fig.24).

24. Applicabilità e compatibilità dei materiali isolanti rispetto ai sistemi tecnologici (o componenti edilizie): a) chiusure orizzontali di base; b) chiusure orizzontali intermedie; c) chiusure di copertura; d) chiusure verticali esterne, con isolamento esterno; e) chiusure verticali esterne con isolamento nell'intercapedine; f) chiusure verticali esterne con isolamento interno; g) controsoffitti e plafonature; h) partizioni interne e contropareti; i) rivestimenti e finiture.





Sostenibilità e bilancio ambientale degli isolanti

Il diagramma o *indice di sostenibilità* fornisce la lettura dei tre parametri che caratterizzano il bilancio ambientale (o eco-bilancio) di ciascun prodotto isolante, ovvero:

- la *biodegradabilità* è un requisito che si adatta perfettamente alla dismissione dei materiali edili, tra cui gli isolanti, allineandosi al concetto di economia circolare ed allontanandosi dall'economia lineare caratterizzata dal processo di "creazione-utilizzazione-eliminazione" a favore del processo di "creazione-utilizzazione-riciclo". Per garantirlo è indispensabile concentrarsi sia sul *ciclo tecnico* che sul *ciclo biologico* per la produzione di nuovi materiali sostenibili, supportati da un quadro politico che migliori l'efficienza della gestione dei rifiuti affrontando le barriere legali e di mercato che ostacolano la diffusione di materiali isolanti biodegradabili. La biodegradabilità è la capacità di alcune componenti organiche degli isolanti, di essere degradati in sostanze più semplici mediante attività enzimatica di microrganismi (riciclaggio biologico o organico). Affinché quest'operazione sia efficace è necessario però individuare l'ambiente ideale nel quale il fenomeno può essere massimizzato e occorre definire un tempo di durata del processo che sia "industrializzabile" e compatibile con i ritmi di produzione dei rifiuti organici stessi³⁵⁻³⁶⁻³⁷;
- la *rinnovabilità* è un parametro che assicura la possibilità di re-immettere parte delle componenti di un materiale in un nuovo ciclo;
- la *riciclabilità* è un requisito che non può più prescindere da una progettazione corretta e attenta all'ambiente. Questo aspetto, in-

fatti, sul volano del quadro normativo, ed in particolare dei Criteri Ambientali Minimi³⁸, introduce per i materiali isolanti il divieto di utilizzo di ritardanti di fiamma; l'eliminazione di prodotti espandenti (per la riduzione dell'ozono) e l'obbligatorietà di introdurre nel processo di produzione, un quantitativo minimo di materiale riciclato e/o recuperato. Le quantità minime di contenuto riciclato saranno misurate sul peso del prodotto finito³⁹ (fig.25).

I processi di innovazione ambientale, passano non solo per la trasformazione del processo produttivo in un ciclo di vita reiterabile, ma soprattutto per le caratteristiche ambientali del prodotto, ovvero i parametri di lettura di un materiale che identifichi la sua riciclabilità ed il suo riuso, attraverso i principi etici e ambientali promulgati dalla legislazione e dai processi di certificazione (marcatura CE, ETA, ICEA, ANAB; marchi e enti certificatori sulla qualità del prodotto LEED; Norme UNI, Sistemi di gestione ambientale ISO 14001, Dichiarazione Ambientale EPD, PEFC e FSC, BREEAM, CasaClima, Certificazione ignifuga EU-ROCLASSE, EMAS, etc.)⁴⁰ (fig.26).

Posa in opera e indice di impiego degli isolanti

Il diagramma o *indice di impiego*, descrive le tecniche maggiormente utilizzate per la posa in opera dei materiali isolanti, ovvero:

- la *posa in opera "a secco"* mediante sistemi di ancoraggio meccanico di pannelli rigidi per l'isolamento termico ed acustico;
- la *posa in opera con malte* mediante ancoraggio con malte o collanti di elementi isolanti.

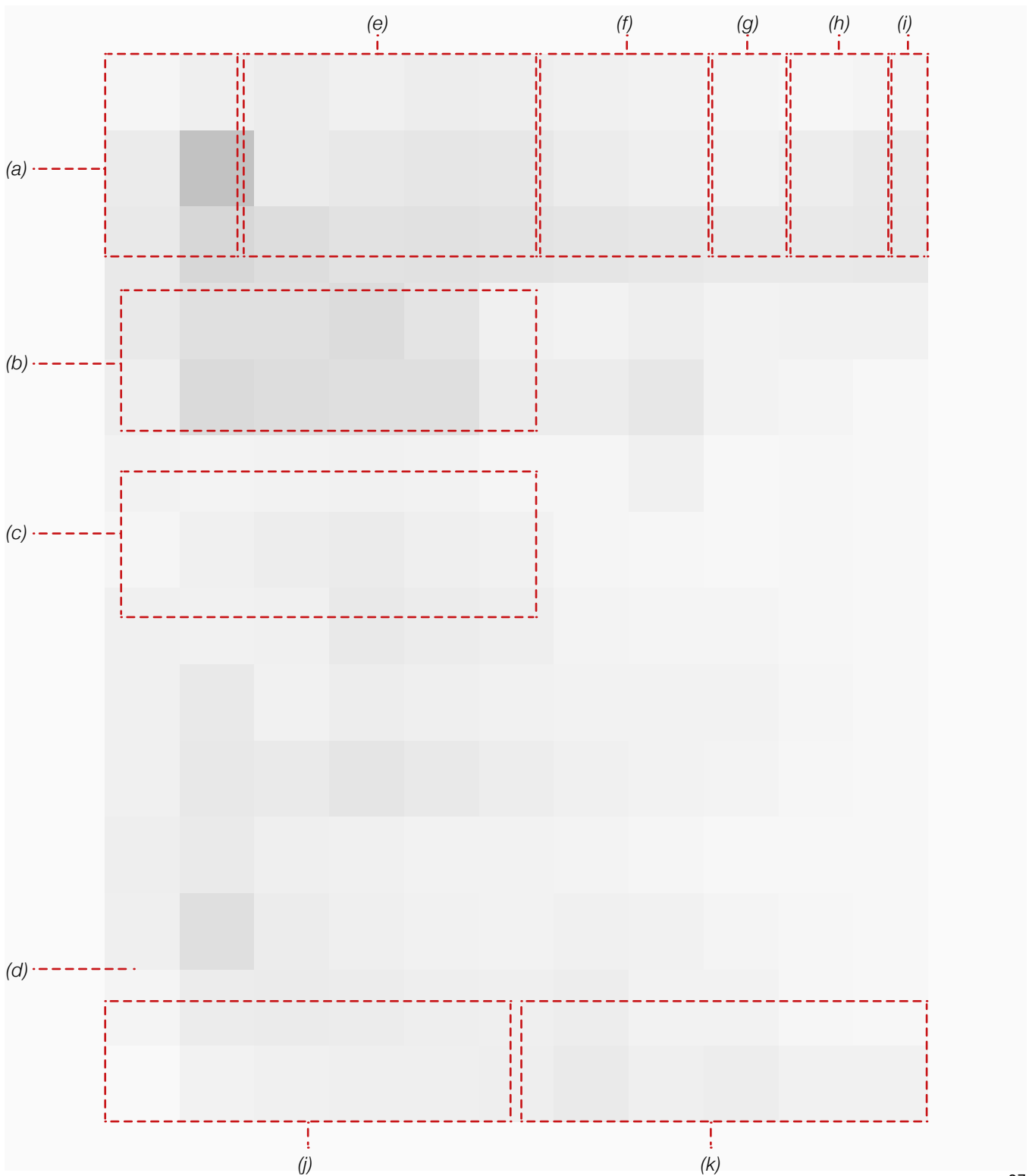
È indicato, infine, l'impiego di ponteggi, trabattelli e barriera al vapore.

25. Tematiche chiave dei C.A.M. - Criteri Ambientali Minimi. Gazzetta ufficiale Serie Generale n.259 del 6 Novembre 2017, *Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*, paragrafo 2.4.2.9 - "Isolanti termici ed acustici".

26. Alcune delle certificazioni improntate sull'etica ambientale dei prodotti destinati al settore dell'edilizia.



Letture e layout dell'analisi matriciale comparativa



Il layout del quadro matriciale comparativa è costituito da:

- a. famiglia del materiale isolante;
- b. isolante di confronto (campione);
- c. schede isolanti comparati;
- d. norme e certificazioni;

- e. proprietà primarie;
- f. sistema tecnologico;
- g. sostenibilità;
- h. posa in opera
- i. indici e diagrammi;
- j. propensioni funzionali;
- k. caratteristiche complementari.

27. Layout delle schede dell'analisi matriciale comparativa tra il campione prototipale della fibra biopolimerica a base di caseina e le famiglie di isolanti naturali, sintetici (organici ed inorganici) e di nuova generazione.

ANALISI MATRICIALE COMPARATIVA





Densità (ρ)
kg/m³ - UNI EN ISO 7345:2018

Conducibilità termica (λ)
W/m·K

Calore specifico (Cp)
J/kg·K - ASTM E 1296

Res. diffusione del vapore (μ)
% - UNI EN ISO 12086

Coeff. assorbimento acustico (α)
Hz

Reazione al fuoco (classe)
Rilascio di fumi (s) e gocce (d)
UNI EN 13501-1:2009

Absorbimento d'acqua*
% - UNI EN 16635 e 16536:2019
kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019

Resistenza meccanica**
Kpa - Res.: a compressione CS(10)i
Kpa - Res.: a trazione TRI

Proprietà primarie | **Sistema tecnologico** | **Sostenibilità** | **Posa in opera** | **%**

Isolante di confronto

Fibra di caseina 16,87 0,035 1450 ~5,14 0,65 E -|- -|-

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: sfuso, rotoli, pannelli flessibili
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]

Scheda 1

Fibra di lana 18,75 0,037 1450 ~5,14 0,65 E -|- -|-

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: sfuso, rotoli, pannelli flessibili
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- volontaria tramite ETA
- bilancio ambientale: positivo

Scheda 2

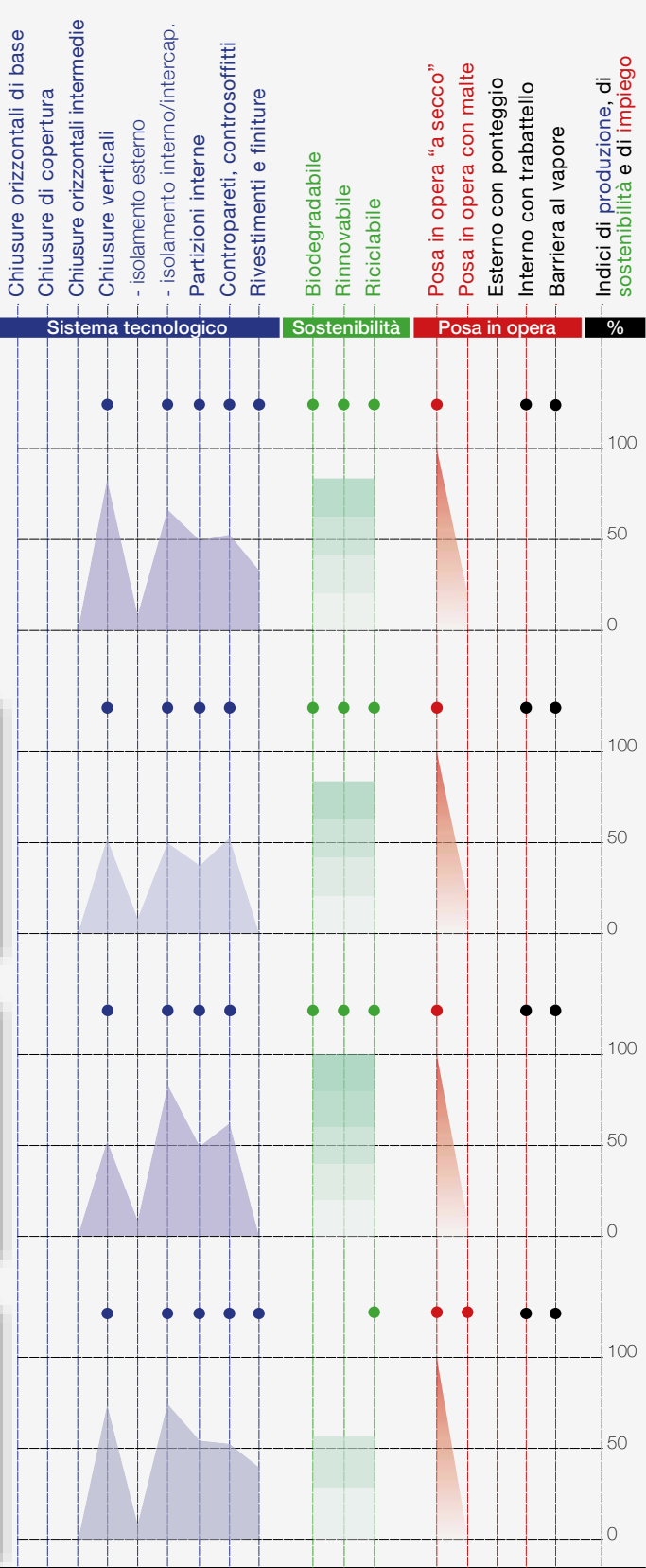
Fibra di canapa 25-115 0,040 1600 1-2 0,50 E -|7 -|-

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: rotoli, pannelli flessibili
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- volontaria tramite ETA
- bilancio ambientale: negativo (tenore di thc)

Scheda 3

Fibra di legno a bassa densità (WF) 50 0,038 2100 1-2 0,65 E WS1,0 -|-

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli flessibili
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- UNI EN 13171:2009
- bilancio ambientale: positivo



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

* sono indicati due valori percentuali: il primo è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per immersione WL(T); il secondo, invece, è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per diffusione WD(V). La dicitura WS rappresenta l'assorbimento d'acqua a breve termine per immersione parziale espresso in kg/m2.
** sono indicati due valori: il primo è riferito alla resistenza a compressione al 10% di deformazione CS(10); il secondo, invece, è riferito alla resistenza alla trazione perpendicolare alle facce TRI.

Materiali Isolanti
tipologia: organici
origine: naturali

Densità (ρ) kg/m ³ - UNI EN ISO 7345:2018
Conducibilità termica (λ) W/m·K
Calore specifico (Cp) J/kg·K - ASTM E 1296
Res. diffusione del vapore (μ) % - UNI EN ISO 12086
Coeff. assorbimento acustico (α) Hz
Reazione al fuoco (classe) Rilascio di fumi (s) e gocce (d) UNI EN 13501-1:2009
Absorbimento d'acqua* % - UNI EN 16535 e 16536:2019 kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019
Resistenza meccanica** Kpa - Res.: a compressione OS(10) Kpa - Res.: a trazione TR1

Proprietà primarie

Scheda 4

Fibra di legno ad alta densità (WF)

200	0,045	2100	5-10	0,70	E	WS1,0	- -
-----	-------	------	------	------	---	-------	-----

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli rigidi
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: positivo

Scheda 5

Lana di legno mineralizzata (WW)

450	0,085	1900	5-10	0,55	Bs1d0	WS1,0	- -
-----	-------	------	------	------	-------	-------	-----

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli rigidi
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: positivo

Scheda 6

Legno mineralizzato e polistirene espanso

60-120	0,065	1750	43	-	E	- -	- -
--------	-------	------	----	---	---	-----	-----

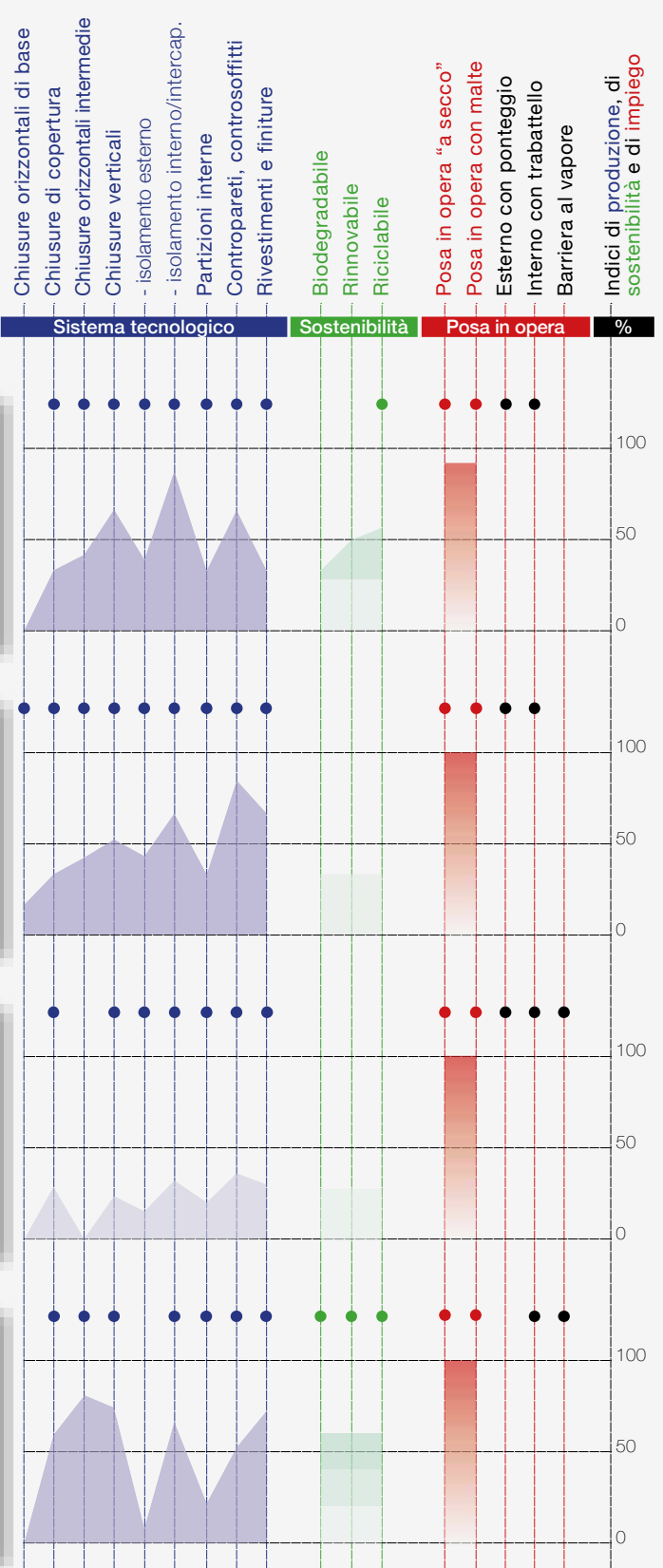
- composizione: fibrosa e cellulare
- struttura: pluristrato
- morfologia: pannelli rigidi
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: negativo (produzione)

Scheda 7

Sughero espanso tostato (ICB)

155	0,045	1800	5-11	0,65	E	WS1,0	- -
-----	-------	------	------	------	---	-------	-----

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato o granulato
- morfologia: pannelli flessibili, strisce
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: costo, VOC
- bilancio ambientale: positivo



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

Materiali Isolanti
tipologia: **organici**
origine: **naturali**

Densità (ρ)
kg/m³ - UNI EN ISO 7345:2018

Conducibilità termica (λ)
W/m·K

Calore specifico (Cp)
J/kg·K - ASTM E 1296

Res. diffusione del vapore (μ)
% - UNI EN ISO 12086

Coeff. assorbimento acustico (α)
Hz

Reazione al fuoco (classe)
Rilascio di fumi (s) e gocce (d)
UNI EN 13501-1:2009

Assorbimento d'acqua*
% - UNI EN 16635 e 16536:2019
kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019

Resistenza meccanica**
Kpa - Res.: a compressione CS(10)j
Kpa - Res.: a trazione TRI

Proprietà primarie

Chiusure orizzontali di base

Chiusure di copertura

Chiusure orizzontali intermedie

Chiusure verticali
- isolamento esterno
- isolamento interno/intercap.

Partizioni interne

Contropareti, controsoffitti

Rivestimenti e finiture

Biodegradabile

Rinnovabile

Riciclabile

Posa in opera "a secco"

Posa in opera con malte

Esterno con ponteggio

Interno con trabattello

Barriera al vapore

Indici di produzione, di sostenibilità e di impiego

Isolante di confronto

Fibra di caseina 16,87 0,035 1450 ~5,14 0,65 E - - -

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: sfuso, rotoli, pannelli flessibili
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [bar chart]
- contro: [bar chart]

Scheda 8

Sughero naturale sfuso 80-120 0,045 1850 5-11 - E WS1,0 - -

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: granulare
- morfologia: isolante sfuso
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [bar chart]
- contro: costo
- bilancio ambientale: positivo

Scheda 9

Fibra di cocco 50-150 0,045 1450 1-2 0,50 B2 - - -

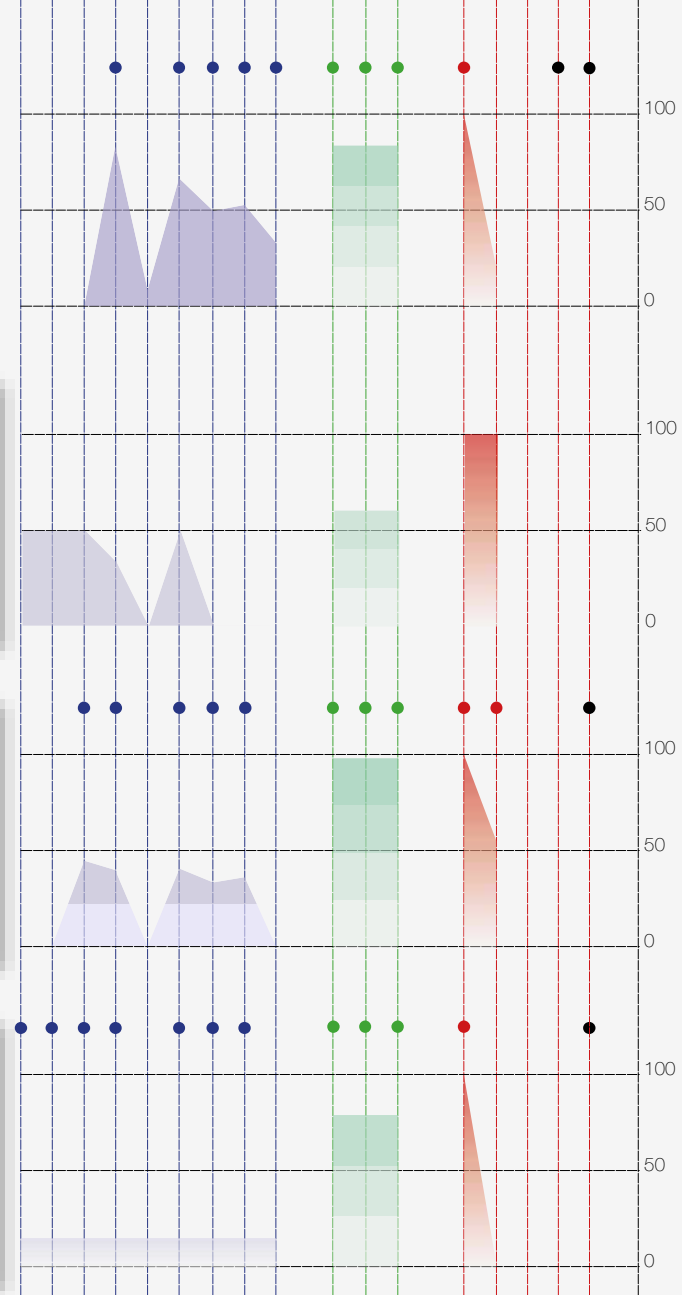
- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: rotoli, pannelli semi-rigidi
- tipologia: isolante organico acustico
- pro: [bar chart]
- contro: [bar chart]
- bilancio ambientale: negativo (trasporto)

Scheda 10

Fibra di cocco e sughero espanso 110 0,039 1600 5-30 0,85 B2 - - -

- composizione: fibrosa e cellulare
- struttura: pluristrato
- morfologia: pannelli rigidi
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [bar chart]
- contro: [bar chart]
- bilancio ambientale: negativo (trasporto)

Sistema tecnologico **Sostenibilità** **Posa in opera** **%**



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

* sono indicati due valori percentuali: il primo è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per immersione WL(T); il secondo, invece, è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per diffusione WD(V). La dicitura WS rappresenta l'assorbimento d'acqua a breve termine per immersione parziale espresso in kg/m².

** sono indicati due valori: il primo è riferito alla resistenza a compressione al 10% di deformazione CS(10); il secondo, invece, è riferito alla resistenza alla trazione perpendicolare alle facce TRI.

Materiali Isolanti
tipologia: organici
origine: naturali

Densità (ρ) kg/m ³ - UNI EN ISO 7345:2018	Conducibilità termica (λ) W/m·K	Calore specifico (Cp) J/kg·K - ASTM E 1296	Res. diffusione del vapore (μ) % - UNI EN ISO 12086	Coeff. assorbimento acustico (α) Hz	Reazione al fuoco (classe) Rilascio di fumi (s) e gocce (d) UNI EN 13501-1:2009	Absorbimento d'acqua* % - UNI EN 16535 e 16536:2019 Kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019	Resistenza meccanica** Kpa - Res.: a compressione OS(10) Kpa - Res.: a trazione TR1
--	---	--	---	---	---	--	--

Proprietà primarie

Scheda 11

Fibra di mais 10-80 0,040 1900 3 0,40-1 E -|- -|-

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli rigidi
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: altamente positivo

■ volontaria tramite ETA

Scheda 12

Fibra di juta 100 0,050 - 1-2 0,50 E -|- -|-

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli, sfuso, feltri
- tipologia: isolante organico acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: positivo

■ volontaria tramite ETA

Scheda 13

Fibra di cellulosa 28-65 0,045 1800 1-3 - E -|8,5 -|-

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: fiocchi, pannelli semi-rigidi
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: negativo (produzione)

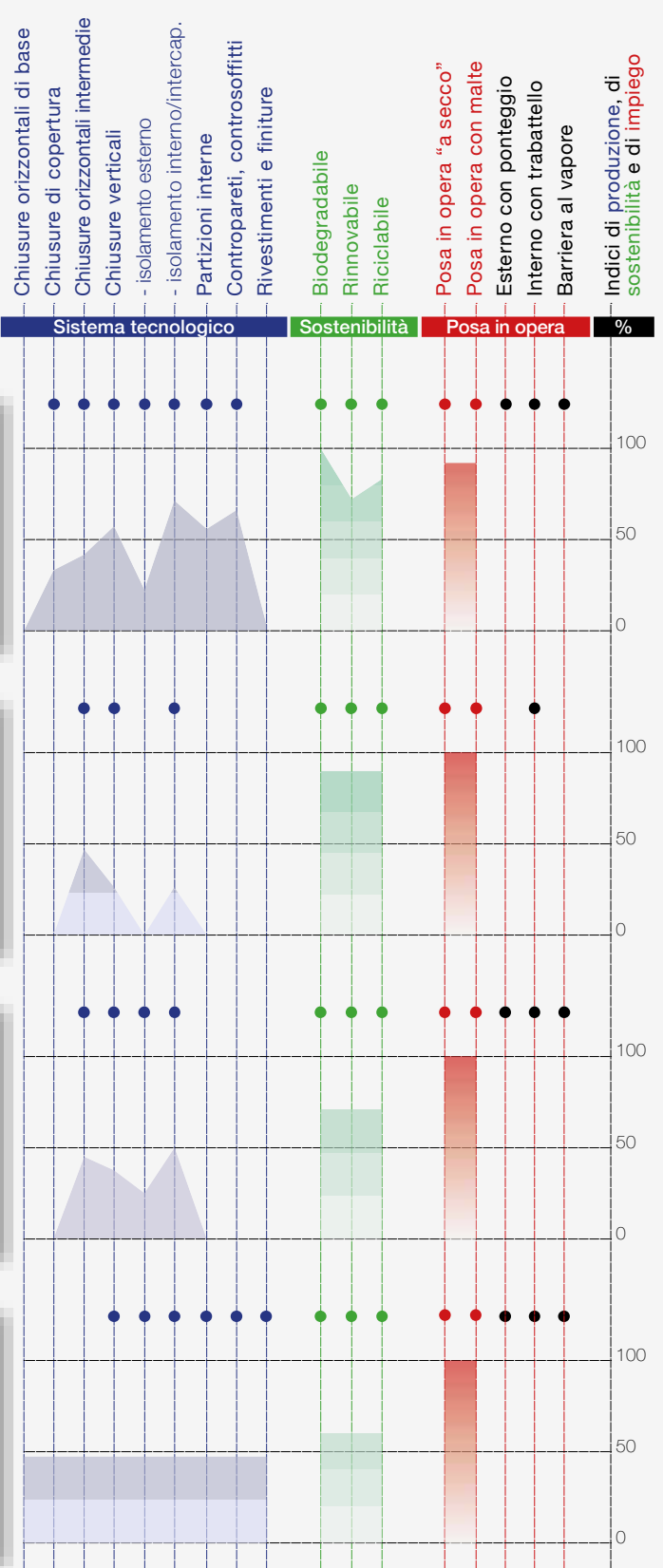
■ volontaria tramite ETA

Scheda 14

Canna palustre 120-230 0,060 1550 1-4 - B2 -|- -|-

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: stuoie flessibili
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: moderato (trasporto)

■ volontaria tramite ETA



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

Materiali Isolanti
tipologia: **organici**
origine: **naturali**

- Densità (ρ) kg/m³ - UNI EN ISO 7345:2018
- Conducibilità termica (λ) W/m·K
- Calore specifico (Cp) J/kg·K - ASTM E 1296
- Res. diffusione del vapore (μ) % - UNI EN ISO 12086
- Coeff. assorbimento acustico (α) Hz
- Reazione al fuoco (classe) Rilascio di fumi (s) e gocce (d) UNI EN 13501-1:2009
- Absorbimento d'acqua* % - UNI EN 16535 e 16536:2019 kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019
- Resistenza meccanica** Kpa - Res.: a compressione CS(10)i Kpa - Res.: a trazione TRI

Proprietà primarie

- Chiusure orizzontali di base
- Chiusure di copertura
- Chiusure orizzontali intermedie
- Chiusure verticali
 - isolamento esterno
 - isolamento interno/intercap.
- Partizioni interne
- Contropareti, controsoffitti
- Rivestimenti e finiture

- Biodegradabile
- Rinnovabile
- Riciclabile

- Posa in opera "a secco"
- Posa in opera con malte
- Esterno con ponteggio
- Interno con trabattello
- Barriera al vapore

Indici di produzione di sostenibilità e di impiego

Isolante di confronto

Fibra di caseina 16,87 0,035 1450 ~5,14 0,65 E - | - | -

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: sfuso, rotoli, pannelli flessibili
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]

Scheda 15

Piume naturali 30 0,040 1900 6 0,65 F - | - | -

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: rotoli, pannelli
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- volontaria tramite ETA
- bilancio ambientale: positivo

Scheda 16

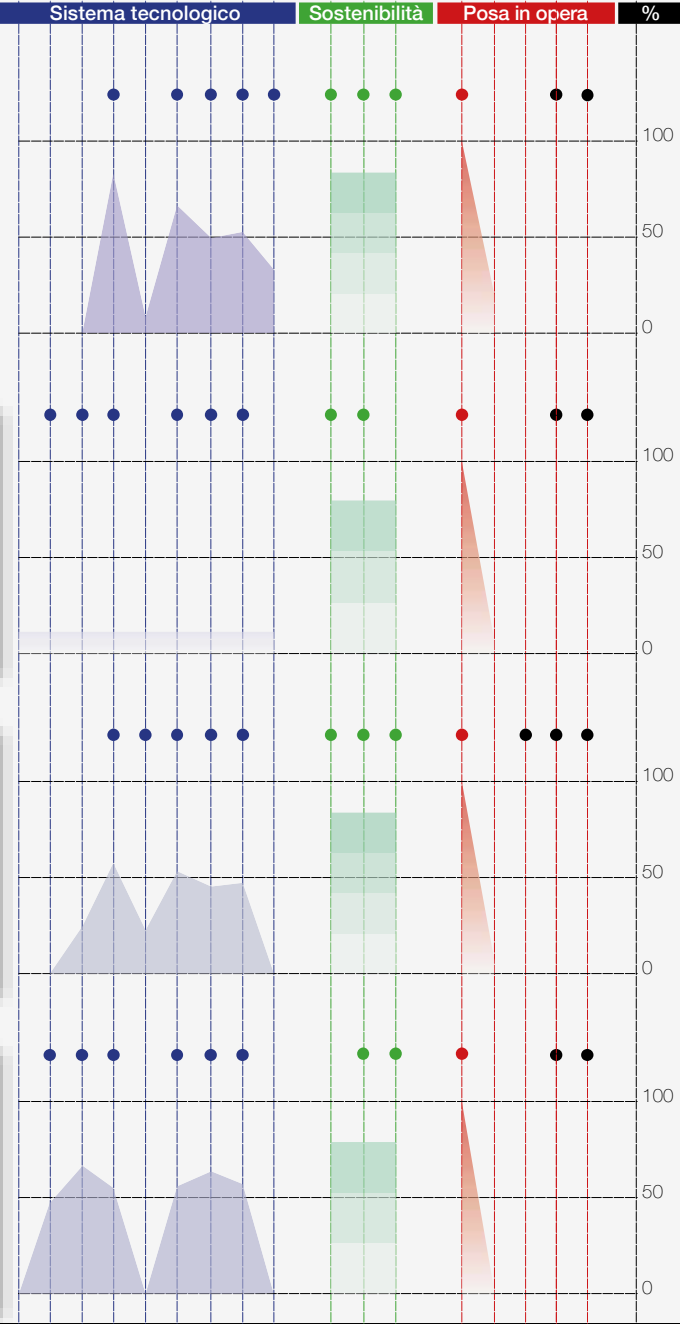
Fibra di kenaf 20-120 0,040 1600 1-2 0,62 F - | - | -

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: rotoli, pannelli
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: negativo (produzione)

Scheda 17

Fibra di lino 20-35 0,040 1500 1-2 0,65 E - | - | -

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: rotoli, pannelli semi-rigidi, feltri
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: negativo (poliestere)



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

* sono indicati due valori percentuali: il primo è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per immersione WL(T)i; il secondo, invece, è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per diffusione WD(V)i. La dicitura WS rappresenta l'assorbimento d'acqua a breve termine per immersione parziale espresso in kg/m2.

** sono indicati due valori: il primo è riferito alla resistenza a compressione al 10% di deformazione CS(10)i; il secondo, invece, è riferito alla resistenza alla trazione perpendicolare alle facce TRI.

Materiali Isolanti
tipologia: organici
origine: naturali

- Densità (ρ) kg/m³ - UNI EN ISO 7345:2018
- Conducibilità termica (λ) W/m·K
- Calore specifico (Cp) J/kg·K - ASTM E 1296
- Res. diffusione del vapore (μ) % - UNI EN ISO 12086
- Coeff. assorbimento acustico (α) Hz
- Reazione al fuoco (classe) Rilascio di fumi (s) e gocce (d) UNI EN 13501-1:2009
- Assorbimento d'acqua* % - UNI EN 16535 e 16536:2019 Kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019
- Resistenza meccanica** Kpa - Res.: a compressione OS(10) Kpa - Res.: a trazione TR

Proprietà primarie

Scheda 18

Fibra di cotone 20-60 0,040 1100 1-2 - B -|- -|-

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli semi-rigidi, rotoli, sfuso
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: contro: costo
- bilancio ambientale: positivo

■ volontaria tramite ETA

Scheda 19

Terra cruda e rete in fibra di juta 1600 0,35 1700 7 0,65 A1 WS3,0 -|- -|-

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli rigidi
- tipologia: isolante organico acustico
- pro: contro:
- bilancio ambientale: positivo

■ volontaria tramite ETA

Scheda 20

Fibra di paglia 340 0,075 1900 2,5 - B2s3 -|- -|-

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli, balle di paglia
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: contro:
- bilancio ambientale: positivo

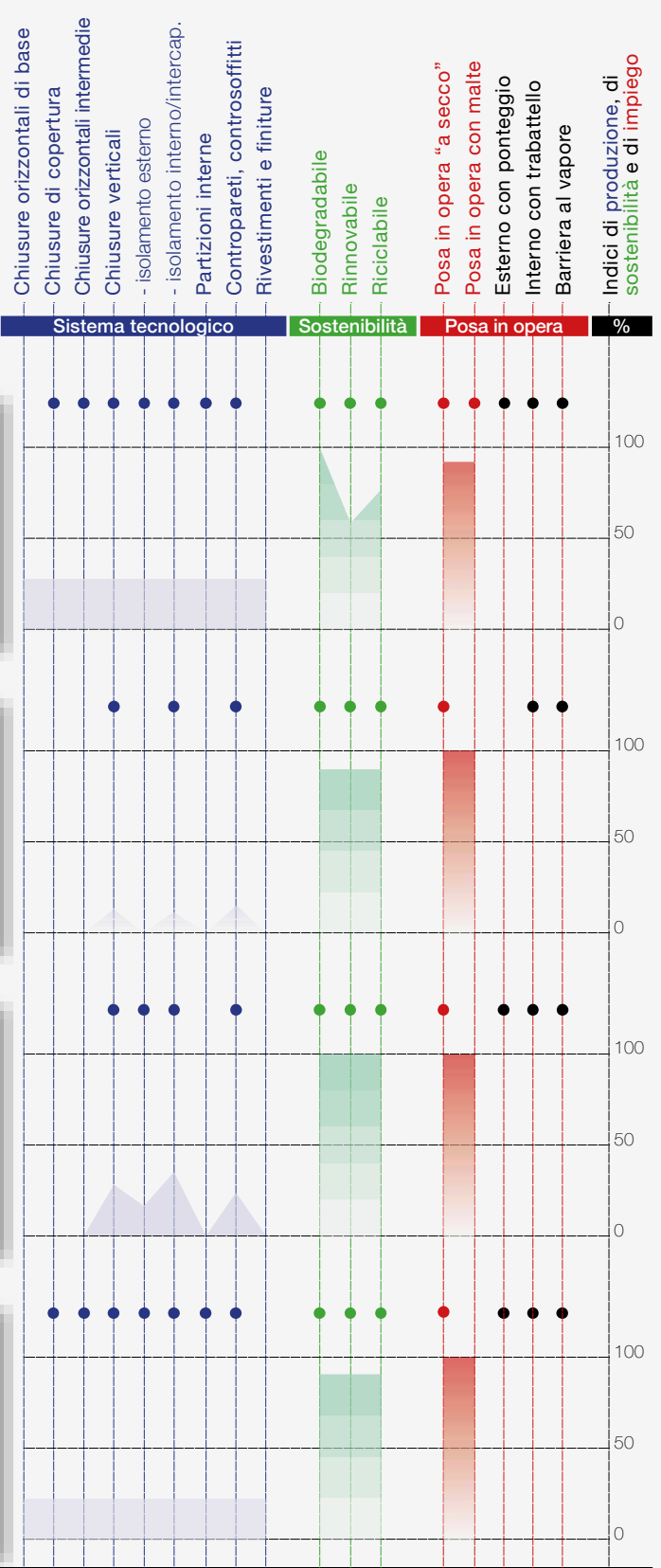
■ volontaria tramite ETA

Scheda 21

Fibra di alga marina (posidonia) 70 0,042 2500 1-4 - B2s1d0 -|- -|-

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: sfuso, fiocchi, pannelli
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: contro:
- bilancio ambientale: positivo

■ volontaria tramite ETA



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità



Densità (ρ)
kg/m³ - UNI EN ISO 7345:2018

Conducibilità termica (λ)
W/m·K

Calore specifico (Cp)
J/kg·K - ASTM E 1296

Res. diffusione del vapore (μ)
% - UNI EN ISO 12086

Coeff. assorbimento acustico (α)
Hz

Reazione al fuoco (classe)
Rilascio di fumi (s) e gocce (d)
UNI EN 13501-1:2009

Absorbimento d'acqua*
% - UNI EN 16635 e 16536:2019
kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019

Resistenza meccanica**
Kpa - Res.: a compressione CS(10)i
Kpa - Res.: a trazione TRI

Proprietà primarie **Sistema tecnologico** **Sostenibilità** **Posa in opera** **%**

Isolante di confronto

Fibra di caseina 16,87 0,035 1450 ~5,14 0,65 E - | - | -

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: sfuso, rotoli, pannelli flessibili
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]

Scheda 1

Fibra di poliestere (PET) 10-150 0,039 1200 3,15 0,53 Bs2d0 - | - | -

- composizione: fibrosa di origine sintetica
- struttura: monostrato
- morfologia: sfuso, pannelli flessibili
- tipologia: isolante sintetico termo-acustico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: moderato (produzione)

Scheda 2

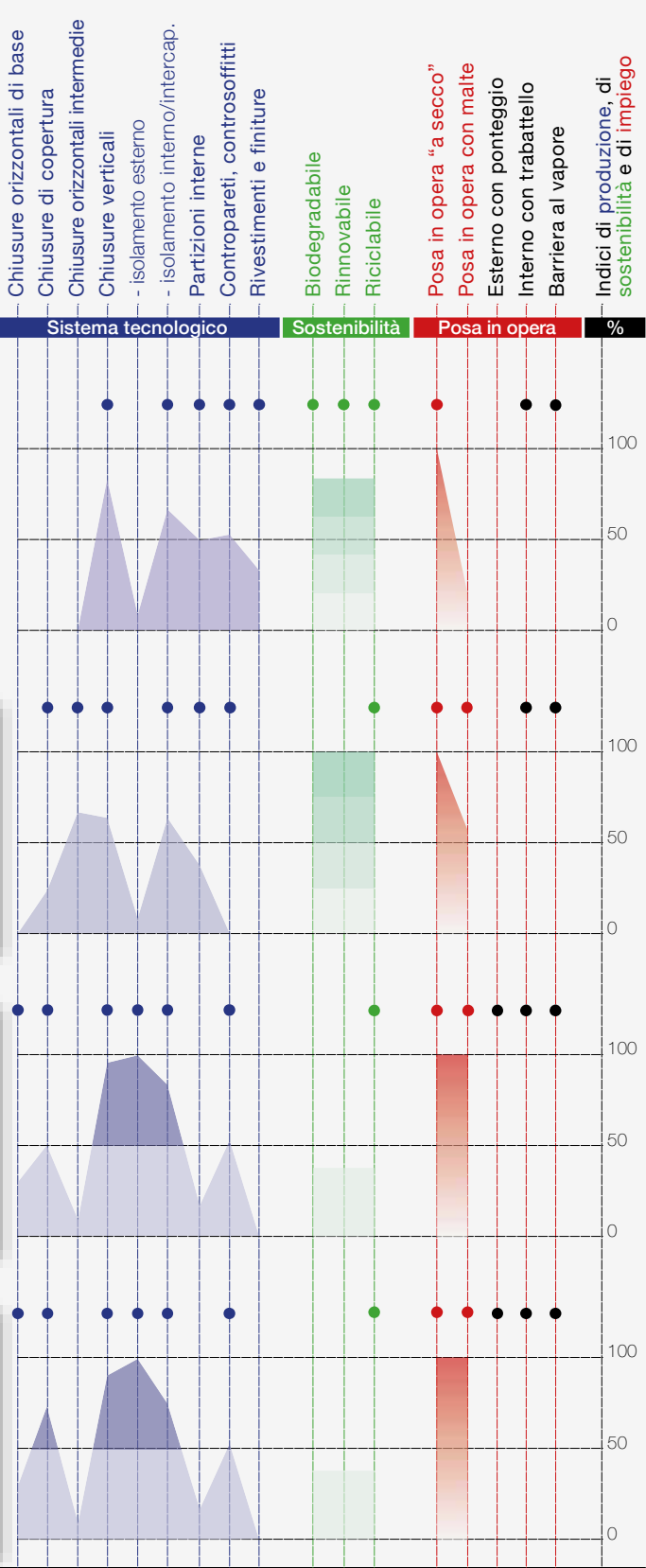
Polistirene espanso sinterizzato - EPS 10-30 0,032 1340 80-220 - E 3 | 3 - | -

- composizione: cellulare sintetico organico
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli in perle vetrose
- tipologia: isolante sintetico termico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: negativo (produzione)

Scheda 3

Polistirene espanso sinterizzato e grafite 15-40 0,030 1400 20-130 - E 3 | 3 - | -

- composizione: cellulare sintetico organico
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli, prodotti sagomati
- tipologia: isolante sintetico termico
- pro: [diagramma] contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: negativo (produzione)



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

* sono indicati due valori percentuali: il primo è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per immersione WL(T); il secondo, invece, è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per diffusione WD(V). La dicitura WS rappresenta l'assorbimento d'acqua a breve termine per immersione parziale espresso in kg/m2.
 ** sono indicati due valori: il primo è riferito alla resistenza a compressione al 10% di deformazione CS(10); il secondo, invece, è riferito alla resistenza alla trazione perpendicolare alle facce TRI.

Materiali Isolanti
tipologia: organici
origine: sintetici

Densità (ρ) kg/m ³ - UNI EN ISO 7345:2018	Conducibilità termica (λ) W/m·K	Calore specifico (Cp) J/kg·K - ASTM E 1296	Res. diffusione del vapore (μ) % - UNI EN ISO 12086	Coeff. assorbimento acustico (α) Hz	Reazione al fuoco (classe) Rilascio di fumi (s) e gocce (d) UNI EN 13501-1:2009	Absorbimento d'acqua* % - UNI EN 16535 e 16536:2019 kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019	Resistenza meccanica** Kpa - Res.: a compressione OS(10) Kpa - Res.: a trazione TR1
--	---	--	---	---	---	--	--

Proprietà primarie

Chiusure orizzontali di base	Chiusure di copertura	Chiusure orizzontali intermedie	Chiusure verticali	- isolamento esterno	- isolamento interno/intercap.	Partizioni interne	Contropareti, controsoffitti	Rivestimenti e finiture	Biodegradabile	Rinnovabile	Riciclabile	Posa in opera "a secco"	Posa in opera con malte	Esterno con ponteggio	Interno con trabattello	Barriera al vapore	Indici di produzione, di sostenibilità e di impiego
-------------------------------------	------------------------------	--	---------------------------	-----------------------------	---------------------------------------	---------------------------	-------------------------------------	--------------------------------	-----------------------	--------------------	--------------------	--------------------------------	--------------------------------	------------------------------	--------------------------------	---------------------------	--

Scheda 4

Polistirene espanso estruso - XPS 25-40 0,029 1450 30-200 - E 3 | 3 - | -

- composizione: cellulare sintetico organico
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli compatti
- tipologia: isolante sintetico termico
- pro: [bar chart]
- contro: [bar chart]
- bilancio ambientale: negativo (produzione)

UNI EN 13164:2013

Scheda 5

Poliuretano espanso rigido (fossile) 20-50 0,028 1450 30-200 - B-Fs3 2 | - - | -

- composizione: cellulare sintetico organico
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli, blocchi, schiume
- tipologia: isolante sintetico termico
- pro: [bar chart]
- contro: [bar chart]
- bilancio ambientale: negativo (produzione)

UNI EN 13165:2016

Scheda 6

Poliuretano espanso rigido (naturale) 20-50 0,028 1450 30-200 - B-Fs3 2 | - - | -

- composizione: cellulare sintetico organico
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli, blocchi, schiume
- tipologia: isolante naturale termico
- pro: [bar chart]
- contro: [bar chart]
- bilancio ambientale: positivo

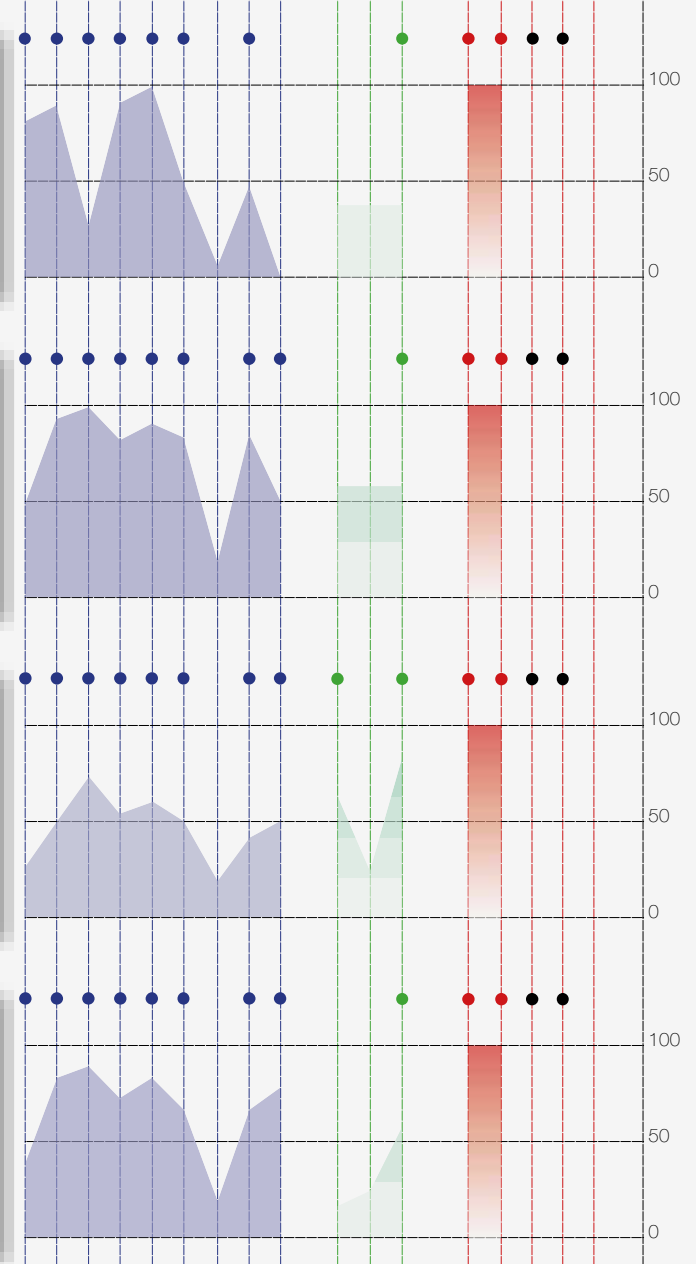
UNI EN 13165:2016

Scheda 7

Pannelli sandwich in poliuretano espanso 25-55 0,026 1600 50-∞ - B-Fs3 2 | - - | -

- composizione: cellulare sintetico organico
- struttura: pluristrato
- morfologia: pannelli, blocchi, profili
- tipologia: isolante sintetico termico
- pro: [bar chart]
- contro: [bar chart]
- bilancio ambientale: negativo (produzione)

UNI EN 13165:2016



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

Materiali Isolanti
tipologia: organici
origine: sintetici

Densità (ρ)
kg/m³ - UNI EN ISO 7345:2018

Conducibilità termica (λ)
W/m·K

Calore specifico (Cp)
J/kg·K - ASTM E 1296

Res. diffusione del vapore (μ)
% - UNI EN ISO 12086

Coeff. assorbimento acustico (α)
Hz

Reazione al fuoco (classe)
Rilascio di fumi (s) e gocce (d)
UNI EN 13501-1:2009

Assorbimento d'acqua*
% - UNI EN 16535 e 16536:2019
kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019

Resistenza meccanica**
Kpa - Res.: a compressione CS(10)i
Kpa - Res.: a trazione TRI

Proprietà primarie

Sistema tecnologico

Chiusure orizzontali di base
Chiusure di copertura
Chiusure orizzontali intermedie
Chiusure verticali
- isolamento esterno
- isolamento interno/intercap.
Partizioni interne
Contropareti, controsoffitti
Rivestimenti e finiture

Sostenibilità

Biodegradabile
Rinnovabile
Riciclabile

Posa in opera

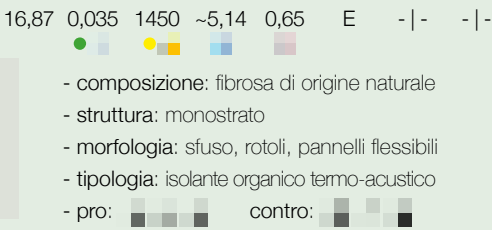
Posa in opera "a secco"
Posa in opera con malte
Esterno con ponteggio
Interno con trabattello
Barriera al vapore

%

Indici di produzione, di sostenibilità e di impiego

Isolante di confronto

Fibra di caseina



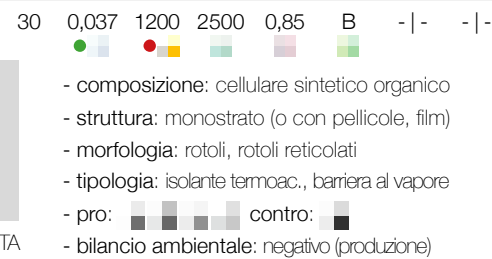
Scheda 8

Polipropilene espanso modificato



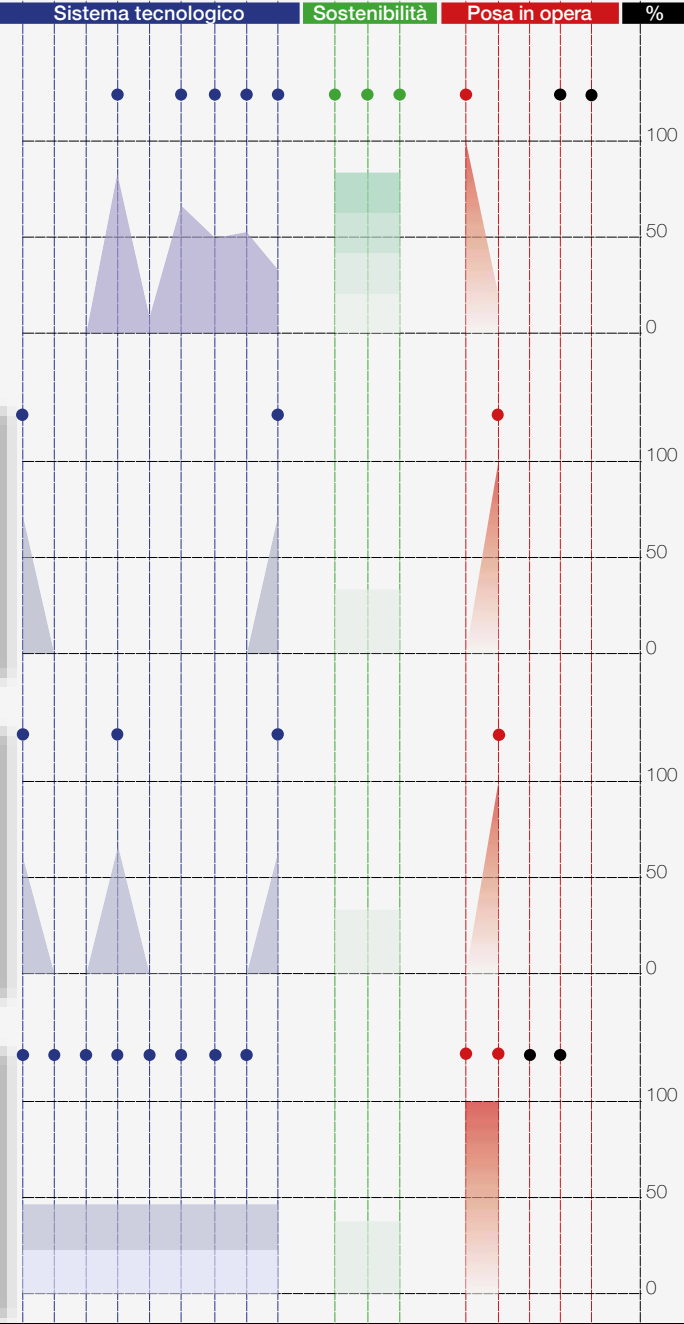
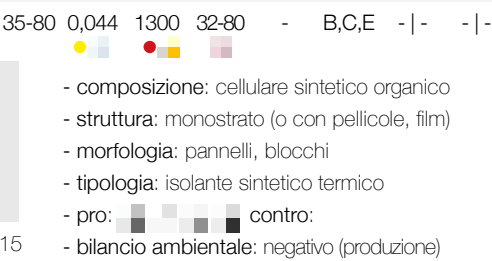
Scheda 9

Polietilene espanso modificato



Scheda 10

Resine fenoliche



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

* sono indicati due valori percentuali: il primo è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per immersione WL(Ti); il secondo, invece, è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per diffusione WD(Vi). La dicitura WS rappresenta l'assorbimento d'acqua a breve termine per immersione parziale espresso in kg/m².

** sono indicati due valori: il primo è riferito alla resistenza a compressione al 10% di deformazione CS(10)i; il secondo, invece, è riferito alla resistenza alla trazione perpendicolare alle facce TRI.

Materiali Isolanti
tipologia: organici
origine: sintetici

- Densità (ρ)**
kg/m³ - UNI EN ISO 7345:2018
- Conduttività termica (λ)**
W/m·K
- Calore specifico (Cp)**
J/kg·K - ASTM E 1296
- Res. diffusione del vapore (μ)**
% - UNI EN ISO 12086
- Coeff. assorbimento acustico (α)**
Hz
- Reazione al fuoco (classe)**
Rilascio di fumi (s) e gocce (d)
UNI EN 13501-1:2009
- Assorbimento d'acqua***
% - UNI EN 16535 e 16536:2019
kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019
- Resistenza meccanica****
Kpa - Res.: a compressione OS(10)
Kpa - Res.: a trazione TR1

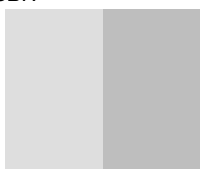
Proprietà primarie

- Sistema tecnologico**
- Chiusure orizzontali di base
 - Chiusure di copertura
 - Chiusure orizzontali intermedie
 - Chiusure verticali
 - isolamento esterno
 - isolamento interno/intercap.
 - Partizioni interne
 - Contropareti, controsoffitti
 - Rivestimenti e finiture
- Sostenibilità**
- Biodegradabile
 - Rinnovabile
 - Riciclabile
- Posa in opera**
- Posa in opera "a secco"
 - Posa in opera con malte
 - Esterno con ponteggio
 - Interno con trabattello
 - Barriera al vapore
- %**
- Indici di produzione, di sostenibilità e di impiego

Scheda 11

Gomma riciclata SBR 800

0,12 1450 10 0,90 B2 -|- -|-




- composizione: cellulare sintetico organico
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli, rotoli anticalpestio
- tipologia: isolante acustico
- pro: [diagramma]
- contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: positivo

UNI 11515:2015

Scheda 12

Elastomeri espansi (FEF) 50

0,040 2100 3000 - B -|- -|-



- composizione: cellulare sintetico organico
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli, tubi, nastri
- tipologia: isolante sintetico termico
- pro: [diagramma]
- contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: negativo (produzione)

UNI EN 14304:2016

Scheda 13

Gomma riciclata e granuli di sughero 300

0,033 1600 400 0,90 B2 -|- -|-



- composizione: cellulare sintetico organico
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli, rotoli anticalpestio
- tipologia: isolante sintetico termoacustico
- pro: [diagramma]
- contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: positivo

volontaria tramite ETA

Scheda 14

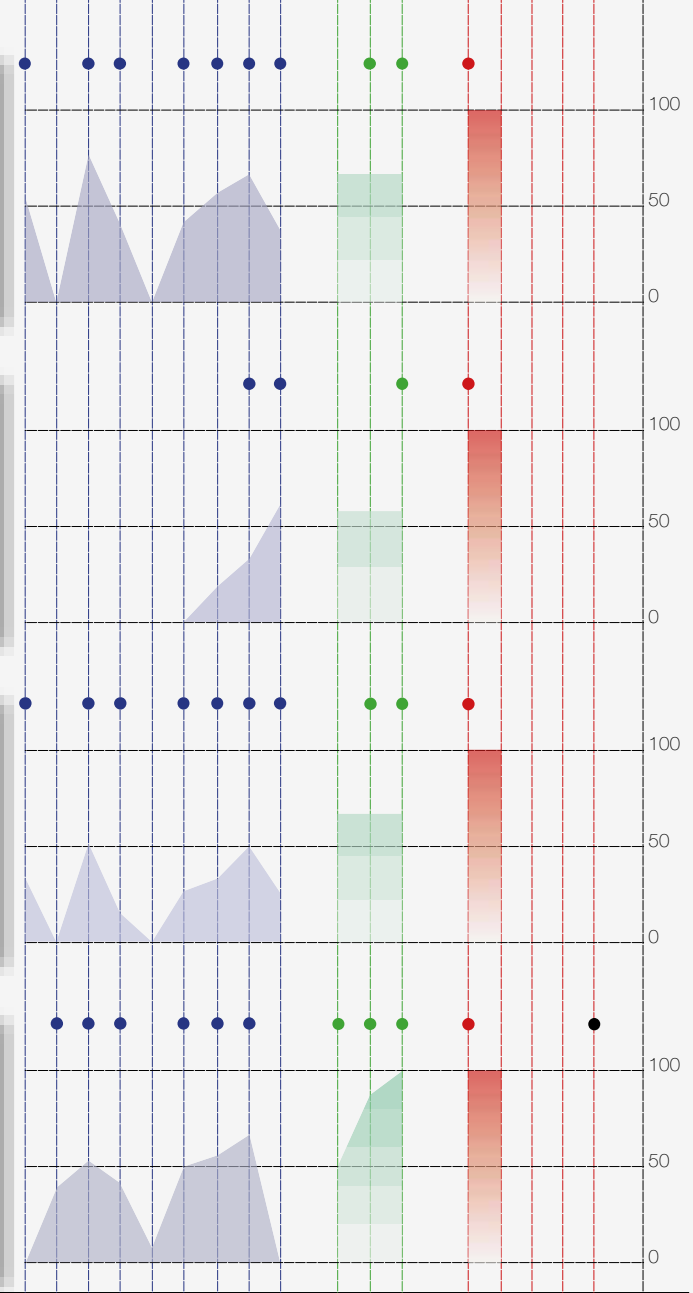
Fibre tessili artificiali 50-250

0,037 1600 1-2 0,60 E -|- -|-



- composizione: fibre tessili sintetiche
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli flessibili
- tipologia: isolante sintetico termoacustico
- pro: [diagramma]
- contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: positivo

volontaria tramite ETA



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità



Densità (ρ)
kg/m³ - UNI EN ISO 7345:2018

Conducibilità termica (λ)
W/m·K

Calore specifico (Cp)
J/kg·K - ASTM E 1296

Res. diffusione del vapore (μ)
% - UNI EN ISO 12086

Coeff. assorbimento acustico (α)
Hz

Reazione al fuoco (classe)
Rilascio di fumi (s) e gocce (d)
UNI EN 13501-1:2009

Assorbimento d'acqua*
% - UNI EN 16535 e 16536:2019
kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019

Resistenza meccanica**
Kpa - Res.: a compressione CS(10)i
Kpa - Res.: a trazione TRI

Proprietà primarie | **Sistema tecnologico** | **Sostenibilità** | **Posa in opera** | **%**

Isolante di confronto

Fibra di caseina 16,87 0,035 1450 ~5,14 0,65 E - - -

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: sfuso, rotoli, pannelli flessibili
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [diagramma]
- contro: [diagramma]

Scheda 1

Vermiculite espansa (EV) 60-120 0,055 900 3-4 - A1 - - -

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato o granulare fibrosa
- morfologia: granuli, pannelli (con resine)
- tipologia: isolante inorganico termo-acustico
- pro: [diagramma]
- contro: radioattività
- bilancio ambientale: moderato (produzione)

Scheda 2

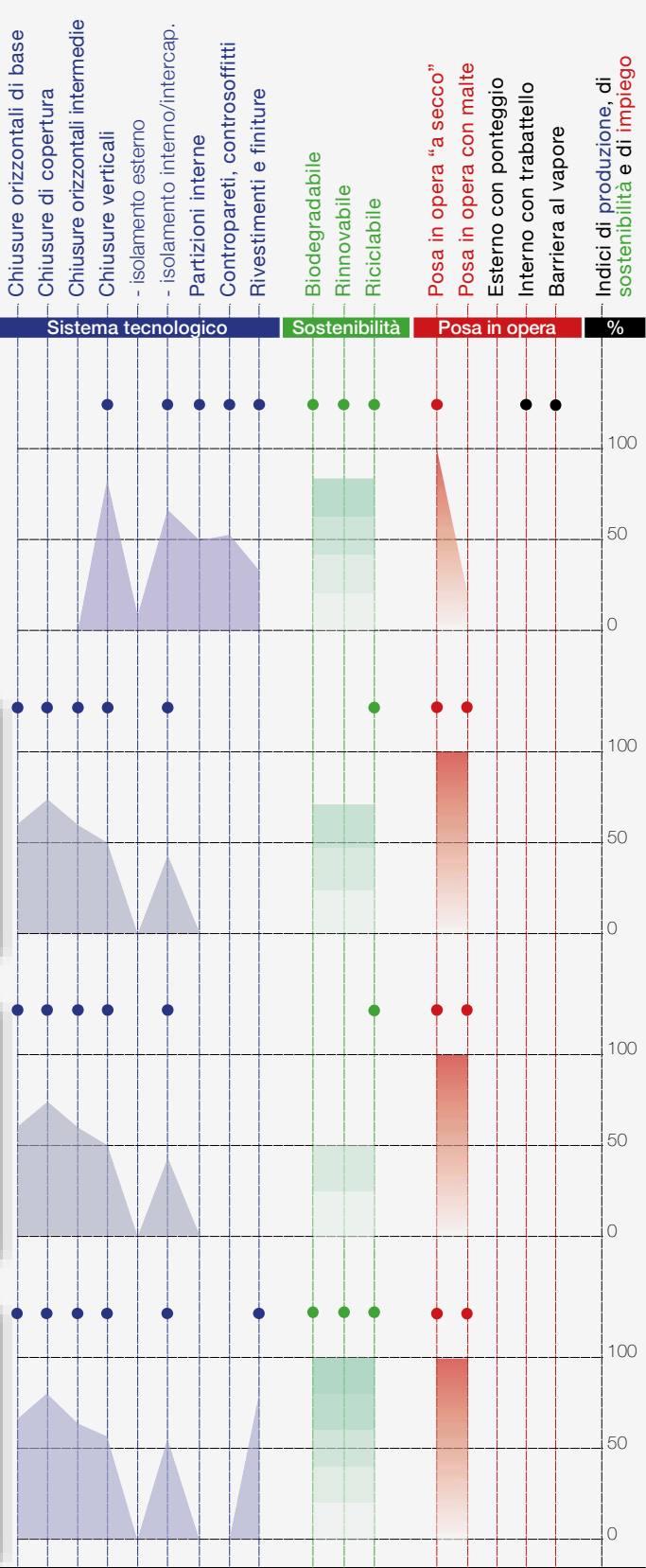
Vermiculite espansa e legante idraulico ~500 0,087 900 3-4 - A1 - - -

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: granulare fibrosa
- morfologia: sfuso in granuli
- tipologia: isolante inorganico termo-acustico
- pro: [diagramma]
- contro: radioattività
- bilancio ambientale: moderato (produzione)

Scheda 3

Argilla espansa sfusa 250-500 0,090 1000 2-8 - A1 - - -

- composizione: cellulare naturale inorganico
- struttura: granulare porosa a cella chiusa
- morfologia: sfuso in granuli
- tipologia: isolante inorganico termo-acustico
- pro: [diagramma]
- contro: [diagramma]
- bilancio ambientale: positivo



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

* sono indicati due valori percentuali: il primo è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per immersione WL(T); il secondo, invece, è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per diffusione WD(V). La dicitura WS rappresenta l'assorbimento d'acqua a breve termine per immersione parziale espresso in kg/m2.
 ** sono indicati due valori: il primo è riferito alla resistenza a compressione al 10% di deformazione CS(10); il secondo, invece, è riferito alla resistenza alla trazione perpendicolare alle facce TRI.

Materiali Isolanti
tipologia: **inorganici**
origine: **naturali**

- Densità (ρ)**
kg/m³ - UNI EN ISO 7345:2018
- Conducibilità termica (λ)**
W/m·K
- Calore specifico (Cp)**
J/kg·K - ASTM E 1296
- Res. diffusione del vapore (μ)**
% - UNI EN ISO 12086
- Coeff. assorbimento acustico (α)**
Hz
- Reazione al fuoco (classe)**
Rilascio di fumi (s) e gocce (d)
UNI EN 13501-1:2009
- Absorbimento d'acqua***
% - UNI EN 16535 e 16536:2019
kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019
- Resistenza meccanica****
Kpa - Res.: a compressione OS(10i)
Kpa - Res.: a trazione TR1

Proprietà primarie

- Sistema tecnologico**
- Chiusure orizzontali di base
 - Chiusure di copertura
 - Chiusure orizzontali intermedie
 - Chiusure verticali
 - isolamento esterno
 - isolamento interno/intercap.
 - Partizioni interne
 - Contropareti, controsoffitti
 - Rivestimenti e finiture
- Sostenibilità**
- Biodegradabile
 - Rinnovabile
 - Riciclabile
- Posa in opera**
- Posa in opera "a secco"
 - Posa in opera con malte
 - Esterno con ponteggio
 - Interno con trabattello
 - Barriera al vapore
- %**
- Indici di produzione, di sostenibilità e di impiego**

Scheda 4

Argilla espansa e legante idraulico 600-1400 0,20 1000 2-8 - A1 -|- -|-




- composizione: cellulare naturale inorganico
- struttura: granulare porosa a cella chiusa
- morfologia: sfuso in granuli
- tipologia: isolante inorganico termo-acustico
- pro: [] contro: []
- bilancio ambientale: positivo

UNI EN 13055:2016

Scheda 5

Perlite espansa sfusa (EPB) 70-240 0,052 950 1-8 - A1 WS4,0 -|-




- composizione: cellulare naturale inorganico
- struttura: granulare porosa a cella chiusa
- morfologia: sfusa in granuli, blocchi
- tipologia: isolante inorganico termo-acustico
- pro: [] contro: radioattività
- bilancio ambientale: moderato (trasporto)

UNI EN 13169:2015

Scheda 6

Perlite espansa e legante idraulico 400-500 0,10 950 1-8 - A1 WS4,0 -|-



- composizione: cellulare naturale inorganico
- struttura: granulare porosa a cella chiusa
- morfologia: sfusa in granuli
- tipologia: isolante inorganico termo-acustico
- pro: [] contro: radioattività
- bilancio ambientale: moderato (trasporto)

UNI EN 13169:2015

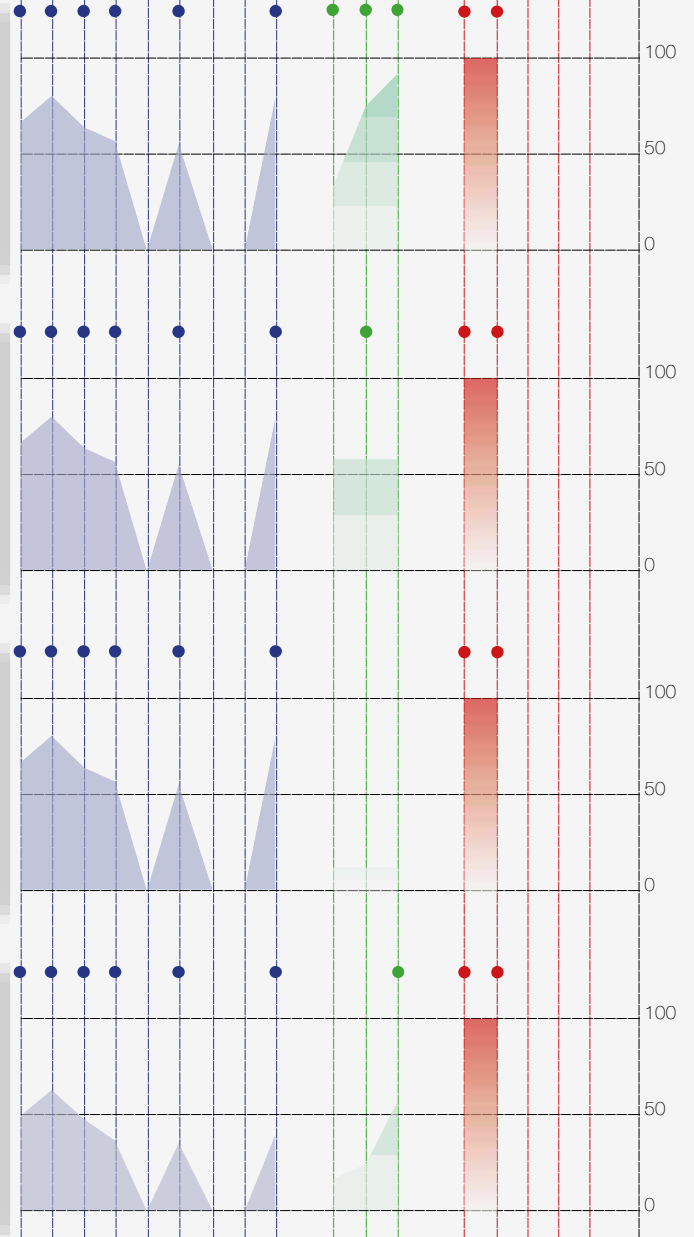
Scheda 7

Pomice naturale 300-750 0,085 1000 2-4 - A1 -|- -|-



- composizione: alveolare naturale inorganico
- struttura: granulare porosa a cella chiusa
- morfologia: sfuso in granuli
- tipologia: isolante inorganico termo-acustico
- pro: [] contro: []
- bilancio ambientale: moderato

volontaria tramite ETA



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

d

Materiali Isolanti
tipologia: **inorganici**
origine: **sintetici**

Densità (ρ)
kg/m³ - UNI EN ISO 7345:2018

Conducibilità termica (λ)
W/m·K

Calore specifico (Cp)
J/kg·K - ASTM E 1296

Res. diffusione del vapore (μ)
% - UNI EN ISO 12086

Coeff. assorbimento acustico (α)
Hz

Reazione al fuoco (classe)
Rilascio di fumi (s) e gocce (d)
UNI EN 13501-1:2009

Absorbimento d'acqua*
% - UNI EN 16635 e 16536:2019
kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019

Resistenza meccanica**
Kpa - Res.: a compressione CS(10)i
Kpa - Res.: a trazione TRI

Proprietà primarie **Sistema tecnologico** **Sostenibilità** **Posa in opera** **%**

Isolante di confronto

Fibra di caseina 16,87 0,035 1450 ~5,14 0,65 E - | - - | -

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: sfuso, rotoli, pannelli flessibili
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: contro:

Scheda 1

Lana di vetro (MW) 10-150 0,040 1030 1-2 0,60 A1,s1,d0 - | - - | -

- composizione: fibrosa di origine minerale
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli, feltri, rotoli, sfuso
- tipologia: isolante minerale termo-acustico
- pro: contro:
- bilancio ambientale: positivo

Scheda 2

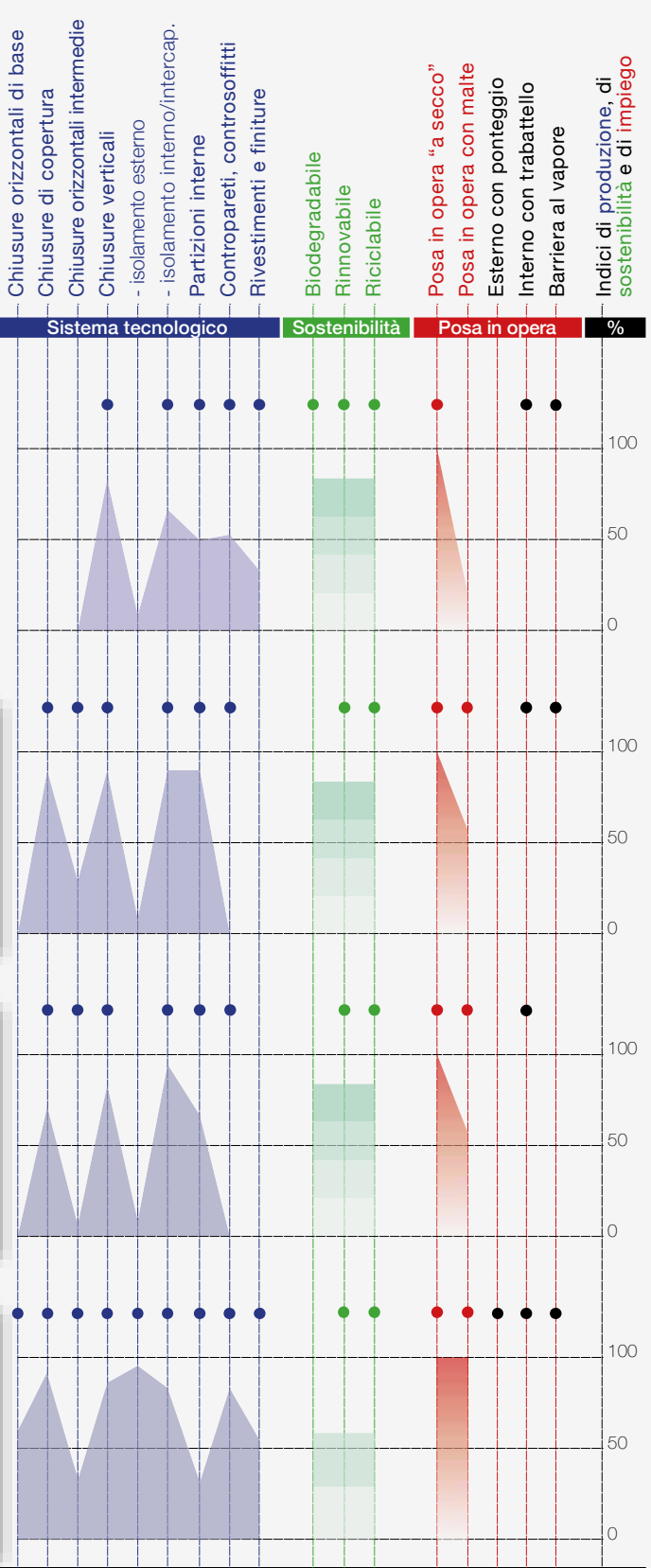
Lana di vetro con alluminio 10-150 0,037 1650 ∞ 0,60 A1,s1,d0 - | - - | -

- composizione: fibrosa di origine minerale
- struttura: pluristrato (alluminio)
- morfologia: pannelli flessibili, feltri, rotoli
- tipologia: isolante minerale termo-acustico
- pro: contro:
- bilancio ambientale: positivo

Scheda 3

Lana di roccia (MW) 15-200 0,037 1030 1-2 0,60 A1 - | - - | -

- composizione: fibrosa di origine minerale
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli rigidi, feltri, sfuso
- tipologia: isolante minerale termo-acustico
- pro: contro:
- bilancio ambientale: moderato (produzione)



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

* sono indicati due valori percentuali: il primo è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per immersione WL(T)i; il secondo, invece, è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per diffusione WD(V)i. La dicitura WS rappresenta l'assorbimento d'acqua a breve termine per immersione parziale espresso in kg/m2.
** sono indicati due valori: il primo è riferito alla resistenza a compressione al 10% di deformazione CS(10)i; il secondo, invece, è riferito alla resistenza alla trazione perpendicolare alle facce TRI.

Materiali Isolanti
tipologia: **inorganici**
origine: **sintetici**

Densità (ρ) kg/m ³ - UNI EN ISO 7345:2018	Conducibilità termica (λ) W/m·K	Calore specifico (Cp) J/kg·K - ASTM E 1296	Res. diffusione del vapore (μ) % - UNI EN ISO 12086	Coeff. assorbimento acustico (α) Hz	Reazione al fuoco (classe) Rilascio di fumi (s) e gocce (d) UNI EN 13501-1:2009	Absorbimento d'acqua* % - UNI EN 16535 e 16536:2019 kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019	Resistenza meccanica** Kpa - Res.: a compressione OS(10) Kpa - Res.: a trazione TR1
--	---	--	---	---	---	--	--

Proprietà primarie

Chiusure orizzontali di base	Chiusure di copertura	Chiusure orizzontali intermedie	Chiusure verticali	Partizioni interne	Contropareti, controsoffitti	Rivestimenti e finiture	Biodegradabile	Rinnovabile	Riciclabile	Posa in opera "a secco"	Posa in opera con malte	Esterno con ponteggio	Interno con trabattello	Barriera al vapore	Indici di produzione, di sostenibilità e di impiego
-------------------------------------	------------------------------	--	---------------------------	---------------------------	-------------------------------------	--------------------------------	-----------------------	--------------------	--------------------	--------------------------------	--------------------------------	------------------------------	--------------------------------	---------------------------	--

Scheda 4

Lana di roccia bitumata

15-200 0,037 1030 1-2 0,60 A1 -|- -|-

- composizione: fibrosa di origine minerale
- struttura: pluristrato (strato impermeabile)
- morfologia: pannelli rigidi e flessibili
- tipologia: isolante minerale termo-acustico
- pro: [colored squares]
- contro: [colored squares]
- bilancio ambientale: moderato (produzione)

UNI EN 13162:2013

Scheda 5

Lana di roccia e gesso rivestito

60-220 0,027 1030 1-2 0,60 A1 -|- -|-

- composizione: fibrosa di origine minerale
- struttura: pluristrato (lastra di gesso)
- morfologia: pannelli rigidi
- tipologia: isolante minerale termo-acustico
- pro: [colored squares]
- contro: [colored squares]
- bilancio ambientale: moderato (produzione)

UNI EN 13162:2013

Scheda 6

Vetro cellulare espanso (CG)

100-220 0,055 950 ∞ - A1 0|0 -|-

- composizione: cellulare sintetico inorganico
- struttura: cellulare a cella chiusa
- morfologia: pannelli, coppelle, perle
- tipologia: isolante minerale termo-acustico
- pro: [colored squares]
- contro: [colored squares]
- bilancio ambientale: positivo

UNI EN 13167:2015

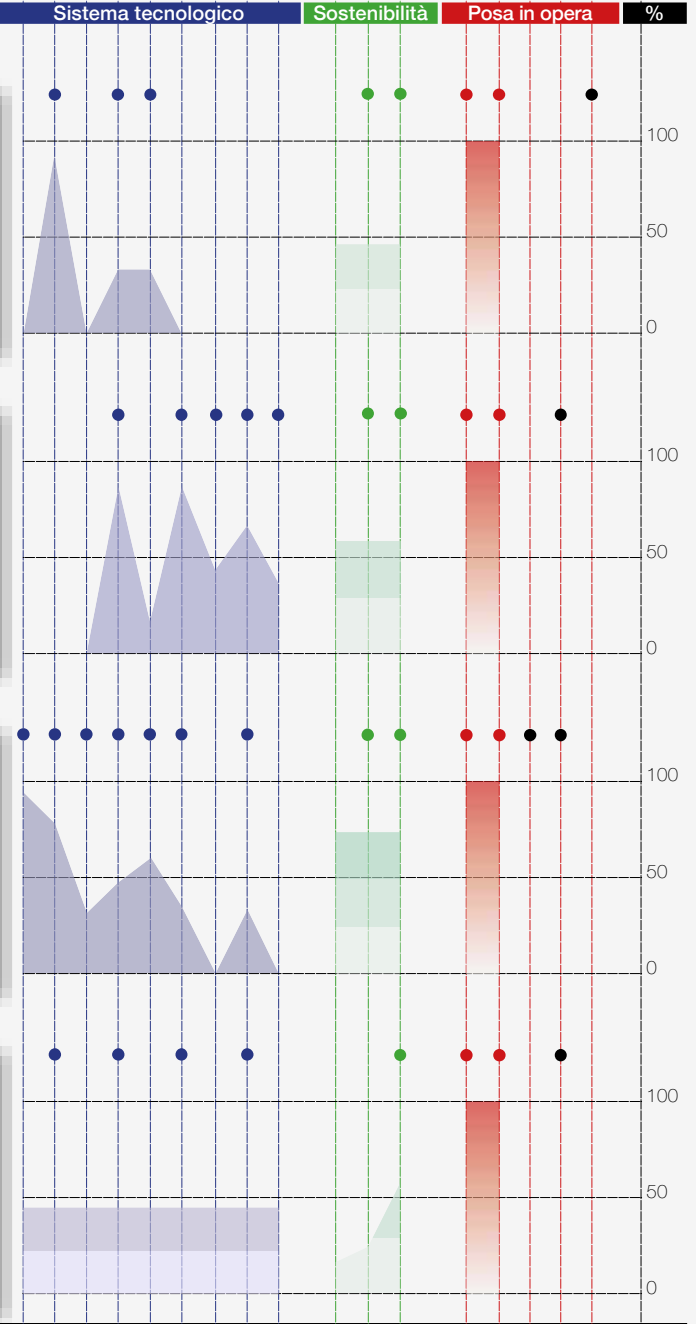
Scheda 7

Silicato di calcio

115 0,045 1300 3 0,35 A1 -|- -|-

- composizione: cellulare sintetico inorganico
- struttura: monostrato a celle aperte
- morfologia: pannelli rigidi
- tipologia: isolante minerale termico
- pro: [colored squares]
- contro: [colored squares]
- bilancio ambientale: positivo

volontaria tramite ETA



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità



Densità (ρ) kg/m³ - UNI EN ISO 7345:2018	Conducibilità termica (λ) W/m·K	Calore specifico (Cp) J/kg·K - ASTM E 1296	Res. diffusione del vapore (μ) % - UNI EN ISO 12086	Coeff. assorbimento acustico (α) Hz	Reazione al fuoco (classe) Rilascio di fumi (s) e gocce (d) UNI EN 13501-1:2009	Assorbimento d'acqua* % - UNI EN 16635 e 16536:2019 kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019	Resistenza meccanica** Kpa - Res.: a compressione CS(10)j Kpa - Res.: a trazione TRI
--	---	--	---	---	---	--	---

Proprietà primarie				Sistema tecnologico				Sostenibilità			Posa in opera			%
--------------------	--	--	--	---------------------	--	--	--	---------------	--	--	---------------	--	--	---

Isolante di confronto

Fibra di caseina 16,87 0,035 1450 ~5,14 0,65 E - - -

- composizione: fibrosa di origine naturale
- struttura: monostrato
- morfologia: sfuso, rotoli, pannelli flessibili
- tipologia: isolante organico termo-acustico
- pro: [bar chart]
- contro: [bar chart]

Scheda 1

Aerogel 150 0,015 1000 5 - Cs1d0 - - -

- composizione: gel di origine minerale
- struttura: monostrato
- morfologia: pannelli flessibili nanoporosi
- tipologia: isolante minerale termo-acustico
- pro: [bar chart]
- contro: [bar chart] costo
- bilancio ambientale: positivo

Scheda 2

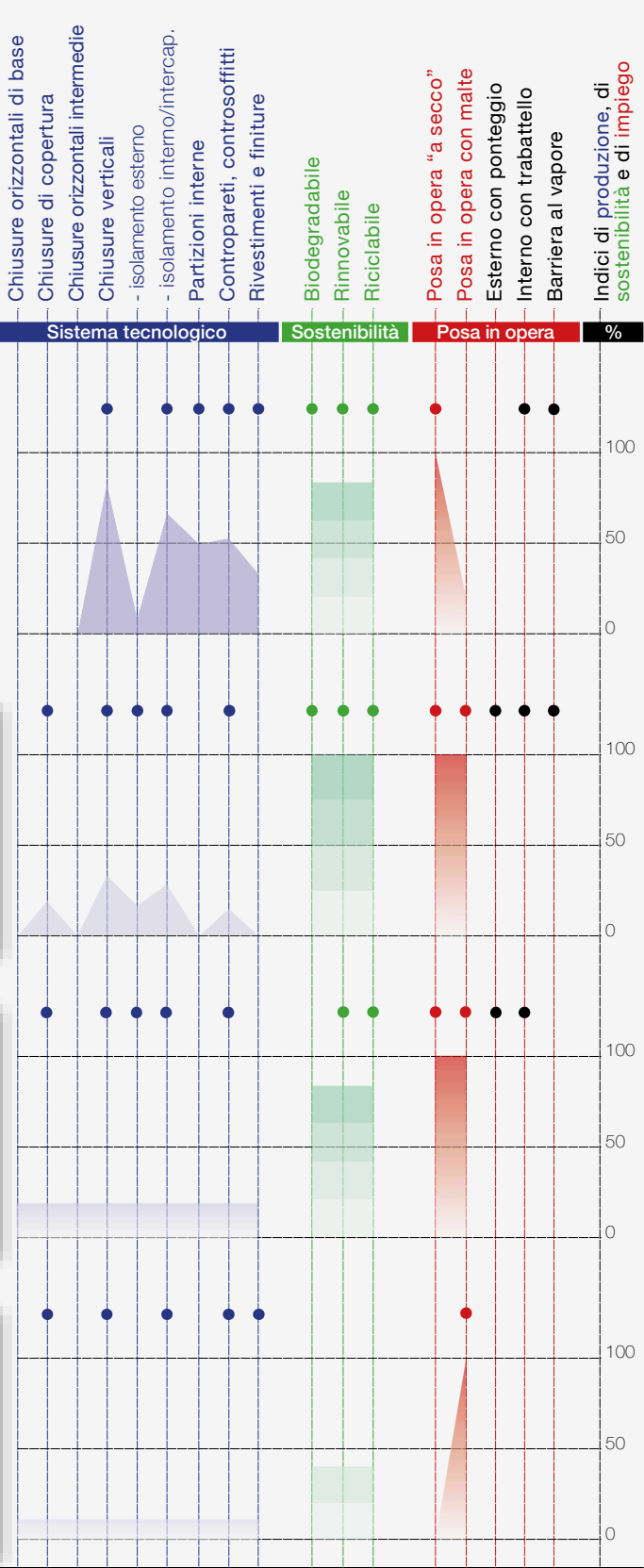
Vacuum Insulating Panels - VIP 10-30 0,005 1200 ∞ - A1 - - -

- composizione: fibrosa di origine minerale
- struttura: pluristrato (alluminio)
- morfologia: pannelli sottovuoto
- tipologia: isolante minerale termo-acustico
- pro: [bar chart]
- contro: [bar chart] costo
- bilancio ambientale: positivo

Scheda 3

Phase Change Materials - PCM 1200 var. var. 1-2 - - - -

- composizione: sali idrati e paraffine
- struttura: variabile (stato solido - fluido)
- morfologia: adattiva al supporto
- tipologia: isolante termo-acustico
- pro: [bar chart]
- contro: [bar chart]
- bilancio ambientale: positivo



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

* sono indicati due valori percentuali: il primo è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per immersione WL(T); il secondo, invece, è riferito all'assorbimento d'acqua a lungo termine per diffusione WD(V). La dicitura WS rappresenta l'assorbimento d'acqua a breve termine per immersione parziale espresso in kg/m2.
 ** sono indicati due valori: il primo è riferito alla resistenza a compressione al 10% di deformazione CS(10); il secondo, invece, è riferito alla resistenza alla trazione perpendicolare alle facce TRI.

Materiali Isolanti di nuova generazione

Densità (ρ) kg/m ³ - UNI EN ISO 7345:2018	Conducibilità termica (λ) W/m·K	Calore specifico (Cp) J/kg·K - ASTM E 1296	Res. diffusione del vapore (μ) % - UNI EN ISO 12086	Coeff. assorbimento acustico (α) Hz	Reazione al fuoco (classe) Rilascio di fumi (s) e gocce (d) UNI EN 13501-1:2009	Assorbimento d'acqua* % - UNI EN 16535 e 16536:2019 kg/mq - UNI EN ISO 29767:2019	Resistenza meccanica** Kpa - Res.: a compressione OS(10) Kpa - Res.: a trazione TR
--	---	--	---	---	---	--	---

Proprietà primarie

Scheda 4

Isolanti riflettenti 55 0,025 1500 ∞ 0,40 Bs2d0 <5 | - 150 | 120

- composizione: sintetici espansi e film emissivi
- struttura: pluristrato
- morfologia: rotoli, pannelli flessibili
- tipologia: isolante riflettente emissivo (ε=0,90)
- pro: [bar chart] contro: costo
- bilancio ambientale: moderato (estrazione)

UNI EN 16012:2015

Scheda 5

Rasante termico fotocatalitico 490 0,029 1000 9 0,60 B1 - | - - | -

- composizione: premiscelato inorganico
- struttura: rasante termico riflettente
- morfologia: intonaco
- tipologia: isolante minerale termo-acustico
- pro: [bar chart] contro: [bar chart]
- bilancio ambientale: moderato (produzione)

volontaria tramite ETA

Scheda 6

Super Insulating materials - SIMs var. <0,020 var. var. var. var. var. var.

- composizione: prodotti sperimentali
- struttura: struttura varia
- morfologia: pannelli ultrasottili
- tipologia: tipologia varia
- pro: [bar chart] contro: costo
- bilancio ambientale: varia

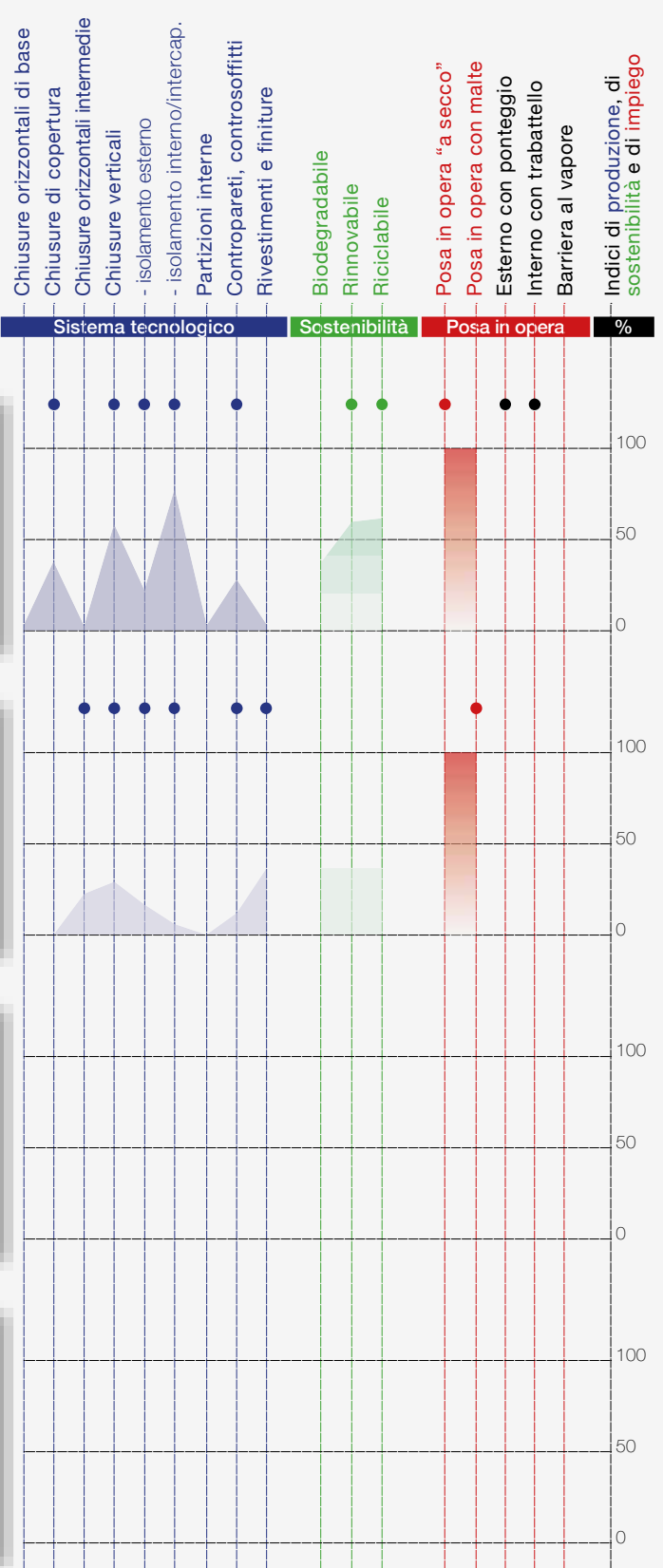
prodotti sperimentali

Scheda 7

Gas-Filled Panels (GFPs) var. var. var. var. var. var. var. var.

- composizione: prodotti sperimentali
- struttura: deflettori multistrato con gas
- morfologia: pannelli ultrasottili
- tipologia: tipologia varia
- pro: [bar chart] contro: costo
- bilancio ambientale: varia

prodotti sperimentali



A | Legenda delle propensioni funzionali

- valore alto
- valore medio
- valore basso
- in estate
- in inverno
- in estate/inverno
- diffusione elevata
- diffusione limitata
- barriera al vapore
- fonoassorbente
- diffondente
- rilascio di gas-gocce
- idrorepellente

B | Legenda delle caratteristiche complementari

- leggerezza
- facilità posa in opera
- ridotto spessore
- elasticità
- inalterabilità
- res. meccanica
- res. fisico/chimica
- res. all'abrasione
- res. ai microrganismi
- stabilità dimensionale termica
- igroscopicità
- idrofilia
- ermeticità
- imputrescibilità

Note bibliografiche

- 1 ANCE - Associazione Nazionale Costruttori Edili - Direzione Affari Economici e Centro Studi dell'Ance, *Osservatorio Congiunturale sull'Industria delle costruzioni*, EdilStampa, Roma, 2019, pagg.99-104.
- 2 Camera dei deputati. Servizio Studi - XVIII Legislatura, *La Comunità internazionale e l'attuazione dell'Agenda globale per lo sviluppo sostenibile. Agenda 2030* - Camera dei Deputati, 2020. pag.5. (<https://www.camera.it/temi/ap/documentazione/temi/pdf/1105015.pdf>).
- 3 D'Olimpio D., *Il Retrofitting energetico e bioclimatico nella riqualificazione edilizia. Tecnologie e soluzioni tecniche per il miglioramento della prestazione energetico-ambientale degli edifici*, Legislazione Tecnica, Roma, 2017, pagg.21-34.
- 4 ANIT - Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e acustico, *Rapporto Anit. Il mercato dei materiali isolanti in Italia*, TEP srl, Milano, 2014, pagg. 4-34.
- 5 Lucchini A., Mazzucchelli E.S., Stefanazzi A., *Rivestimenti a cappotto ad alte prestazioni. Teoria e soluzioni*, Rockwool, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (Milano), 2017, pag.6.
- 6 Grand View Research Inc., *Building Thermal Insulation Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product, (Glass Wool, Mineral Wool, EPS, XPS), By Application (Roof, Wall, Floor), By End-use, By Region, And Segment Forecasts 2019-2025*.
- 7 IAL Consultants, *New market study from IAL Consultants: The European Market for Thermal Insulation Products*. Dr.Gupta Verga. Publisher for the polymer industry, 2018, pagg.1-2.
- 8 Gaspari J., Trabucco D., Zannoni G., *Involucro edilizio e aspetti di sostenibilità. Riflessioni sul comportamento energetico di pareti massive e stratificate iperisolate: performances ambientali ed embodied Energy*, Franco Angeli, Milano, 2010, pag.15.
- 9 Ruzzenenti M., *L'Autarchia verde. Un involontario laboratorio della Green Economy*. Jaca Book, Milano, 2011.
- 10 Pagliuca A., *Materiali Made in Italy. Avanguardia italiana nell'industria delle costruzioni del primo '900*, Gangemi Editore, Roma, 2019.
- 11 Oxman N., *Material Ecology*, MoMA - Museum of Modern Art, New York, 2020.
- 12 Gropius W., *Architettura integrata*. il Saggiatore, Milano, 2010, pag.109.
- 13 Liangyong W., *Architettura integrata. A General theory of architecture*, Edizioni Nuova Cultura, Roma, 2013, pag.83.
- 14 Lucchini A., *Integrazione e automazione delle funzioni impiantistiche*, Edizioni Il Sole 24 Ore - SAIE, Milano, 2001.
- 15 Mazzucchelli E.S., *Edifici ad energia quasi zero. Materiali, tecnologie e strategie progettuali per involucri e impianti innovativi ad alte prestazioni*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna (Rimini), 2013, pag.97.
- 16 Nastri M., *Involucro e architettura*. Maggioli. Santarcangelo di Romagna (Rimini), 2008, pag.93.
- 17 C.R.E.S.M.E., *Centro Ricerche Economiche Sociologiche e di Mercato nell'Edilizia. Valutazione della convenienza e dell'impatto economico dell'isolamento termo-acustico degli edifici*, 2014. (<http://www.fivra.it>).
- 18 Federchimica - Confindustria, *Il ruolo della chimica nel sistema delle costruzioni*, Direzione Analisi Economiche - Internazionalizzazione di Federchimica (a cura di), 2010. (<https://www.federchimica.it>)
- 19 Lucchi E., *Riqualificazione energetica dell'involucro edilizio. Diagnostica e interventi*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2014, pagg.38-70.
- 20 «Sfasamento»: è definito come la differenza di tempo che intercorre tra l'ora in cui si registra la massima temperatura sulla superficie esterna della struttura e l'ora in cui si registra la massima temperatura sulla superficie interna della stessa. Il valore ottimale dello sfasamento è di 12-13 ore. Il calcolo dello sfasamento,

- comunemente trascurato nella progettazione convenzionale, offre una determinante analisi del comfort termico e del comportamento energetico.
- 21 «Smorzamento»: più elevato è il livello dello smorzamento, minore sarà all'interno dell'edificio, la ripercussione della variazione della temperatura esterna, ovvero la temperatura interna tenderà a rimanere costante. Viceversa, a bassi livelli di smorzamento, soprattutto se abbinati a sfasamenti minimi, ogni variazione all'esterno si ripercuote rapidamente, e pressoché integralmente, anche all'interno dell'edificio. Dal punto di vista numerico, questo parametro, indica di quanto, all'interno dell'edificio, viene ridotta la temperatura esterna in relazione alla temperatura media della superficie interna.
- 22 Benedetti C., *“Materiali isolanti. Appunti per la progettazione e la posa in opera”*, in Benedetti C. (a cura di), *“Guide pratiche del Mater CasaClima”*, 3^a edizione, bu,press, Università di Bolzano, Bozen-Bolzano, 2014.
- 23 «Inerzia termica»: è un fenomeno fisico che avviene, in condizioni termiche variabili, all'interno di un sistema elevato di spessore che determina una trasmissione lenta del flusso di calore da un lato all'altro del sistema stesso. Questo fenomeno si verifica quando le temperature ambientali esterne/interne subiscono delle oscillazioni e i materiali del sistema possiedono una adeguata “capacità termica”: per esempio se in un edificio le condizioni di temperatura ambientale interne ed esterne sono costanti si stabilirà, dopo un periodo di assestamento, un gradiente termico costante attraverso la muratura paragonabile in ampiezza al tempo nel quale la temperatura interna e/o esterna della muratura cambia, il momento di massimo ingresso del calore da uno dei due lati può concludersi prima che l'ondata di temperatura raggiunga l'altro lato. Perciò una quantità di calore che viene immagazzinata nella massa muraria comincia a percorrere lo spessore in senso inverso e a essere emessa su entrambi i lati, in Francese D., *“Architettura bioclimatica. Risparmio energetico e qualità della vita nelle costruzioni”*, Utet, Torino, 1996.
- 24 Benedetti C., *“Materiali isolanti. Appunti per la progettazione e la posa in opera”*, in Benedetti C. (a cura di), *“Guide pratiche del Mater CasaClima”*, 3^a edizione, bu,press, Università di Bolzano, Bozen-Bolzano, 2014, pag.15.
- 25 «Condensazione interstiziale»: essa può avvenire facilmente all'interno di una muratura contenente un materiale isolante, a causa della notevole diminuzione di temperatura nello spessore dell'isolante. Il criterio utilizzato dalla normativa per valutare la formazione di condensazione interstiziale non si basa sulla temperatura, bensì sulla pressione parziale del vapore. Il vapore condensa poiché la sua pressione parziale raggiunge la pressione di saturazione. La pressione di saturazione del vapore è valutata in funzione della sua temperatura, assunta per ipotesi pari a quella della parete muraria. L'analisi della condensazione interstiziale, ovvero della verifica termoigrometrica delle strutture esterne, viene condotta mediante il diagramma di Glaser, in Spiga M., *Efficienza energetica e termofisica dell'edificio*, Società Editrice Esculapio, Bologna, 2018, pag.255.
- 26 Portale Inquinamento acustico, *“Manuale tecnico-pratico”*, Mattevi L. (a cura di), *“Assorbimento acustico. Metodi di miglioramento delle prestazioni acustiche degli edifici”*, in www.inquinamento-acustico.it pag.5.
- 27 Ivi, pag.6.
- 28 Per esempio, il valore CC(2/1,5/50)250 identifica che durante un tempo di 50 anni con un carico costante di 250 kPa, il materiale isolante presenta un valore di deformazione viscosa (creep) dell'1,5% con una riduzione complessiva dello spessore

- del 2%.
- 29 Bertolotti G., Capitelli V., *Dizionario delle materie plastiche*, Tecniche Nuove, Milano, 2007, pag.235.
- 30 Frigione G., Mairo N., *Materiali per l'edilizia. Una guida ai materiali strutturali, ausiliari e di rivestimento*, Hoepli, Milano, 2006, pag.298.
- 31 Oberti I., *Prodotti edilizi per edifici ecocompatibili*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (Rimini), 2014, pag.60.
- 32 Lavagna M., Mondini D., Paleari M., *Murature ad alte prestazioni. Valutazioni termiche, acustiche, ambientali ed economiche di soluzioni di involucro in laterizio*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (Rimini), 2011, pag.243.
- 33 Faragò F., *Manuale pratico di edilizia sostenibile*. In: Scudo G., Grosso M. (a cura di), *Progettazione ecologica*, Sistemi Editoriali, Cercola (Napoli), 2008, pag.41.
- 34 Vedi nota 30, pag.297.
- 35 Beverina L., *Futuro materiale. Elettronica da mangiare, plastica biodegradabile, l'energia dove meno te l'aspetti*, Il Mulino, 2020.
- 36 Direttiva Europea 2008/98/EC, Waste Framework Directive.
- 37 Guerri Sorbetti F., Barbari M., *L'edilizia rurale tra sviluppo tecnologico e tutela del territorio*, in *Convegno della II Sezione AIIA*, Firenze, 20-22 settembre 2012, Firenze University Press, pag.213.
- 38 In Italia, l'efficacia dei Criteri Ambientali Minimi è stata assicurata grazie all'art.18 della L.221/2015 e, successivamente, all'art.34 recante "Criteri di sostenibilità energetica e ambientale" del D.Lgs.50/2016 "Codice degli appalti" (modificato dal D.Lgs 56/2017), che ne hanno reso obbligatoria l'applicazione da parte di tutte le stazioni appaltanti. Questo obbligo garantisce che la politica nazionale in materia di appalti pubblici verdi sia incisiva non solo nell'obiettivo di ridurre gli impatti ambientali, ma nell'obiettivo di promuovere modelli di produzione e consumo più sostenibili, "circolari " e nel diffondere l'occupazione "verde".
- 39 Gazzetta ufficiale Serie Generale n.259 del 6 Novembre 2017, *Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*, paragrafo 2.4.2.9 - "Isolanti termici ed acustici", pag.39.
- 40 Legambiente, rapporto dell'Osservatorio Recycle - Legambiente, 100 Materiali per una nuova edilizia, 2016, pag.6.

05

05 Applicazioni sperimentali della fibra a matrice biopolimerica a base di caseina per l'isolamento termico e acustico dell'involucro edilizio

Sinòpsi Il passaggio dalla fase sperimentale del campione prototipale alla sua traduzione in forma costruttiva, costituisce un passaggio fondamentale della ricerca, non solo come raggiungimento di una più profonda comprensione del sistema, bensì come una fase di completamento di un modello (o modelli) di utilità reali su cui effettuare validazioni tecnico-scientifiche e definirne il comportamento e le modalità di impiego e posa in opera della fibra biopolimerica a base di caseina. Le istanze teoriche e sperimentali raggiungono così il loro senso più compiuto nella fase finale indirizzata all'attività pratica e operativa, che costituisce l'essenza della ricerca, a corredo di un approccio metodologico valido di analisi e progetto, all'interno di un ambito così complesso come quello della progettazione di sistemi di involucro "a secco" per l'ottimizzazione prestazionale ed energetica del patrimonio edilizio storico e di nuova costruzione.

Il progetto di ricerca, dunque, si focalizza sullo studio di sistemi costruttivi che oltre a recepire istanze tecnologiche e materiche tipiche della tradizione, introduce al loro interno l'innovativo pannello termoisolante in fibra di caseina. Lo scopo è valutare le proprietà del materiale innovativo, la compatibilità con altri materiali, le caratteristiche strutturali e morfologiche, le problematiche dei metodi di posa in opera e la flessibilità operativa, al fine di ipotizzare possibili stratigrafie di facciate per la realizzazione di un involucro 'attivo', adattabile in funzione delle specifiche caratteristiche costruttive dell'edificio oggetto di intervento e delle esigenze di riqualificazione energetica ed architettonica.

In particolare, si propone una serie di soluzioni costruttive per l'ottimizzazione prestazionale dell'involucro che, da elemento statico, lo trasformi in elemento "dinamico", capace di interagire con l'ambiente interno ed esterno, attraverso l'interope-

rabilità dei suoi componenti di facciata, in relazione alla variabilità e alla flessibilità delle sue prestazioni.

Le sperimentazioni sviluppate sono:

- Sperimentazione 1: pannello isolante acustico bistrato con fibra di caseina e bioplastica in sfere riciclata;
- Sperimentazione 2: pannello isolante con strato monolitico in gesso, fibra di caseina e sughero;
- Sperimentazione 3: blocco di tamponamento in gesso ad alta densità e fibra di caseina termoriflettente;
- Sperimentazione 4: blocco termoisolante in gesso con intercapedine interna e strato termoriflettente in fibra di caseina;
- Sperimentazione 5: blocco modulare in gesso e strato termoriflettente in fibra biopolimerica di caseina;
- Sperimentazione 6: pannello isolante alveolare con crocette poliedriche di caseina espansa e film termoriflettente;
- Sperimentazione 7: blocco isolante in fibra di caseina e resina melamminica e rivestimento domotico in pannelli tessili;
- Sperimentazione 8: stuoia flessibile in fibra caseinica feltrata fonoassorbente e tubi capillari radianti in polipropilene.

Le istanze e gli obiettivi della ricerca riguardano proprio la definizione di processi costruttivi eco-compatibili che rispettino tanto i requisiti prestazionali richiesti dalle attuali normative, quanto le esigenze di flessibilità progettuale e resa formale, finalizzate a garantire esiti architettonici ed energetici soddisfacenti.

5.1. Campioni prototipali e modelli di utilità della fibra a matrice biopolimerica a base di caseina

Il passaggio dalla fase sperimentale del campione prototipale alla sua traduzione in forma costruttiva, costituisce un passaggio fondamentale della ricerca, non solo come raggiungimento di una più profonda comprensione del sistema, bensì come una fase di completamento di un modello (o modelli) di utilità reali su cui effettuare validazioni tecnico-scientifiche e definirne il comportamento e le modalità di impiego e posa in opera della fibra biopolimerica a base di caseina. Le istanze teoriche e sperimentali raggiungono così il loro senso più compiuto nella fase finale indirizzata all'attività pratica e operativa, che costituisce l'essenza della ricerca, a corredo di un approccio metodologico valido di analisi e progetto, all'interno di un ambito così complesso come quello della progettazione di sistemi di involucro "a secco" per l'ottimizzazione prestazionale ed energetica del patrimonio edilizio storico e di nuova costruzione.

Il progetto di ricerca, dunque, si focalizza sullo studio di sistemi costruttivi che oltre a recepire istanze tecnologiche e materiche tipiche della tradizione, introduce al loro interno l'innovativo pannello termoisolante in fibra di caseina. Lo scopo è valutare le proprietà del materiale innovativo, la compatibilità con altri materiali, le caratteristiche strutturali e morfologiche, le problematiche dei metodi di posa in opera e la flessibilità operativa, al fine di ipotizzare possibili stratigrafie di facciate per la realizzazione di un involucro 'attivo', adattabile in funzione delle specifiche caratteristiche costruttive dell'edificio oggetto di intervento e delle esigenze di riqualificazione energetica ed architettonica. Uno degli aspetti imprescindibili del progetto di ricerca consiste nella volontà di sviluppare una nuova cultura della sostenibilità al vaglio della Green Deal Economy, prevedendo l'utilizzo di materiali sostenibili che, impiegati all'interno di un sistema tecnologico

per gli edifici del patrimonio edilizio storico e recente, assicurino alcune qualità fondamentali in base alle esigenze prestazionali richieste: durabilità, flessibilità, reversibilità, minimizzazione del consumo di energia nell'intero ciclo di vita, lavorazione, posa in opera, riciclo o dismissione. Un ulteriore aspetto, molto importante nel periodo della riqualificazione funzionale ed energetica del patrimonio storico e contemporaneo è la volontà di sviluppare un sistema integrato che consenta di realizzare sistemi di facciata in grado di adattarsi alla morfologia dell'involucro esistente, permettendo conseguentemente di eseguire soluzioni "su misura". Le istanze e gli obiettivi della ricerca riguardano proprio la definizione di processi costruttivi eco-compatibili che rispettino tanto i requisiti prestazionali richiesti dalle attuali normative, quanto le esigenze di flessibilità progettuale e resa formale, finalizzate a garantire esiti architettonici ed energetici soddisfacenti.

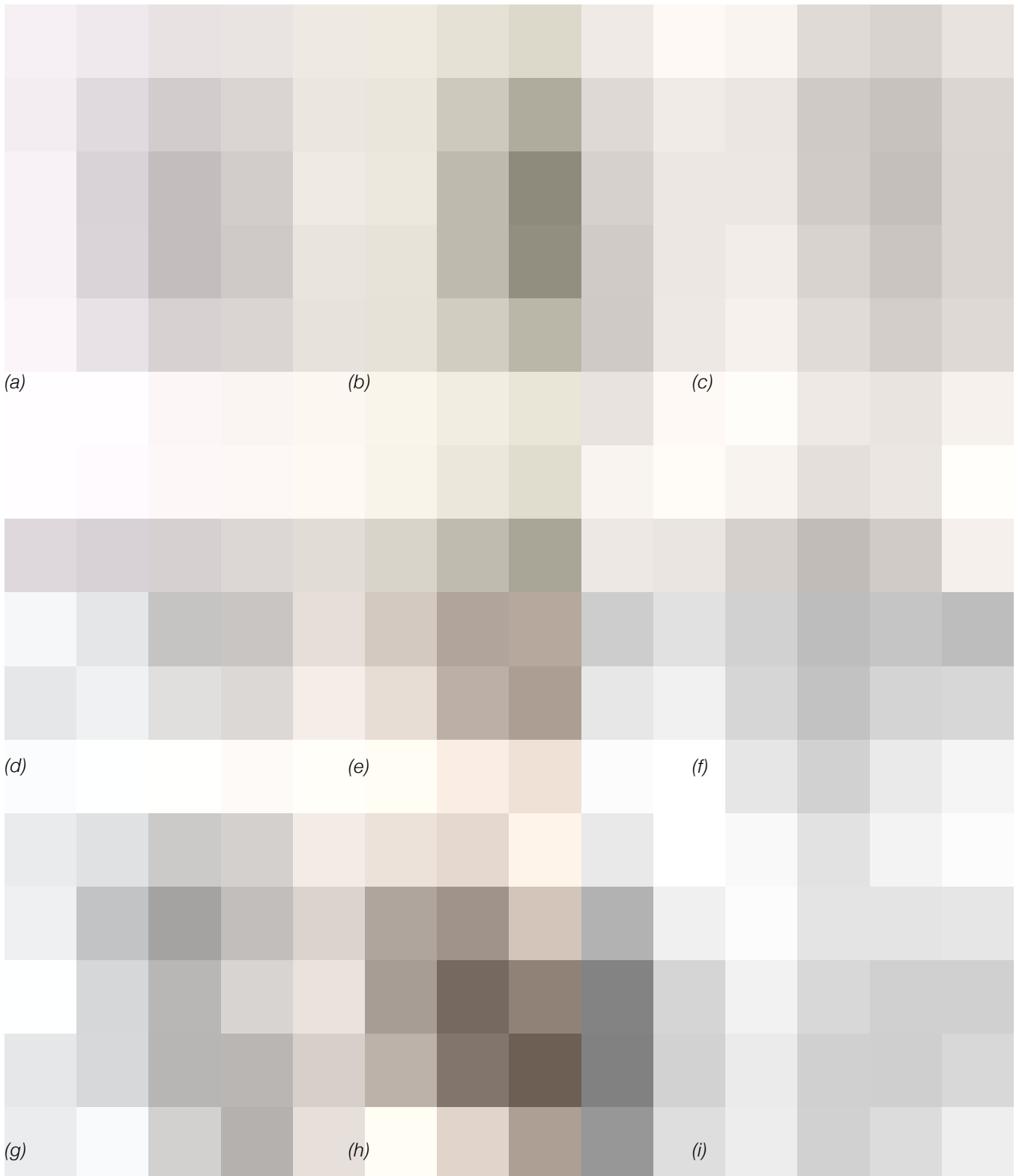
In particolare, si propone una serie di soluzioni costruttive per l'ottimizzazione prestazionale dell'involucro che, da elemento statico, lo trasformi in elemento "dinamico", capace di interagire con l'ambiente interno ed esterno, attraverso l'interoperabilità dei suoi componenti di facciata, in relazione alla variabilità e alla flessibilità delle sue prestazioni (fig.2).

Le sperimentazioni proposte sono:

- Sperimentazione 1: *pannello isolante acustico bistrato con fibra di caseina e bioplastica in sfere riciclate*;
- Sperimentazione 2: *pannello isolante con strato monolitico in gesso, fibra di caseina e sughero*;
- Sperimentazione 3: *blocco di tamponamento in gesso ad alta densità e fibra di caseina termoriflettente*;
- Sperimentazione 4: *blocco termoisolante in gesso con intercapedine interna e strato termoriflettente in fibra di caseina*;

2. Campioni prototipali e modelli di utilità della fibra a matrice biopolimerica a base di caseina: a) campione prototipale; b) *pannello isolante acustico bistrato con fibra di caseina e bioplastica in sfere riciclate*; c) *pannello isolante melaminico in gesso, fibra di caseina e sughero*; d) *blocco di tamponamento in gesso ad alta densità e fibra di caseina termoriflettente*; e) *blocco termoisolante in gesso con intercapedine interna e strato termoriflettente in fibra di caseina*; f) *blocco modulare in gesso e strato termoriflettente in fibra biopolimerica di caseina*; g) *pannello isolante alveolare con crocette poliedriche di caseina espansa e film termoriflettente*; h) *blocco isolante in fibra di caseina e resina melaminica e rivestimento domotico in pannelli tessili*; i) *stuoia flessibile in fibra caseinica feltrata fonoassorbente e tubi capillari radianti in polipropilene*.

- Sperimentazione 5: *blocco modulare in gesso e strato termoriflettente in fibra biopolimerica di caseina;*
- Sperimentazione 6: *pannello isolante alveolare con crocette polidriche di caseina espansa e film termoriflettente;*
- Sperimentazione 7: *blocco isolante in fibra di caseina e resina melamminica e rivestimento domestico in pannelli tessili;*
- Sperimentazione 8: *stuoia flessibile in fibra caseinica feltrata fonoassorbente e tubi capillari radianti in polipropilene.*



Sperimentazione 1: pannello isolante acustico bistrato con fibra di caseina e bioplastica in sfere riciclate

La prima sperimentazione riguarda la progettazione di un pannello isolante acustico bistrato con fibra di caseina e bioplastica in sfere riciclate. Essa rappresenta, dunque, la declinazione del campione isolante precedentemente prototipato (pannello in fibra di caseina) in una versione migliorata dal punto di vista delle prestazioni acustiche. L'ottimizzazione è fornita non solo dalle caratteristiche intrinseche della fibra di caseina (il cui valore di coefficiente di assorbimento acustico ponderato varia dai 0,64 ai 0,72 per una frequenza compresa tra 800 e i 1250 Hz), ma in modo particolare dalla geometria dello strato composito monolitico, realizzato in fibra caseinica e bioplastica riciclata. La bioplastica, oltre al soddisfacimento dei requisiti di impiego obbligatorio di materiale riciclato (secondo i Criteri Ambientali Minimi), costituisce il materiale termo coesivo, in grado di conferire al prodotto finale resistenza meccanica e stabilità dimensionale e morfologica. Lo strato, progettato come superficie booleana, si pone come elemento di rivestimento superficiale macroporoso, senza ulteriori strati di finitura. La superficie microporosa potrà comunque essere rifinita mediante tinteggiatura o con intonaco (in questo caso applicato con intonacatrice a spruzzo). Lo strato monolitico, inoltre, può essere dotato di scanalature laterali per favorire la posa in opera con sistemi di ancoraggio meccanico per la realizzazione di contropareti e controsoffitti isolati dal punto di vista termico ed acustico.

La morfologia del pannello composito, geometricamente definita da un booleana, garantisce una equilibrata diffusione del suono e un assorbimento del riverbero acustico. Inoltre la conformazione paraboloidica della superficie fa sì che l'onda riflessa subisca una propagazione di tipo sferico. Questa è una condizione ottimale per l'impiego del prodotto in diverse tipologie di ambienti in cui sono richiesti partico-

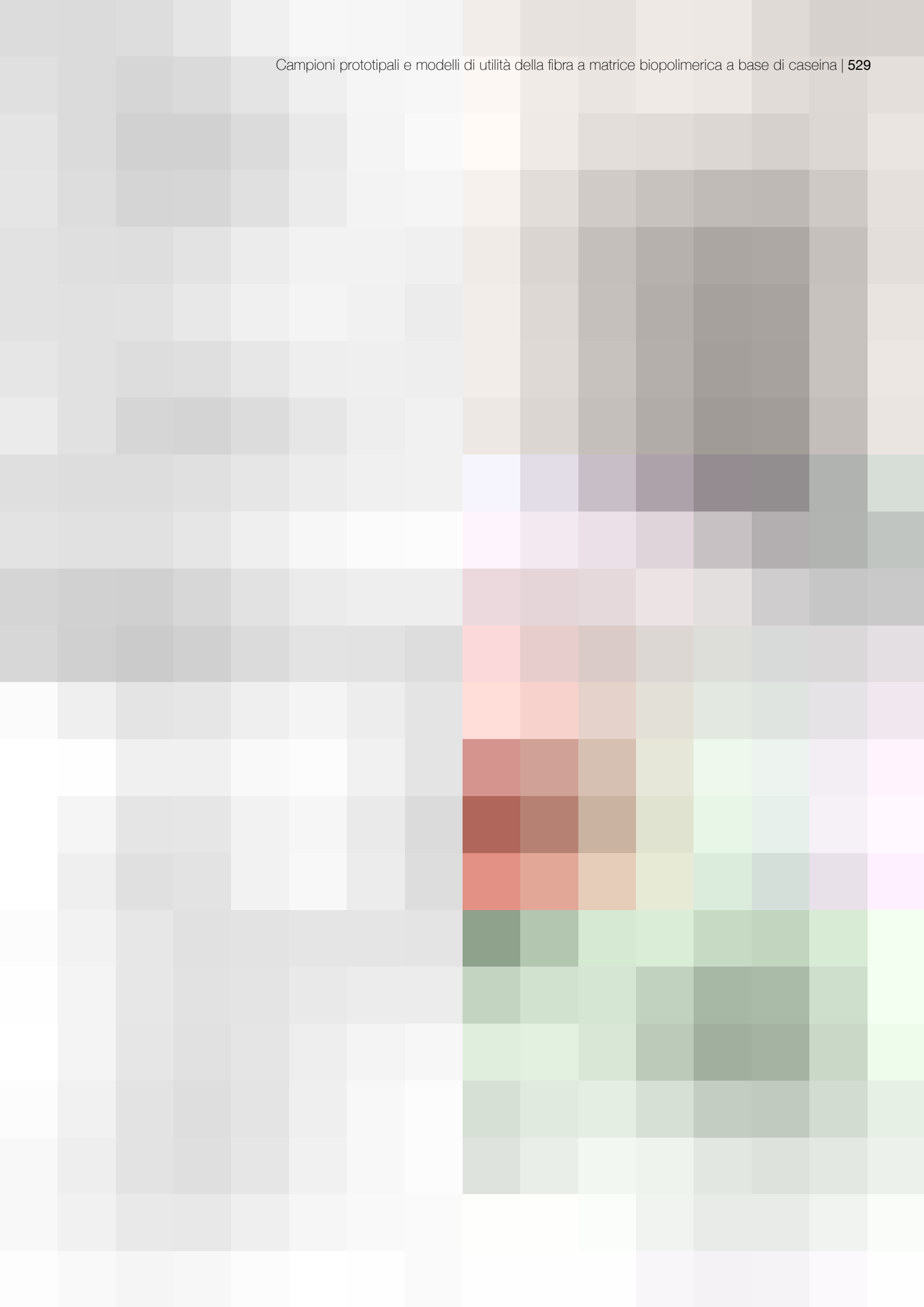
lari requisiti di isolamento acustico.

A tal proposito è stata effettuata la validazione parametrica del comportamento acustico del pannello, con l'ausilio di software specifici. Nel presente caso è stato utilizzato il software *Comsol Multiphysics*, una piattaforma di simulazione che comprende tutti i passaggi di lavoro di modellazione: dalla definizione di geometrie, proprietà dei materiali e della fisica per la descrizione di fenomeni specifici, fino alla risoluzione e al post-processing per l'ottenimento di risultati accurati e non dissimile dal comportamento reale.

Con il *metodo degli elementi finiti* (FEM) e con il *metodo degli elementi a contorno* (BEM) ed assegnando geometrie e caratteristiche fisiche e meccaniche al campione, si è proceduto con la simulazione, proiettando un flusso di onde elastiche e di pressione sulla superficie del pannello, variando anche l'incidenza del suono. Lo schema ottenuto con l'analisi *Poroelastic Waves* (impiegata specificatamente per materiali porosi) si basa sulla risoluzione delle equazioni di Biot ed Helmholtz. Il risultato ottenuto è un perfetto equilibrio tra suono riflesso (valore 1) e suono assorbito (valore -1) (fig.3). È possibile, quindi, impiegare il pannello sia come materiale fonoassorbente, sia come materiale diffondente.

3. Interfaccia del software *Comsol Multiphysics* © per l'analisi *Poroelastic Waves* del pannello acustico bistrato in fibra di caseina e bioplastica in sfere.





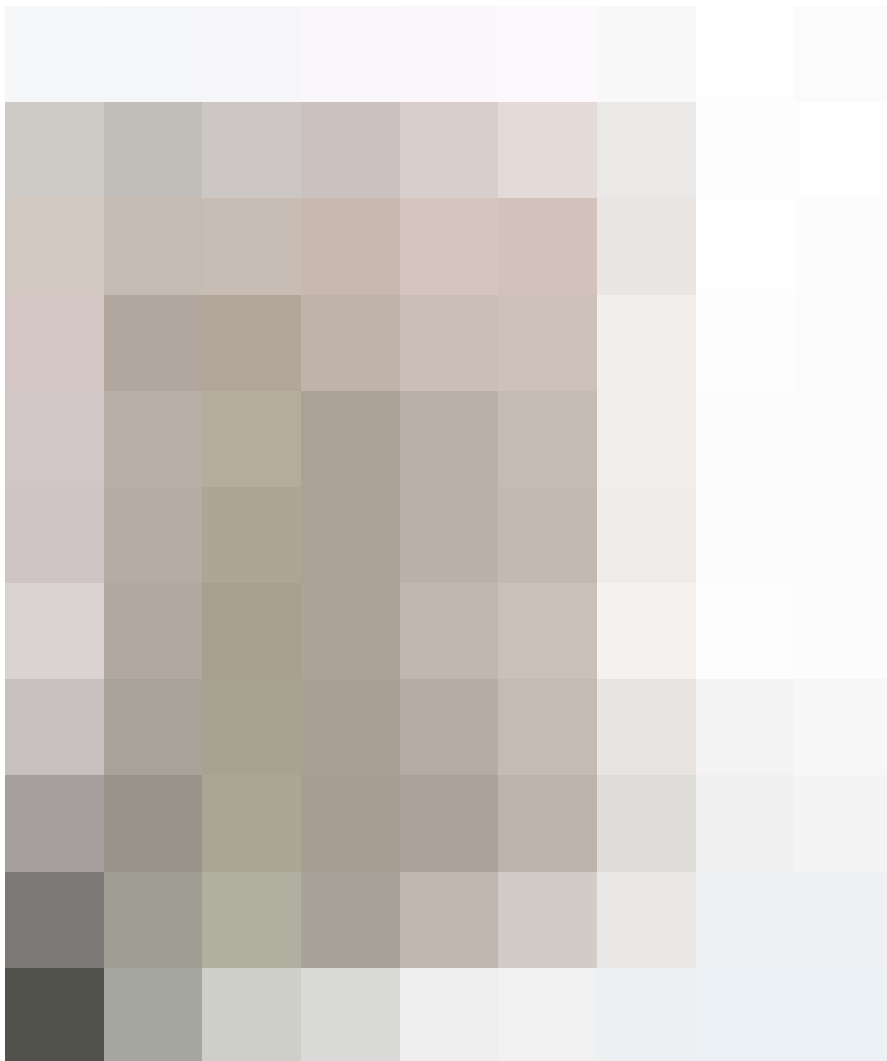
Sperimentazione 2: pannello isolante con strato monolitico in gesso, fibra di caseina e sughero

La sperimentazione riguarda la progettazione e la prototipazione di un pannello termoisolante con strato monolitico in gesso, fibra di caseina e sughero. La sperimentazione ha l'obiettivo di validare, mediante la produzione di un campione reale, le relative caratteristiche fisiche e chimiche, ma al tempo stesso dimostrare l'elevata biocompatibilità della fibra di caseina rispetto ad altri materiali convenzionali impiegati in edilizia, come il gesso ed il sughero.

Il risultato è un pannello monolitico a ridotto spessore costituito da una miscela di gesso, idrato di caseina ammoniacale, fibra di caseina e sughero. Mentre al gesso e all'idrato di caseina ammoniacale sono

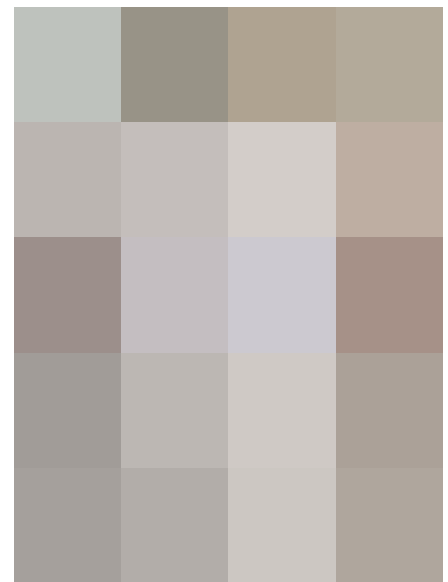
demandati i compiti rispettivamente di legante e collante elastico; la fibra di caseina e il sughero, invece, conferiscono al pannello le dovute prestazioni termiche ed acustiche. Ne deriva una lastra sottile molto resistente e al tempo stesso leggera e isolante, che può essere combinata con uno strato flessibile di fibra di caseina o rivestita con uno strato di cartone, ponendosi come valida alternativa alla convenzionale lastra di gesso (o cartongesso) (figg.4-5).

Il prodotto finale trova impiego per la realizzazione di contropareti e controsoffitti isolati termicamente ed acusticamente. Il pannello, inoltre, di facile impiego e posa in opera, presenta un bilancio ambientale positivo dovuto all'impiego di materiali naturali e ampiamente disponibili, nonché facilmente reimpiegabili alla fine del ciclo di vita (per esempio come aggregati di calcestruzzi alleggeriti).



4

4. Campione prototipale di un pannello isolante con strato monolitico in gesso, fibra di caseina e sughero.
5. Fase di formatura del campione prototipale.



5

Sperimentazione 3: blocco di tamponamento in gesso ad alta densità e fibra di caseina termoriflettente

La terza sperimentazione è un blocco di tamponamento in gesso ad alta densità e fibra caseinica termoriflettente. L'obiettivo della presente sperimentazione è quello di progettare un blocco di tamponamento a ridotto spessore (24cm) che inglobi internamente il materiale isolante, costituito da un pannello flessibile di fibra caseinica rivestita da uno strato termoriflettente basso emissivo. L'impiego del gesso è giustificato dalla volontà di fornire un prodotto innovativo ed alternativo rispetto ai convenzionali blocchi forati di laterizio (isolati e non isolati) in grado di soddisfare numerosi requisiti prestazionali. L'alta densità e la struttura molecolare del gesso, sono in grado di soddisfare numerose proprietà: esso è idrofugo, ignifugo, idrorepellente e presenta una elevata resistenza meccanica e all'effrazione. Il gesso, inoltre, presenta elevate capacità di regolazione dell'umidità ambientale contribuendo con la barriera al vapore, ove richiesta, a prevenire la formazione di condense superficiali o interstiziali. Inoltre, esso è in grado di assorbire e trasformare alcuni tipi di *Composti Organici Volatili* (VOC) dannosi presenti nell'aria, migliorando sensibilmente il benessere indoor. Grazie alla flessibilità d'uso gli elementi in gesso possono essere facilmente applicati mediante sistemi di posa in opera a secco, senza l'impiego di malte cementizie. Ne deriva, dunque, una superficie perfettamente planare che non necessiterà di intonaco, ma di una semplice rasatura a velo. È un materiale plastico e facilmente lavorabile, quindi si possono ottenere per estrusione, diversi profili. Il campione prototipale di blocco in gesso è costituito da due spondali a "C" resi solidali con una rete metallica o fibrorinforzata in corrispondenza del giunto "maschio-femmina", inserita durante la produzione nella fase plastica del materiale. L'unione degli elementi crea una interca-

pedine interna in cui è inserito un pannello flessibile di materiale termoisolante in fibra caseinica, opportunamente protetto da uno strato termoriflettente in alluminio che fungerà anche da barriera al vapore. Per assicurare la continuità del materiale isolante, il giunto 'maschiato' presenta un sottile cuscinetto di materiale isolante termoriflettente, opportunamente sagomato e protetto dalla suddetta rete fibrorinforzata. L'isolante termico e acustico alloggiato all'interno dell'intercapedine è distanziato rispetto alla superficie resistente da ambedue i lati. Le camere d'aria, abbinata allo strato termoriflettente e all'isolante in fibra caseinica, contrastano efficacemente la trasmissione di calore per irraggiamento e convezione durante la stagione estiva ed invernale. L'alluminio, infatti, essendo un materiale basso emissivo (con un valore di 0,05), può riflettere ben il 98% di energia termica conferendola nuovamente all'ambiente interno e/o esterno. La fibra di caseina, invece, riduce il flusso termico trasmesso per conduzione. L'isolante, inoltre, essendo sospeso tra le due camere d'aria, presenta un ottimo comportamento acustico ottenuto dissipando l'onda acustica mediante la vibrazione (effetto molla) dello stesso. Lo svantaggio del presente blocco sperimentale è legato al fattore di costo che però è facilmente ammortizzato da una serie di vantaggi: il primo vantaggio è dato dalla riduzione dello spessore delle pareti perimetrali, traducendosi in un aumento delle superfici calpestabili; il secondo vantaggio è dato dalla riduzione della manodopera, in quanto con la sola posa in opera del blocco, si assolverebbe anche la fase di posa dell'isolante, della barriera al vapore e della fase di preparazione della superficie di finitura; il terzo vantaggio economico è dato dalla omissione della fornitura e posa in opera dell'intonaco, sostituito da una semplice velatura. Infine, il blocco si presta per la realizzazione di impianti sottotraccia e per l'ottenimento di sottomultipli (mediante taglio) da impiegare in corrispondenza delle intersezioni.

Sperimentazione 4: blocco termoisolante in gesso con intercapedine interna e strato termoriflettente in fibra di caseina

La sperimentazione riguarda lo sviluppo di un blocco termoisolante in gesso con intercapedine interna e strato termoriflettente in fibra di caseina.

Rispetto alla sperimentazione 3, illustrata nel paragrafo precedente, il presente campione presenta caratteristiche funzionali e costruttive non dissimili dalla versione precedente.

La differenza ridiede, oltre alla morfologia del blocco, nell'impiego principale: mentre il blocco in gesso della sperimentazione 3 è utilizzato per la realizzazione di murature di tamponamento, il campione in esame è principalmente impiegato per la realizzazione di contropareti isolanti di edifici preesistenti (o anche di nuova costruzione) il cui involucro presenta caratteristiche di isolamento termico ed acustico non soddisfacenti o laddove non fosse possibile isolare termicamente l'edificio sulla pelle esterna.

Il blocco si presenta sotto forma di parallelepipedo cavo, con interposto l'isolante termico ed acustico in fibra biopolimerica di caseina (prodotta in pannelli flessibili) e film basso emissivo in alluminio. L'isolante, come nel caso descritto nella sperimentazione precedente è opportunamente distanziato dallo strato resistente in gesso entrambi i lati.

Anche nel presente caso, questo espediente è utile per ridurre il flusso termico per irraggiamento (grazie alla riflessione termica del film a bassa emissività) e per conduzione attraverso gli strati solidi. In questa sperimentazione, l'isolante è reso solidale allo spondale posto in adiacenza alla muratura preesistente. Tale elemento presenta un profilo interno zigrinato per ridurre al minimo i punti di contatto tra lo strato solido in gesso e il film basso emissivo (in alluminio), ma sufficiente per solidarizzare l'elemento isolante.

La particolare conformazione zigrinata, ottenuta in fase di estrusione del blocco in gesso ha lo scopo, quindi, di creare una intercapedine non aerata tra strato resistente e isolante, limitando - come già detto - la trasmissione e/o dispersione di calore. Superiormente ed inferiormente il blocco presenta una scanalatura atta a favorire il perfetto incastro tra un blocco e l'altro ed a garantire la loro mutua sovrapposizione per la realizzazione del paramento murario interno.

Tale caratteristica facilita la fase di posa in opera che nel presente caso avviene a secco, limitando l'impiego di malte cementizie in corrispondenza dei sistemi di ammorsamento, aggraffaggio e ancoraggio metallico alla muratura preesistente o di nuova costruzione (migliorando anche il comportamento alle azioni sismiche). Il profilo sagomato, inoltre, favorisce l'inserimento di bandelle adesive desolidarizzanti e resilienti che hanno il duplice scopo di limitare il fenomeno dei ponti acustici e delle microfessurazioni dovute a cinematismi e/o dilatazioni termico-materiche. La bandella presente un risvolto sulla superficie verticale per una lunghezza pari allo spessore della stratigrafia orizzontale.

Il blocco, inoltre, presenta lungo i lati in spessore due aperture, utili per migliorare la presa durante la fase di posa in opera e garantire il passaggio sottotraccia degli impianti.

Come nel precedente caso, la superficie perfettamente planare e la presenza di giunti rettificati, fornisce il supporto per la fase di velatura e tinteggiatura, evitando la fase di messa in opera dell'intonaco.

Oltre all'impiego come elemento di controparete, il blocco oggetto di sperimentazione può essere impiegato per la costruzione di partizioni interne e divisorii, in cui - a parità di spessore rispetto alle convenzionali partizioni in blocchi di laterizio o pietra - sono richiesti particolari requisiti prestazionali dal punto di vista termico ed acustico.

Sperimentazione 5: blocco modulare in gesso e strato termoriflettente in fibra biopolimerica di caseina

La sperimentazione riguarda lo sviluppo prototipale di un blocco modulare in gesso e strato termoriflettente di caseina. Il caso di studio rappresenta una variante tipo-morfologica enunciata nella sperimentazione 4. Attraverso l'esploso assonometrico (presente nella pagina successiva) è possibile fornire la lettura del sistema in cui si evince l'estrema modularità, caratteristica peculiare di tale sistema. Esso è costituito da quattro componenti: un fondello di base con bandella desolidarizzante, una lastra in gesso sagomata, uno strato isolante termoriflettente in fibra caseinica e un blocco forato-sagomato in gesso fibrorinforzato. Quest'ultimo elemento presenta in corrispondenza della superficie esterna due fori-guida, utili per l'inserimento di un doppio tassello che intercettando la muratura (di nuova costruzione o preesistente) garantisce l'ammorsamento puntuale dell'intero sistema. Le fasi di posa in opera del sistema sono:

- fase 1: posa in opera del fondello termoisolante - desolidarizzante;
- fase 2: posa in opera della lastra di gesso fibrorinforzata termoriflettente;
- fase 3: fase di sigillatura ermetica dei giunti;
- fase 4: posa in opera del blocco in gesso forato-sagomato;
- fase 5: fase di foratura dello strato resistente;
- fase 6: fase di inserimento del doppio tassello isolante;
- fase 7: fase di ancoraggio chimico o meccanico;
- fase 8: fase di sigillatura dei fori e stilatura dei giunti;
- fase 9: fase di esecuzione ed apposizione impiantistica;
- fase 10: posa stabilitura a velo della superficie.

Fase 1: posa in opera del fondello termoisolante - desolidarizzante

La prima fase consiste nella posa

in opera del fondello termoisolante - desolidarizzante. Il fondello, può essere opportunamente posizionato su massetto (in caso di nuova costruzione) o su pavimento (nel caso di costruzione preesistente). Tale elemento è costituito da un elemento planare in gesso fibrorinforzato con incastro maschio-femmina (per una celere posa in opera del primo filare di blocchi) e un profilo isolante in polistirene estruso - XPS e film basso emissivo. La scelta del polistirene estruso è dovuta alla necessità di fornire una stabilità meccanica globale del sistema parete; infatti, l'XPS avendo un comportamento meccanico (soprattutto per sollecitazioni di compressione) migliore rispetto ad altri isolanti ed una stabilità dimensionale costante nel tempo, garantisce una distribuzione del carico esplicito dalla parete, limitando fenomeni di microfessurazione sulla superficie. Inoltre, essendo un isolante a celle chiuse, il polistirene ben si presta come barriera per eventuali fenomeni di risalita capillare di umidità (soprattutto nel caso di applicazione nell'edilizia storica) che potrebbe inficiare le caratteristiche prestazionali degli strati superiori, in modo particolare dello strato termoisolante. A contatto con la superficie orizzontale è giustapposto una bandella desolidarizzante resiliente che ha il duplice scopo di limitare il fenomeno dei ponti acustici e delle microfessurazioni dovute a cinatismi e/o dilatazioni termico-materiche. Il fondello in gesso ha una duplice funzione: la prima è fornire un piano solidale e planare per la successiva posa in opera del blocco termoriflettente; la seconda funzione, invece, è di isolare il sistema costruttivo parete-solaio. Nel presente caso si approfondisce il rapporto del sistema in esame rispetto ad una muratura di tamponamento di nuova costruzione, realizzata in blocchi di laterizio rettificati con interposta una rete metallica come armatura orizzontale. Nella fase di ancoraggio, saranno espletate le diverse tipologie di connessione meccanica in relazione alle diverse tipologie di muratura.

Fase 2: posa in opera della lastra di gesso fibrorinforzata termoriflettente

Successivamente alla posa in opera del fondello è il posizionamento del primo strato verticale costituito da una lastra in gesso fibrorinforzata e lo strato termoriflettente in fibra caseinica in adiacenza alla muratura preesistente o di nuova costruzione. Anche in questo caso, l'elemento in gesso presenta un profilo zigrinato per ridurre al minimo i punti di contatto con il film basso emissivo (in alluminio) e l'isolante termico in fibra di caseina. Il minimo contatto è sufficiente per solidarizzare l'elemento isolante alla lastra in gesso. Rispetto alla sperimentazione 4, in questo caso si è preferito suddividere il sistema blocco in due componenti. La scelta è dettata essenzialmente per due motivi: il primo è che in questa soluzione, si ha assoluta continuità dello strato isolante; il secondo motivo è che la suddivisione delle componenti, favorisce le fasi di lavorazione dell'intero sistema i cui relativi elementi possono essere sagomati e tagliati per la realizzazione di angolari, in corrispondenza degli infissi e geometrie particolari.

Fase 3: fase di sigillatura ermetica dei giunti

Un ulteriore vantaggio fornito dalla sistematizzazione modulare e della posa in opera di singoli elementi è che questa soluzione permette, prima della posa del blocco interno, di sigillare ermeticamente le giunzioni tra un pannello e l'altro con nastro adesivo in alluminio (o della stessa tipologia del film basso emissivo), che garantisce la tenuta ermetica al vapore e l'assoluta continuità della superficie riflettente. Inoltre, il nastro adesivo può essere utilizzato anche per effettuare eventuali riparazioni in loco degli strati del rivestimento termoriflettente. Inoltre, essendo un sistema con posa in opera "a secco", gli elementi costituenti (in modo particolare l'isolante) possono essere facilmente sostituiti od integrati o sostituiti.

Fase 4: posa in opera del blocco in gesso forato-sagomato

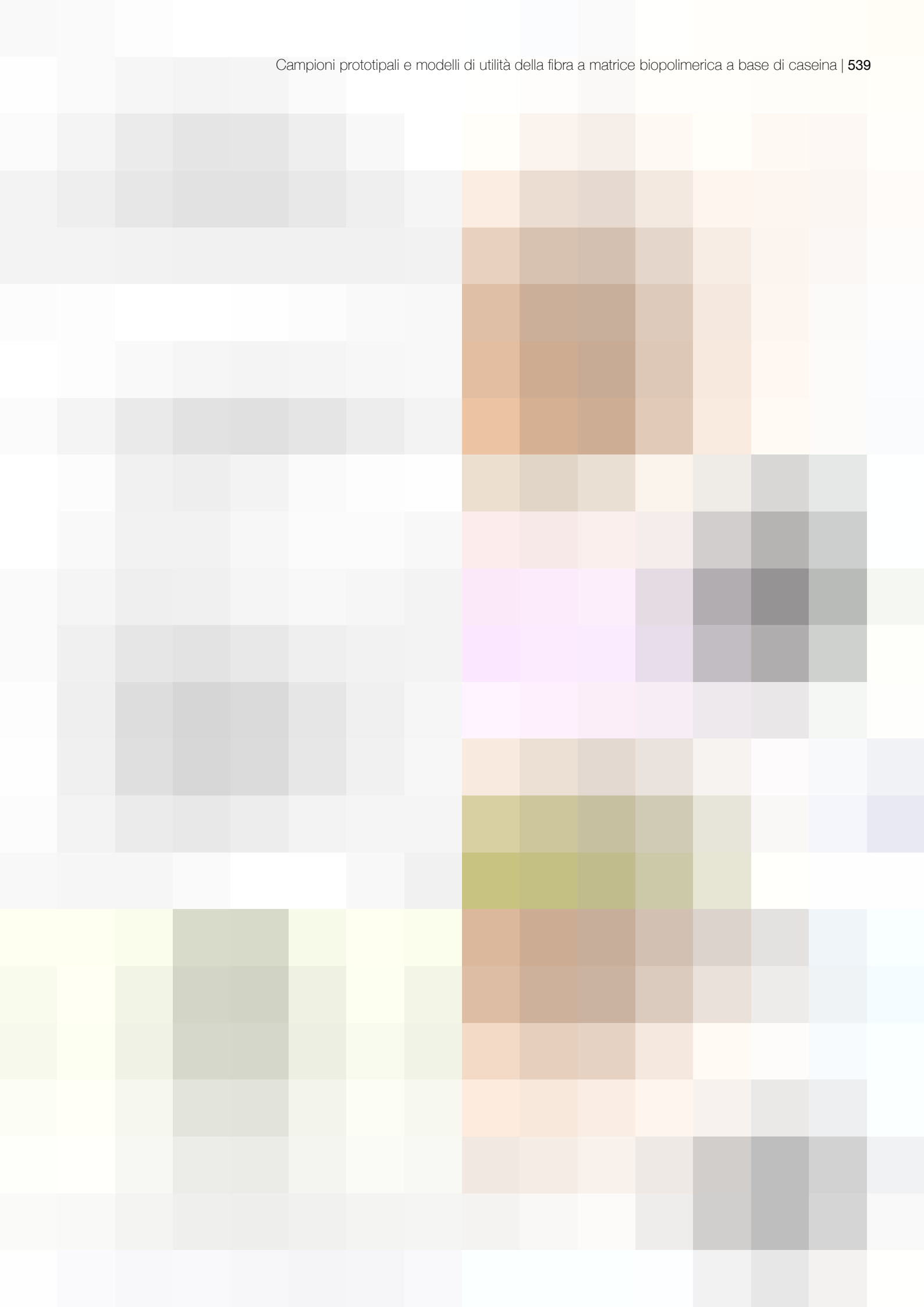
Il completamento del sistema parete, nella sua forma compiuta, avviene con la posa in opera del blocco in gesso forato fibrorinforzato. Anche questo elemento presenta una sagomatura scanalata con la succitata funzione di rallentare il flusso termico per irraggiamento (soprattutto nel periodo invernale, nella quale l'ambiente interno presenta temperature ambientali nettamente superiori rispetto all'ambiente esterno). La scelta di una soluzione con film basso emissivi è dovuta alla necessità di garantire ridotti spessori di muratura a parità di prestazioni termiche ed acustiche. Infatti, il sistema, completo di tutti gli elementi, presenta uno spessore massimo di 12 cm, rendendolo idoneo anche per la realizzazione di partizioni interne in cui sono richiesti particolari requisiti prestazionali dal punto di vista termico ed acustico.

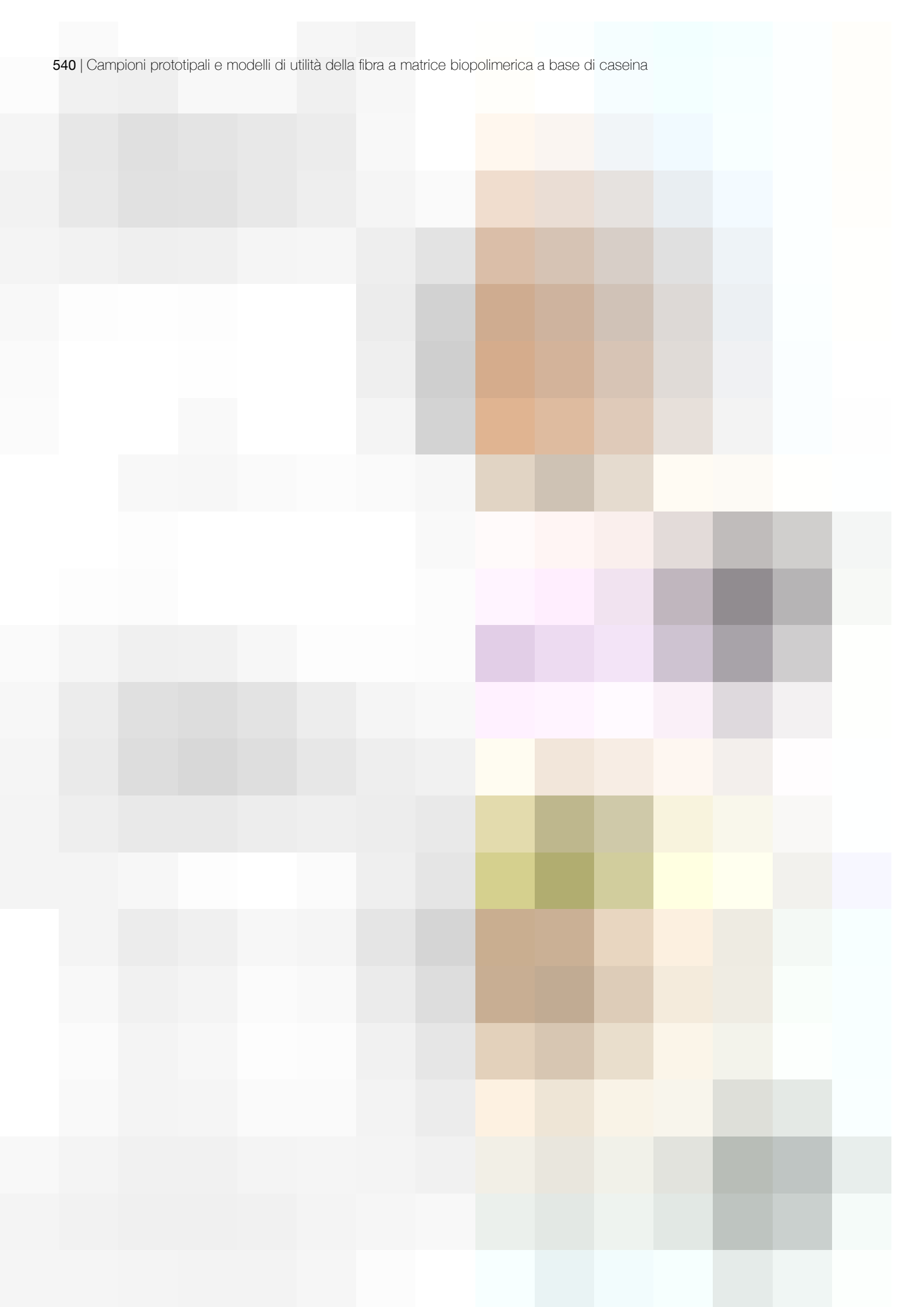
Fase 5: fase di foratura dello strato resistente

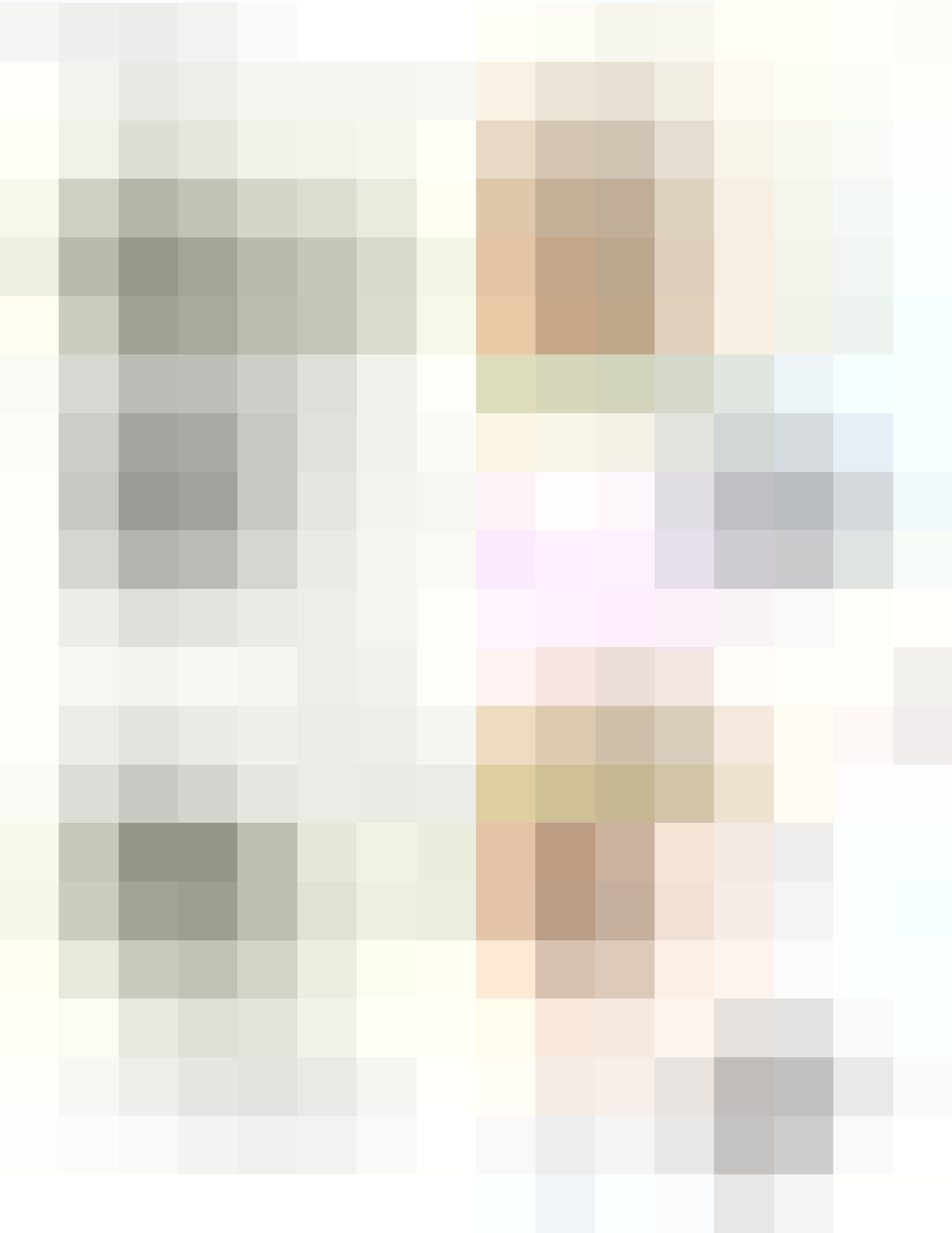
Come già detto, il blocco in gesso presenta sulla superficie esterna due fori-guida. Tali fori fungono da guida per la fase operativa di foratura di tutti gli strati appena posti in opera, intercettando in maniera puntuale la muratura di tamponamento (esistente o di nuova costruzione). Il procedimento di foratura può avvenire su ciascun filare o in maniera alternata, a seconda del grado di ammorsamento che si vuole conferire al sistema controparete. Il foro praticato, pulito opportunamente con scovolino dalle polveri residuali vengono aspirate con un apposita pompa manuale.

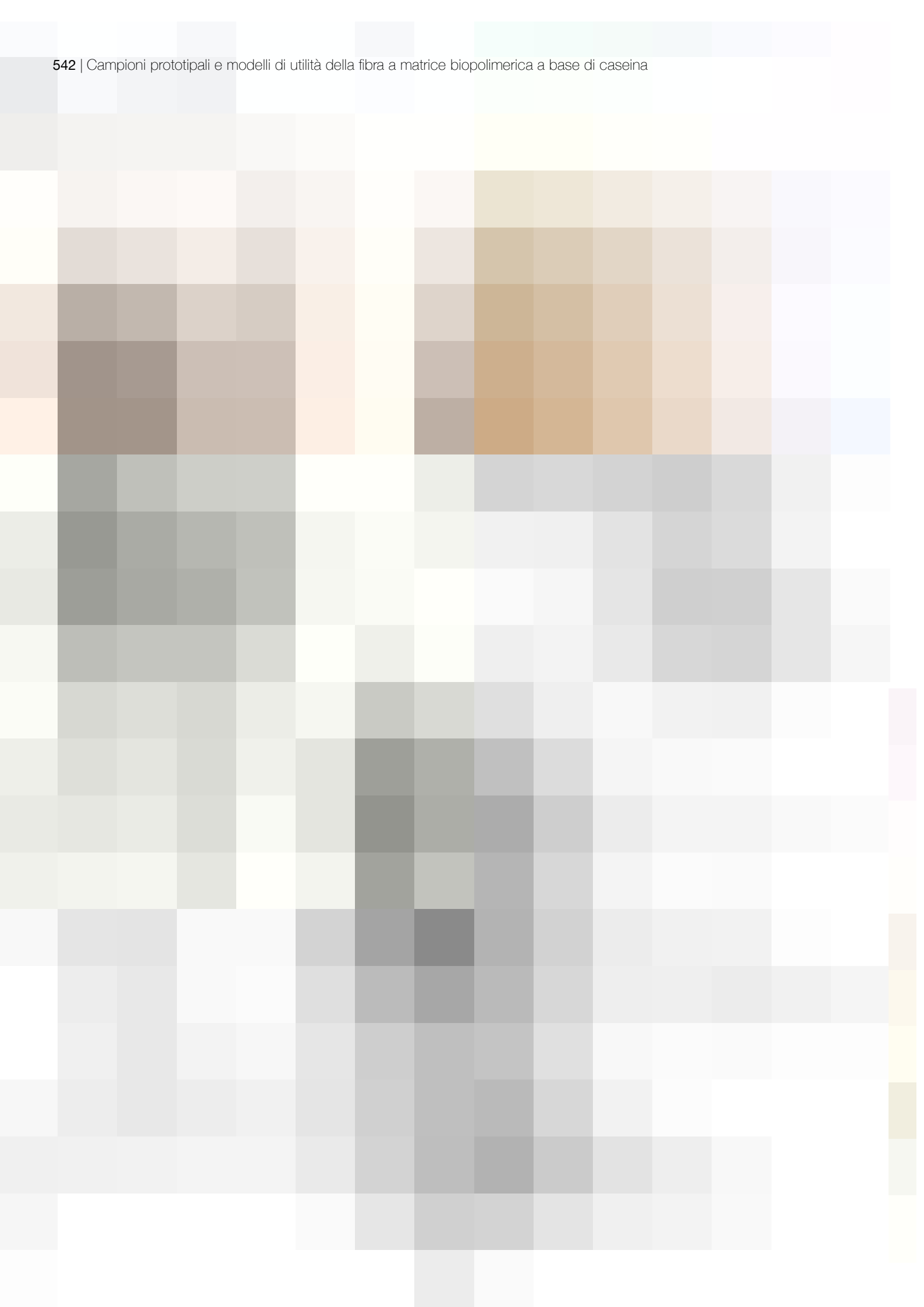
Fase 6: fase di inserimento del doppio tassello isolante

Posizionati "a secco" i filari costituenti la controparete, si rende necessaria la solidarizzazione tra blocchi in gesso e muratura. A tal proposito viene inserito un tassello isolante in nylon che intercetta gli strati in gesso e lo strato isolante.









Fase 7: fase di ancoraggio chimico o meccanico

L'inserimento del tassello in nylon oltre ad eliminare la problematica di passaggio interstiziale di umidità e calore, funge da elemento guida per l'inserimento successivo di un "contro tassello". La natura di questo elemento varia in relazione alla tipologia di muratura sulle quali effettuare l'ammorsamento. Nel caso di muratura con blocchi forati è preferibile la scelta di un tassello "a calza". La calza, inserita nella muratura di tamponamento, verrà successivamente riempita con una resina miscelata. L'inserimento successivo di una barra filettata, con movimento circolare, farà sì che la resina possa espandersi oltre la calza ed espandersi sia nelle forature, sia all'interno del tassello stesso. Questa soluzione, garantisce una perfetta solidarizzazione degli strati. Nella fase 7a sono rappresentati i diversi sistemi di ancoraggio con controtassello ("a ragno", "ad espansione", "con cuneo") in relazione alla tipologia di muratura

Fase 8: fase di sigillatura dei fori e stilatura dei giunti

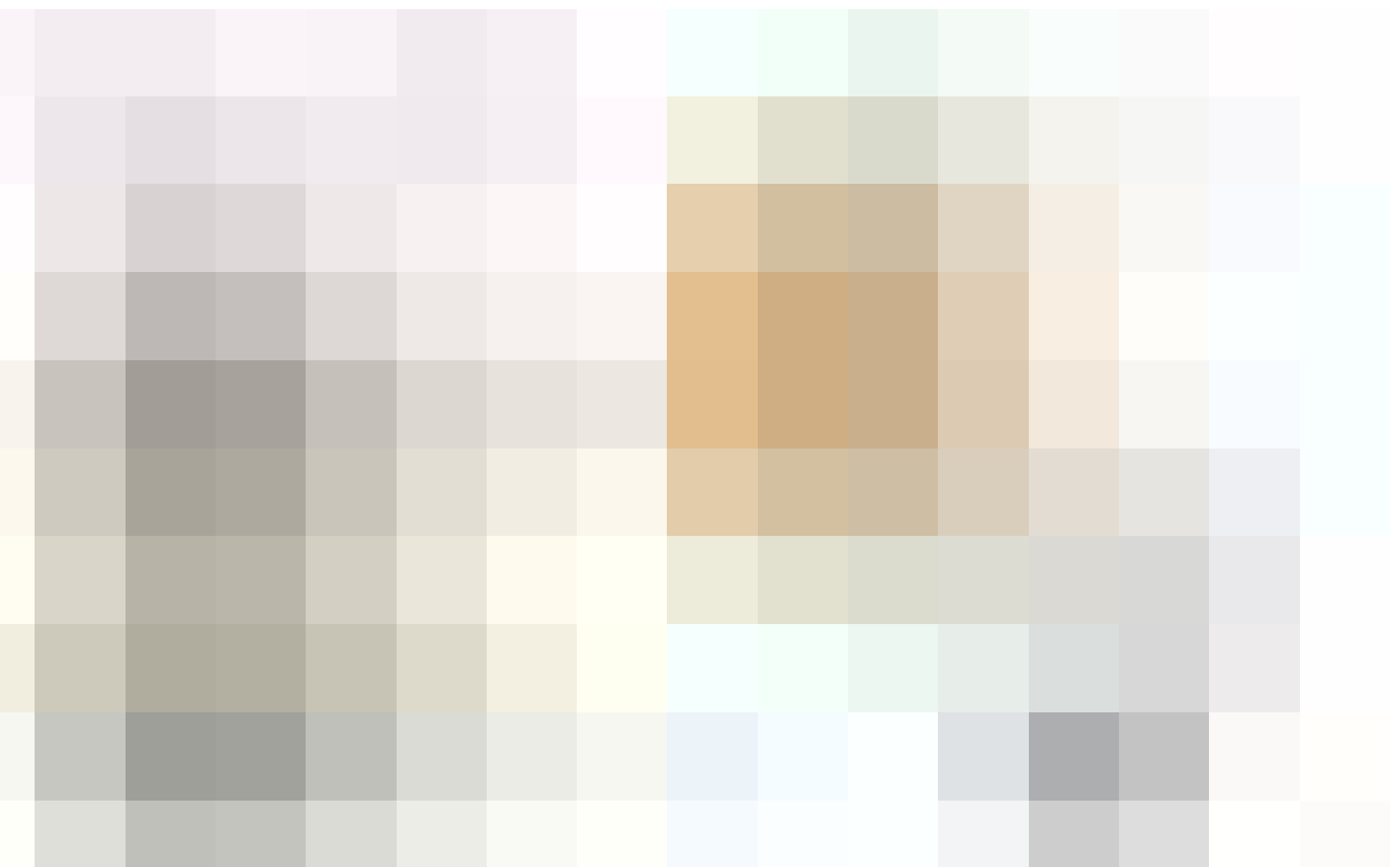
Terminata l'operazione di ancoraggio, i fori sono sigillati con una resina miscelata o in alternativa con malta di gesso. Ad asciugatura avvenuta, si procede con la stilatura, la carteggiatura e la levigatura della superficie, pronta a ricevere l'ultima operazione di finitura.

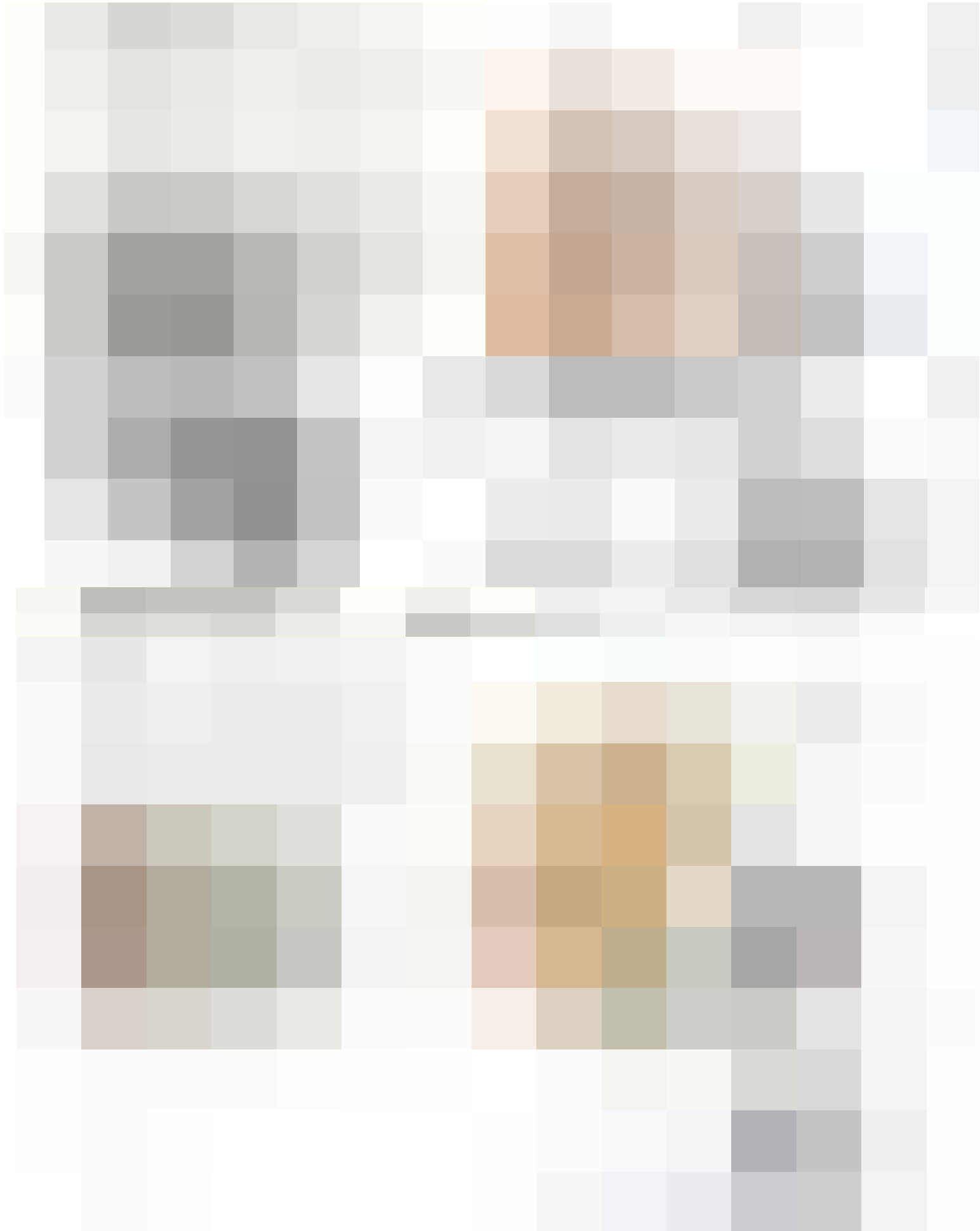
Fase 9: fase di esecuzione ed apposizione impiantistica

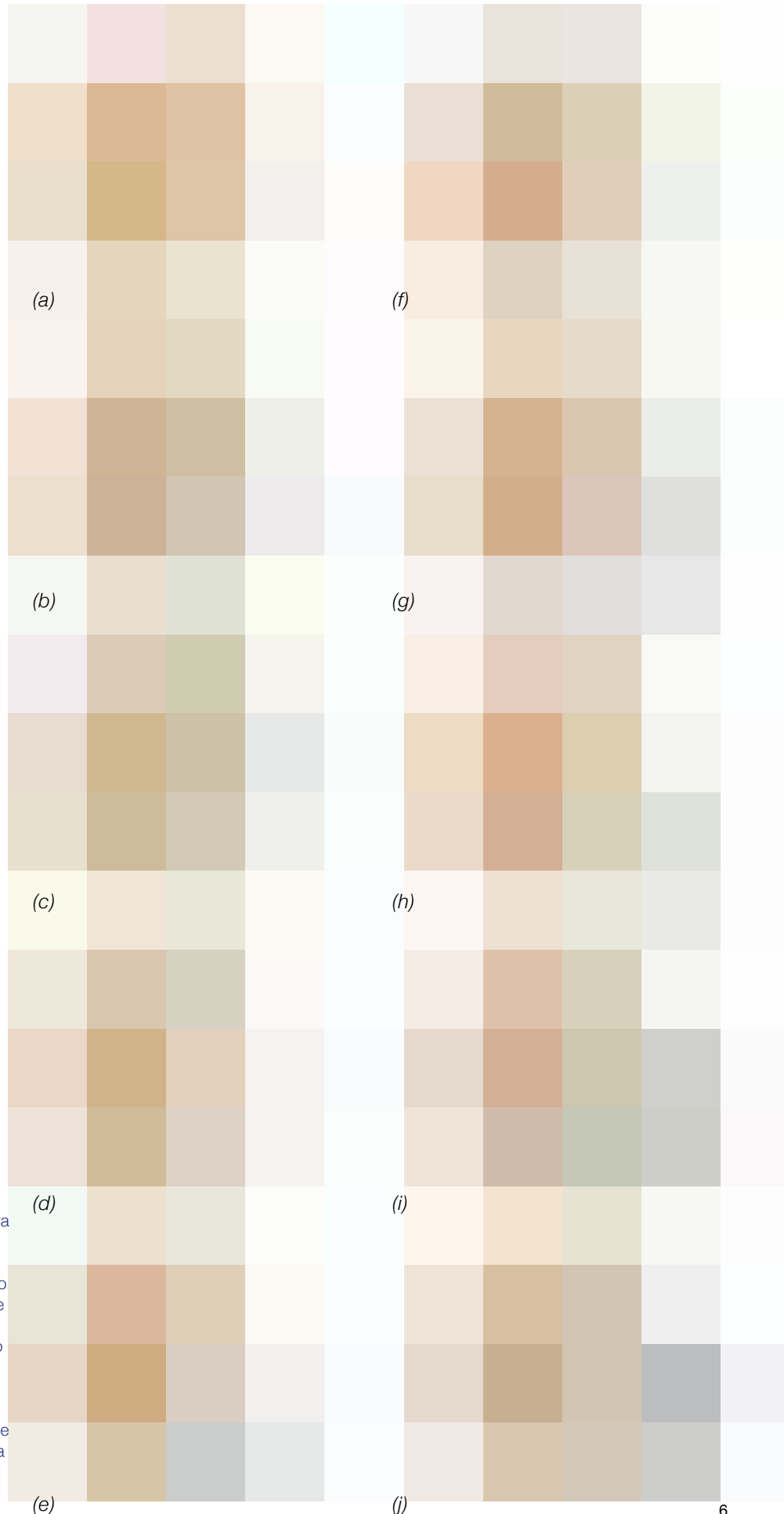
Prima della fase di finitura è necessario praticare le apposite tracce per l'apposizione impiantistica mediante scanalatrice e successiva chiusura con la polvere di gesso ottenuta dalla lavorazione.

Fase 10: posa stabilitura a velo della superficie

Le operazioni si concludono con la stabilitura a velo della superficie con malta fine a base di grassello di calce e la relativa tinteggiatura.







6. Sintesi di fase: a) fase 1: posa in opera del fondello termoisolante - desolidarizzante; b) fase 2: posa in opera della lastra di gesso fibrorinforzata termoriflettente; c) fase 3: fase di sigillatura ermetica dei giunti; d) fase 4: posa in opera del blocco in gesso forato-sagomato; e) fase 5: fase di foratura dello strato resistente; f) fase 6: fase di inserimento del doppio tassello isolante; g) fase 7: fase di ancoraggio chimico o meccanico; h) fase 8: fase di sigillatura dei fori e stilatura dei giunti; i) fase 9: fase di esecuzione ed apposizione impiantistica; j) fase 10: posa stabilitura a velo della superficie.

Sperimentazione 6: pannello isolante alveolare con crocette poliedriche di caseina espansa e film termoriflettente

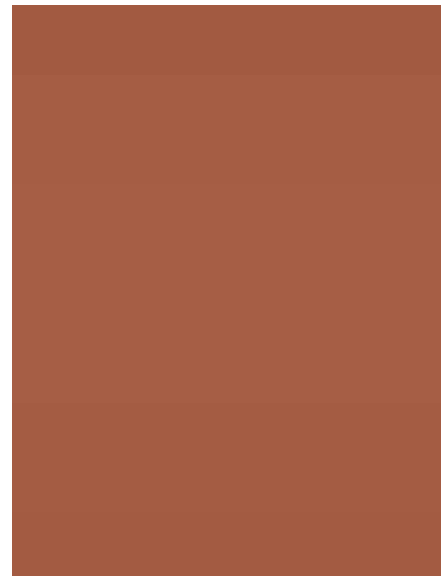
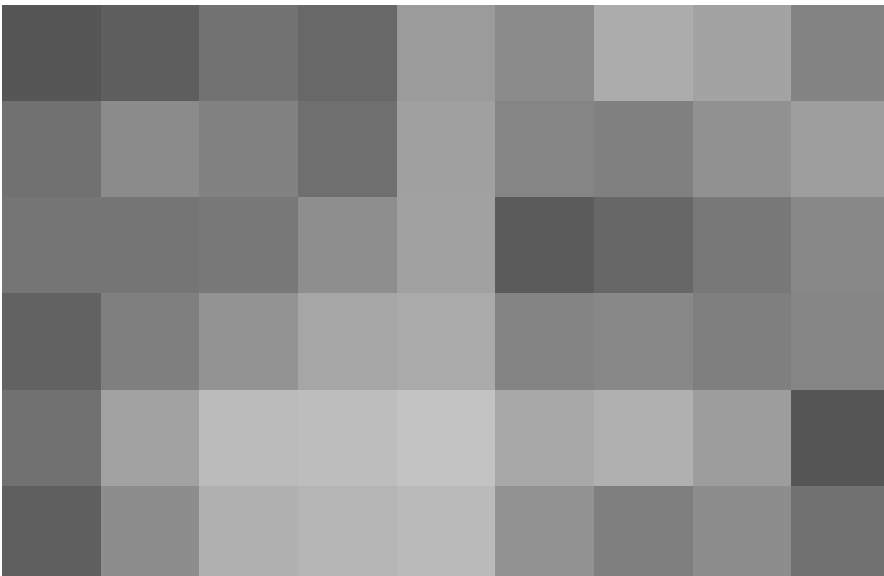
Nella presente sperimentazione viene sviluppato un pannello isolante alveolare con crocette poliedriche di caseina espansa e film termoriflettente. Il campione coniuga la capacità ermetica di un isolante alveolare e la capacità di resistenza termica di un isolante termoriflettente. L'innovativo pannello è costituito da quattro strati di crocette poliedriche di caseina espansa, legate fra loro con una rete flessibile in bioplastica riciclata e rivestite da ambedue i lati da film metallizzati a bassa emissività. La conformazione morfologica delle crocette poliedriche deriva dalle stuoie di *Graticcio Stauss*, un particolare materiale impiegato all'inizio del Novecento per la realizzazione di elementi non strutturali con geometrie complesse come volte, paraboloidi, cupole, etc (figg.7-8). Il pannello in esame, come il *Graticcio Stauss*, presenta degli strati flessibili sovrapposti che consentono - durante la posa in opera - di essere facilmente adattati anche su superfici complesse. La struttura alveolare conferisce al pannello un coefficiente di conducibilità termica eccellente, notevole leggerezza ($9,5 \text{ kg/m}^3$), buona resistenza meccanica, impermeabilità ed ermeticità nonché facilità di trasporto e posa in opera.

Le pellicole basso emissive fungono da barriera contro il vapore e costituiscono una strato integrato a tenuta ermetica all'aria e al vapore acqueo e consente di evitare la posa di una barriera al vapore indipendente. La pellicola basso emissiva, inoltre, se installata all'interno di una intercapedine non ventilata (come quella creata per esempio dallo spessore tra muratura preesistente e contro parete in lastre di gesso rivestite), può assicurare al sistema parete una resistenza termica supplementare, consentendo - a parità di resa termica - una riduzione sostanziale dello spessore dell'isolante.

La particolare conformazione della struttura poliedrica, garantisce un minimo contatto tra le crocette e i film metallizzati (linee in rosso nella rappresentazione grafica alla pagina successiva), creando, inoltre, tante camere d'aria che permettono ai materiali termoriflettenti di contrastare il passaggio di calore per irraggiamento e convezione e di contrastare anche la diffusione dei rumori aerei. Il vantaggio che ne deriva è una sostanziale riduzione degli spessori per la realizzazione di contro pareti, intercapedini e plafonature.

La posa in opera del pannello, data la notevole leggerezza, può avvenire mediante incastro in appositi telai (lignei e/o metallici), adesivi o mediante appositi sistemi di fissaggio meccanico.

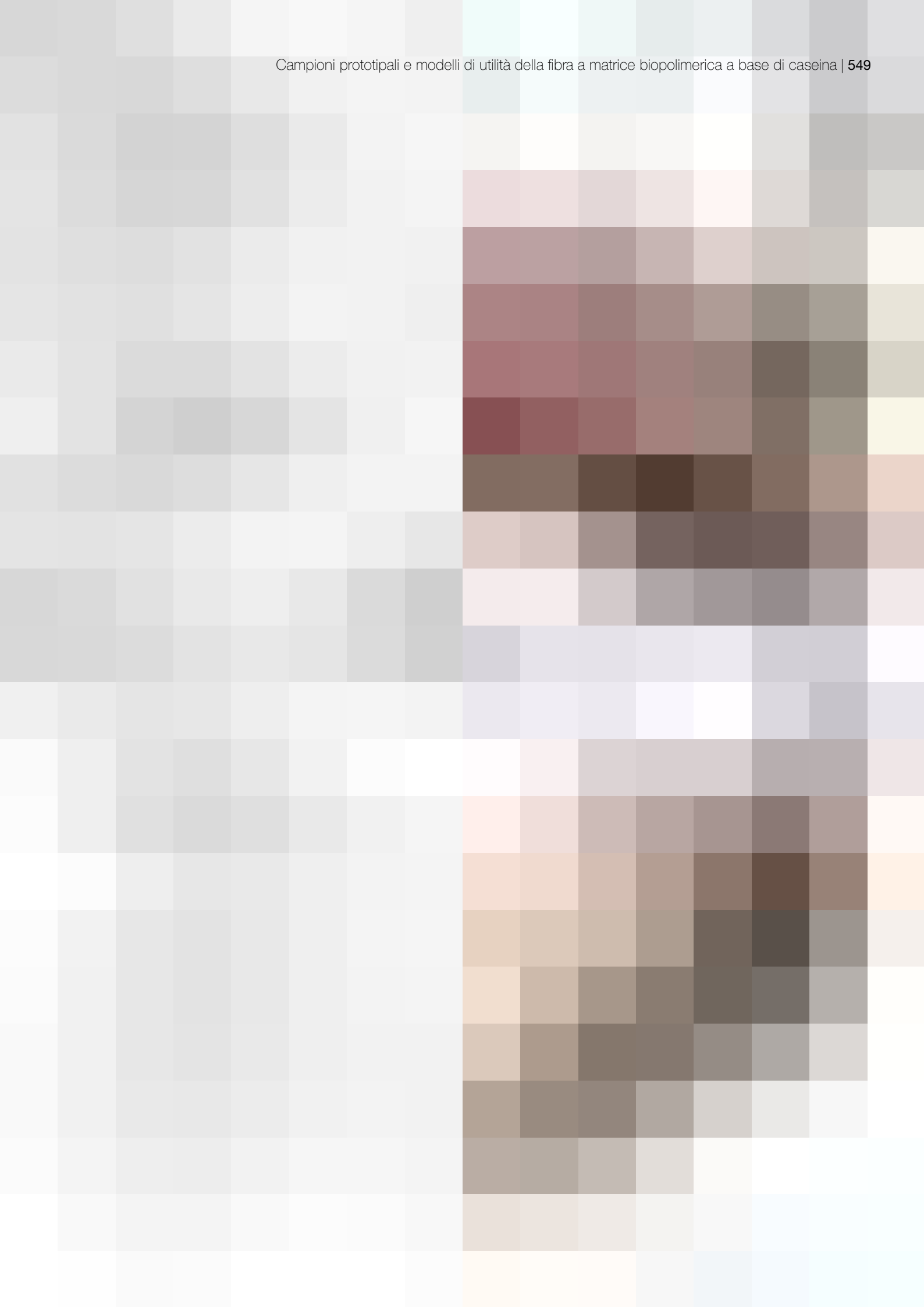
7. Esempi di applicazioni del *Graticcio Stauss* per la realizzazione di volte e cupole, in Società Italiana Stauss, "Graticcio Stauss. Il materiale da costruzione moderno", Istituto grafico Bertello, Cuneo, 1935, pagg.66-67.
8. Copertina del manuale "Stauss-Ziegel-Gewebe. Formgebendes und konstruktives Element im Bauwesen", Baravalle-Brackenburg F., Rudolf Bohmann Editore, Vienna, 1953, in A. Pagliuca, "Materiali Made in Italy. Avanguardia italiana nell'industria delle costruzioni del primo '900", Gangemi Editore, Roma, 2019, pag.526.



Sperimentazione 7: blocco isolante in fibra di caseina e resina melamminica e rivestimento domotico in pannelli tessili

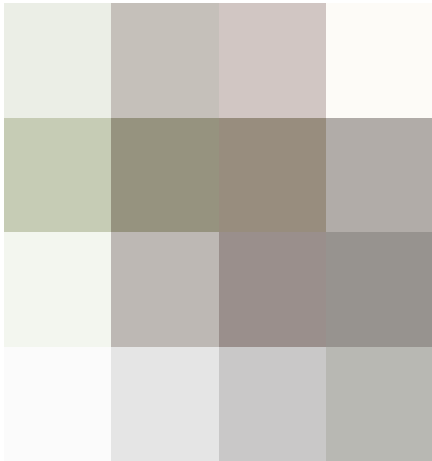
La sperimentazione riguarda lo sviluppo di un blocco in fibra di caseina e resina melamminica e rivestimento domotico in pannelli tessili. Il sistema è costituito da due elementi: il blocco in caseina e resina melamminica pressato e sagomato con forma a "C" (con la funzione isolante), ed un pannello di rivestimento in fibra tessile di caseina con integrato un impianto domotico. Il blocco, inoltre, contiene al suo interno un materassino di isolante in fibra di caseina opportunamente distanziata dallo strato resistente in modo da creare una intercapedine non aerata, migliorando la resistenza termica dell'intero sistema. La tipologia di blocco sagomato accoglie le istanze di produzione dei pannelli in canapa che vengono prodotti similmente e impiegati, per esempio, come laminati. Nel presente caso, il blocco è impiegato per la realizzazione di contropareti o controsoffittature isolate termicamente ed acusticamente. La superficie esterna dell'elemento, oltre a fornire il supporto per la successiva posa del rivestimento, presenta delle forature a intervallo regolare con una duplice funzione: la prima è quella migliorare la fonosorbenza, grazie alla differenza di pressione che si genera tra l'ambiente e la camera d'aria integrata nel blocco (con profilo "grecato"); la seconda, invece, come guida per l'inserimento di connettori, ganci e collegamenti di supporto del rivestimento. Gli elementi di connessione possono essere molteplici: dai convenzionali montanti e traversi in acciaio zincato ai sistemi di connessione puntuale; dai sistemi con tiranti, alle connessioni *easyclip* che garantiscono, rispetto alle connessioni anzidette, il processo di manutenzione ordinaria e/o di integrazione o sostituzione degli impianti integrati tra il blocco e il rivestimento. In questo caso, data la leggerezza del singolo pannello di rivestimento si è optato per una soluzione inedita, inserendo una placca magne-

tica che copre il disco del tassello di fissaggio meccanico della controparete. All'elemento magnetico è demandato il compito di collegare al blocco di controparete il pannello di rivestimento che nel presente caso è caratterizzato da una geometria superficiale curva ma che - grazie all'estrema flessibilità e facilità di lavorazione della fibra di caseina - può presentarsi in diverse forme, trame tessili e colorazioni. Tale sperimentazione, infatti, non ha solo lo scopo di impiegare la caseina come isolante, ma di esaltare le qualità esteriori della stessa, estendendo il campo di applicazione anche nell'*interior design* e nella innovazione tecnologica. Il pannello in esame rappresenta una delle tante sperimentazioni che possono avere come oggetto la fibra di caseina, proprio perché - essendo rinveniente storicamente da una fibra tessile come il Lanital - presenta delle proprietà come il calore della mano tessile e del tessuto, la possibilità di essere tinta, lavata, garzata, mazzata, etc. Morfologicamente, il pannello presenta sul lato interno una concavità: il profilo fa sì che tra rivestimento e blocco si generi una intercapedine d'aria nel quale è inserita la barriera al vapore (o barriera al vapore termoriflettente, migliorando le prestazioni termiche invernali). La scelta ideativa di progettare un rivestimento amovibile è dettata dalla possibilità di intervenire sugli impianti per interventi non solo di sostituzione ma soprattutto di adeguamento, come l'implementazione dell'impianto domotico, tipologia impiantistica in costante evoluzione con l'evolversi delle tecnologie e delle esigenze domestico-sociali. Talvolta, tali modificazioni, implicano modifiche sostanziali all'impianto domotico, quindi il sistema ideato in pannelli amovibili garantisce accessibilità totale all'impianto elettrico che potrebbe essere ulteriormente implementato con un sistema di battiscopa passacavi. Il tessuto superficiale oltre a presentare diversi orditi e proprietà, si pone come tessile *high tech* capacitivo in grado di integrare elementi smart come altoparlanti, sensori ambientali e assistenti vocali per eseguire una serie di funzioni.



Sperimentazione 8: stuoia flessibile in fibra caseinica feltrata fonoassorbente e tubi capillari radianti in polipropilene

La sperimentazione riguarda la progettazione di una stuoia flessibile in fibra caseinica feltrata fonoassorbente e tubi capillari radianti in polipropilene. Lo studio sperimentale si pone come una rilettura del sistema tradizionale dell'incannucciato o camorcanna, molto diffuso nei contesti storici per la realizzazione di finte volte, cornici, modanature e plafonature. L'incannucciato, infatti, è ottenuto dall'accostamento di sottili canne palustri rese solidali con un intreccio tra fibre vegetali o filamenti metallici altamente duttili, in grado di conferire alla stuoia notevole flessibilità e adattarsi su qualunque geometria semplice o complessa. A posa avvenuta, la superficie di incannucciato si presta come supporto ideale per la posa di stucco o intonaco.



9

Attraverso questo *diktat* storico, la sperimentazione si pone come evoluzione moderna dell'incannucciato, costituito da una stuoia flessibile di fasce di fibra caseinica feltrata fonoassorbente "a vista" che rendono solido il sistema in tubi capillari radianti in polipropilene entro cui viene fatta passare acqua calda o fredda alimentati da impianti con pompe di calore o pannelli solari. Tale tecnologia si sta sviluppando notevolmente soprattutto in contesti climatici caratterizzati da ambienti freddi e/o umidi

La sperimentazione, quindi, cerca di coadiuvare un sistema tecnologico per la realizzazione di superfici a vista ed un sistema impiantistico della tipologia radiante in grado di riscaldare o raffreddare un ambiente con il minimo dispendio di energia ed inquinamento. Tra i diversi vantaggi con l'applicazione del sistema è da annoverare l'estrema facilità di posa in opera e di adattabilità alle diverse esigenze architettoniche. Un ulteriore aspetto, di non minore importanza, è dato dalla possibilità di climatizzare e riscaldare un ambiente mediante una minima utilizzazione di energia ed, inoltre, la diffusione del calore è pressoché silenziosa (quindi molto utile in ambienti pubblici come teatri, sale conferenze, etc.). Inoltre, la fibra di latte trattata con sostanze termocoeseive, può essere utilizzata come rete porta intonaco nel caso di preferisse una superficie monolitica dell'elemento controparete o controsoffitto. La realizzazione di una superficie monolitica - mediante un intonaco del tipo minerale - integrata con un sistema radiante del calore, favorirebbe non solo una costante ed efficiente diffusione del calore nell'ambiente, ma richiederebbe un rendimento energetico molto contenuto sfruttando il principio dell'inerzia termica e dello sfasamento temporale del flusso termico. Questo significa che, grazie all'inerzia termica, la superficie monolitica - a impianto a regime - è in grado di assorbire energia, di accumularla e di rilasciarla nell'ambiente anche con impianto spento. L'innovativa stuoia può presentarsi in vari colori e può essere impiegata anche come elemento singolo, il cui scopo è esclusivamente quello di assorbimento acustico a banda larga, grazie alla conformazione elastica e macroporosa. Per contro, l'unico inconveniente che potrebbe sorgere con l'impiego di tale prodotto è l'implementazione di un sistema di deumidificante come garanzia del non raggiungimento del punto di rugiada, che potrebbe creare fenomeni di condensazione nell'ambiente.

9. Esempi di applicazioni del sistema dell'incannucciato o camorcanna per la realizzazione di finte volte o cupole, plafonature, modanature e cornici.

Sperimentazione 9: adesivi a base di caseina

Uno degli interessanti obiettivi della ricerca è quello di sviluppare materiali e sistemi per il l'edilizia che abbiano spiccate caratteristiche di sostenibilità, rispondendo così ad una molteplicità di esigenze espresse da soggetti diversi: i consumatori che richiedono l'utilizzo di tecniche produttive e materiali che consentano una maggiore tutela dell'ambiente e della salute; le imprese che hanno l'esigenza di innovare e di svilupparsi, anche da un punto di vista tecnologico, per stare al passo con il mercato. L'utilizzo dei caseinati come additivi nelle formulazioni di malte e intonaci è una pratica ben nota nella storia delle costruzioni, del restauro e delle tecniche pittorico-conservative e lo studio di nuove formule costituisce un inedito e interessante sbocco per un sottoprodotto della lavorazione del latte, che risponde alle istanze dell'Unione Europea che sollecita, da tempo, l'individuazione di impieghi di scarti rinvenuti dall'industria e dall'agricoltura. La presente sperimentazione si pone come base di partenza per la valutazione delle differenze chimico-fisiche e di composizione proteica esistenti tra i caseinati e mettere a punto e testare, sulla base della manualistica antica e della letteratura scientifica internazionale, le miscele, al fine di verificarne sia la lavorabilità e le modalità di applicazione, sia le caratteristiche tecniche di durabilità, affidabilità e resistenza ai fattori biotici e abiotici. L'obiettivo è mettere a punto lo sviluppo di nuovi materiali adesivi a base di caseina che possano competere in un mercato sempre più esigente da un punto di vista ambientale attraverso l'impiego di prodotti a base naturale, poco inquinanti e che riutilizzano scarti di altre lavorazioni. Le soluzioni di adesivi a base di caseina proposti nella seguente sperimentazione, sono:

- colle liquide ed in pasta;
- mastici e resine;
- colle in polvere o granuli;
- colle di caseina vegetale.

Le diverse tipologie di adesivi a base di caseina sono indicate nello schema della pagina successiva, in cui, attraverso la consultazione della manualistica di riferimento e lo studio di prodotti adesivi convenzionali impiegati in edilizia, sono forniti le quantità, i vantaggi, gli svantaggi e gli impieghi della caseina come elemento base per la formulazione di colle, mastici, malte cementizie e biointonaci.

Nella preparazione delle suddette soluzioni è importante sottolineare alcuni aspetti da tener conto, ovvero:

- la caseina è insolubile in acqua e in altri solventi organici, mentre si scioglie in soluzioni alcaline;
- la soda caustica e il fosfato trisodico determinano una decomposizione della caseina, mentre il borace e l'ammoniaca tendono a fornire soluzioni molto dense. Si preferisce, quindi, utilizzare il carbonato di sodio (con l'inconveniente di ottenere colle di poco resistenti all'acqua) o la calce spenta (che ha l'inconveniente di fornire colle a ridotta durabilità);
- per aumentare l'impermeabilità si deve aggiungere al composto la formaldeide e della calce spenta. La caseina, infatti, disciogliendosi come caseinato di sodio reagisce con l'idrato di calcio per dare origine a del caseinato di calcio di buone proprietà idrofughe. E' possibile aggiungere anche il solfuro di carbonio o il perossido di bario;
- per aumentare le proprietà di asciugatura degli adesivi è conveniente l'impiego dell'urea come prodotto additivante.;
- per ridurre la biodeteriorabilità della caseina, si rende necessario l'aggiunta di prodotti antisettici come il timolo (3%), pentaclorofenolo (5%) ed i suoi sali sodici (tetraclorofenato, triclorofenato, ortofenilfenolo);
- per aumentare la flessibilità è possibile aggiungere dei plastificanti.

06

06 Brevettazione, prototipazione e strategie di integrazione della fibra biopolimerica di caseina nel mercato dei materiali a 'complessità controllata' e degli innovativi sistemi di involucro architettonico

Sinòpsi Nel presente capitolo viene descritto l'iter per il deposito e della struttura del brevetto, caratterizzato dalla definizione dei criteri di brevettabilità, dall'attività di ricerca per la definizione dello stato della tecnica e ricerca d'antioriorità, dall'esposizione del trovato e delle rivendicazioni come ambito di tutela e protezione del trovato.

Un brevetto di per sé non è garanzia di successo commerciale. Perché possa fornire un beneficio, un brevetto deve essere sfruttato efficacemente; in linea di massima esso produrrà profitti solo se il prodotto incontrerà i favori del mercato oppure se aumenterà la forza ed il potere contrattuale dell'impresa stessa. In merito sono state analizzate alcune opzioni per l'eventuale immissione sul mercato dell'invenzione brevettata (commercializzazione diretta, cessione a terzi, concessione in licenza, joint venture, etc.). Inoltre, in linea con l'ambito della ricerca sono stati definiti i criteri e i requisiti per la prototipazione del brevetto e quali possono essere gli scenari di sviluppo più confacenti (*PoC- Proof of Concept, Trasferimento tecnologico, Fondo per la crescita sostenibile, start-up o spin-off universitari*) e quali sistemi possono garantire la fruizione a incentivi nazionali (Brevetti+) o europei (EIC Accelerator, Horizon 2020, etc.).

La ricerca, in conclusione, rappresenta un formidabile strumento che consente attraverso l'innovazione di acquisire risorse economiche supplementari da investire in modelli di business. Il brevetto (ed il relativo prototipo), infatti, può essere percepito dai partner commerciali, dagli investitori e dai clienti, come una dimostrazione dell'alto livello di qualità, specializzazione e capacità sperimentale e tecnologica degli inventori e dell'ente di appartenenza (in questo caso l'Università degli Studi della Basilicata ed il Politecnico di Milano).

Attraverso il brevetto e il relativo prototipo non solo si dispone di un diritto esclusivo sul mercato, ma è possibile ottenere innumerevoli vantaggi economici e competitivi. Con lo sviluppo della fibra biopolimerica a base di caseina è possibile dedurre come le tecniche industriali innovative potrebbero disporre oggi di impianti sempre più flessibili e sostenibili che consentono cicli di produzione brevi (*lean production*) riducendo al minimo l'apporto di materiali ed energia durante le fasi di produzione e limitare gli impatti sull'ecosistema.

Inoltre, la sperimentazione della fibra di caseina, vuole dimostrare come l'uso ciclico di materiali di scarto e di demolizione in edilizia non prescinde, però, dall'impiego di risorse provenienti da altri settori produttivi (in questo caso dall'industria casearia).

Tale aspetto si tramuta in un potenziale sviluppo di prodotti edilizi innovativi provenienti da lavorazioni industriali di natura diversa costituendo, quindi, un sistema di scambio di risorse configurato secondo una fitta rete di interrelazioni tra architettura, fonti e ricettori di materiali.

La ricerca, dunque, si conclude proponendo alcuni dei radicali cambiamenti dei modelli di consumo per la riduzione degli sprechi di materia ed energia (*up-cycling e superuse*) nella produzione dei beni e nella riduzione dei rifiuti (soprattutto quelli derivanti dal settore delle costruzioni) e delle emissioni nell'ambiente.

Affine a questa ricerca - oltre all'aver indagato e sperimentato un materiale prodotto a partire da uno scarto (caseina) - è quello di fornire un presupposto per cui diviene essenziale eliminare il concetto stesso di rifiuto partendo dalla progettazione, impiegando strumenti innovativi di digitalizzazione, sostenibilità, interoperabilità, costruzione 4.0. e *Building Information Modeling*.

1. Aguahoja, dettaglio del guscio realizzato con biomateriale composto da gusci di gamberetti, esoscheletri di foglie e bucce di mela, stampati in 3D, modellati in acqua e colorati con pigmenti naturali, © Neri Oxman and The Mediated Matter Group

6.1. Brevetto M6-6113: metodo di produzione di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina e pannello isolante termico ed acustico con la medesima fibra

La domanda di brevetto individuata al riferimento M6-6113 n.102021000014888 e depositata il giorno 08.06.2021 è descritta come trovato avente titolo: “*metodo di produzione di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina e pannello isolante termico ed acustico realizzato con detta fibra*” (fig.2).

Il presente brevetto è depositato a nome dell'Università degli Studi della Basilicata e il Politecnico di Milano a seguito ad un accordo interistituzionale al fine di disciplinare i termini di sfruttamento della proprietà intellettuale oggetto dell'attività di ricerca svolta congiuntamente.

Gli inventori, PhD st. Donato Gallo (Dottorando in *Cities and Landscapes: Architecture, Archaeology, Cultural Heritage, History and Resources* - XXXIV Ciclo, Unibas), Prof. Antonello Pagliuca (Professore Associato, Unibas), Prof. Angelo Lucchini (Professore Ordinario, Polimi) e Prof. Enrico Sergio Mazzucchelli (Professore Associato, Polimi) hanno congiuntamente trasferito la titolarità del brevetto per la quota di ciascun inventore alle relative Università, previo riconoscimento della percentuale sugli eventuali proventi derivanti dallo sfruttamento a qualsiasi titolo dell'invenzione, come previsto dall'art.65 del D.Lgs. 30/2005, modificato dal D.Lgs. 13.Agosto 2010, n.131 e ss.mm.ii.

La società mandataria a cui è stato demandato la fase di deposito è la GLP s.r.l., specializzata in un'ampia gamma di settori tecnologici, tra cui meccanica, dispositivi medicali, scienze dei materiali, biotecnologie, chimica, apparecchiature elettriche, elettronica, semiconduttori, software ed hardware di computer, tessile e telecomunicazione. In particolare la società si è occupata della valutazione della brevettabilità del progetto; delle ricerche

di eventuali documenti anteriori; della definizione dello stato dell'arte; dello studio e della stesura della domanda di brevetto italiano ed europeo per invenzioni industriali; del controllo, della gestione e della sorveglianza del brevetto.

Il brevetto è depositato in data: 08.06.2021.

Criteria di brevettabilità

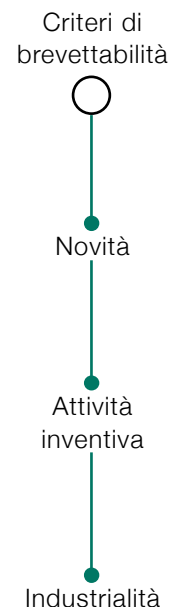
Un'invenzione per essere brevettata deve consistere in una soluzione nuova ed originale di un problema tecnico. L'oggetto dell'invenzione (*trovato*) può essere un prodotto materiale oppure un metodo di produzione di beni o di realizzazione di un servizio.

I tre requisiti fondamentali di validità di un brevetto sono:

- *novità*;
- *attività inventiva*;
- *industrialità*.

Novità

Un'invenzione è considerata nuova se non è già compresa nello stato della tecnica; ove per stato della tecnica si intende tutto ciò che è stato reso accessibile al pubblico, in Italia o all'estero, prima della data del deposito della domanda di brevetto mediante descrizione scritta od orale, una utilizzazione o un qualsiasi altro mezzo¹. Ad esempio, se un'invenzione identica a quella oggetto della domanda di brevetto è già stata realizzata da un terzo, ma mai divulgata, sarà possibile procedere ugualmente al deposito della domanda; se, invece, quest'ultimo l'ha già diffusa in qualunque modo in Italia o all'estero, l'altrui invenzione non potrà più essere considerata nuova. Anche la pubblicazione dell'invenzione in un giornale scientifico, la relativa presentazione in una conferenza, l'utilizzo in ambito commerciale, l'esposizione in un catalogo costituiscono atti in grado di annullare la novità dell'invenzione. È pertanto importante impedire la rivelazione accidentale delle invenzio-



2. Scheda informativa del brevetto del pannello termoacustico realizzato con fibra biopolimerica a base di caseina.

ni prima di depositare una domanda di brevetto e – laddove sia necessario comunicare a terzi informazioni confidenziali inerenti a tale invenzione – far sottoscrivere a questi ultimi accordi di segretezza appositamente predisposti che li obblighino a non divulgare le predette informazioni in maniera non autorizzata.

Il requisito della novità è soddisfatto in quanto la fibra di caseina - anche se già sviluppata nella manifatturiera tessile - si pone come prima applicazione di biopolimeri nel settore delle costruzioni, ottenuti mediante il processo di polimerizzazione della caseina, considerata rifiuto speciale ai sensi del D.Lgs. 5.2.1997 n.22 (ex art.7) e prodotto di scarto riutilizzato in un ciclo chiuso secondo la Direttiva 2008/98/CE.

Attività inventiva

Un'invenzione implica attività inventiva quando, per una persona esperta del ramo, essa non risulti in modo evidente dallo stato della tecnica. Il requisito della non ovvietà intende assicurare che i brevetti siano concessi solo a risultati oggetto di un processo inventivo o creativo e non a processi che una persona, con ordinaria abilità nel campo tecnologico relativo, potrebbe facilmente dedurre da quanto già esiste². Esempi di una insufficiente attività inventiva, secondo quanto statuito dalle Corti di giustizia di diversi Paesi, sono: il mero cambio di un'unità di misura, il rendere un prodotto portatile, la sostituzione e il cambiamento di un materiale, la sostituzione di una parte con un'altra avente ugual funzionamento. Come pure è stata reputata non brevettabile l'applicazione di una precedente invenzione a un campo diverso da quello in cui l'inven-

zione originaria è stata concepita, poiché il tecnico medio del settore avrebbe potuto arrivare senza difficoltà alla soluzione tecnica proposta dal secondo brevetto.

Il requisito della non ovvietà consiste nella creazione di un isolante termico e acustico prodotto dal processo di polimerizzazione della caseina e impiegato nel settore della bioedilizia e nel crescente segmento di mercato dei biomateriali in architettura.

Industrialità

Un'invenzione ha un'applicazione industriale se il suo oggetto può essere fabbricato o utilizzato in qualsiasi genere di industria, compresa quella agricola³. Un'invenzione non può pertanto essere un semplice processo intellettuale, ma deve essere tecnicamente realizzabile e capace di condurre ad un risultato immediato nell'ambito della tecnica industriale generando effetti pratici. Per essere brevettabile, un'invenzione deve poter essere oggetto di utilizzazione industriale, ove il termine "industriale" è qui inteso nel suo più ampio significato, come un qualcosa di distinto dall'attività puramente estetica o speculativa.

Struttura del brevetto

La domanda di brevetto è strutturata secondo alcune funzioni:

- determina l'ambito legale del brevetto;
- descrive la natura dell'invenzione, fornendo le istruzioni su come attuare l'invenzione;
- fornisce dati sull'inventore, sul titolare del brevetto ed altre informazioni legali.

Le richieste di brevetto sono strutturate in modo simile in tutto il mondo e sono composte di una domanda, una descrizione, una o più rivendicazioni, i disegni ed un riassunto che ha esclusivamente finalità di informazione tecnica.

La *domanda* contiene informazioni sul titolo dell'invenzione, la data del deposito, la data di priorità ed i dati bibliografici, quali il nome e l'indirizzo del richiedente e dell'inventore.

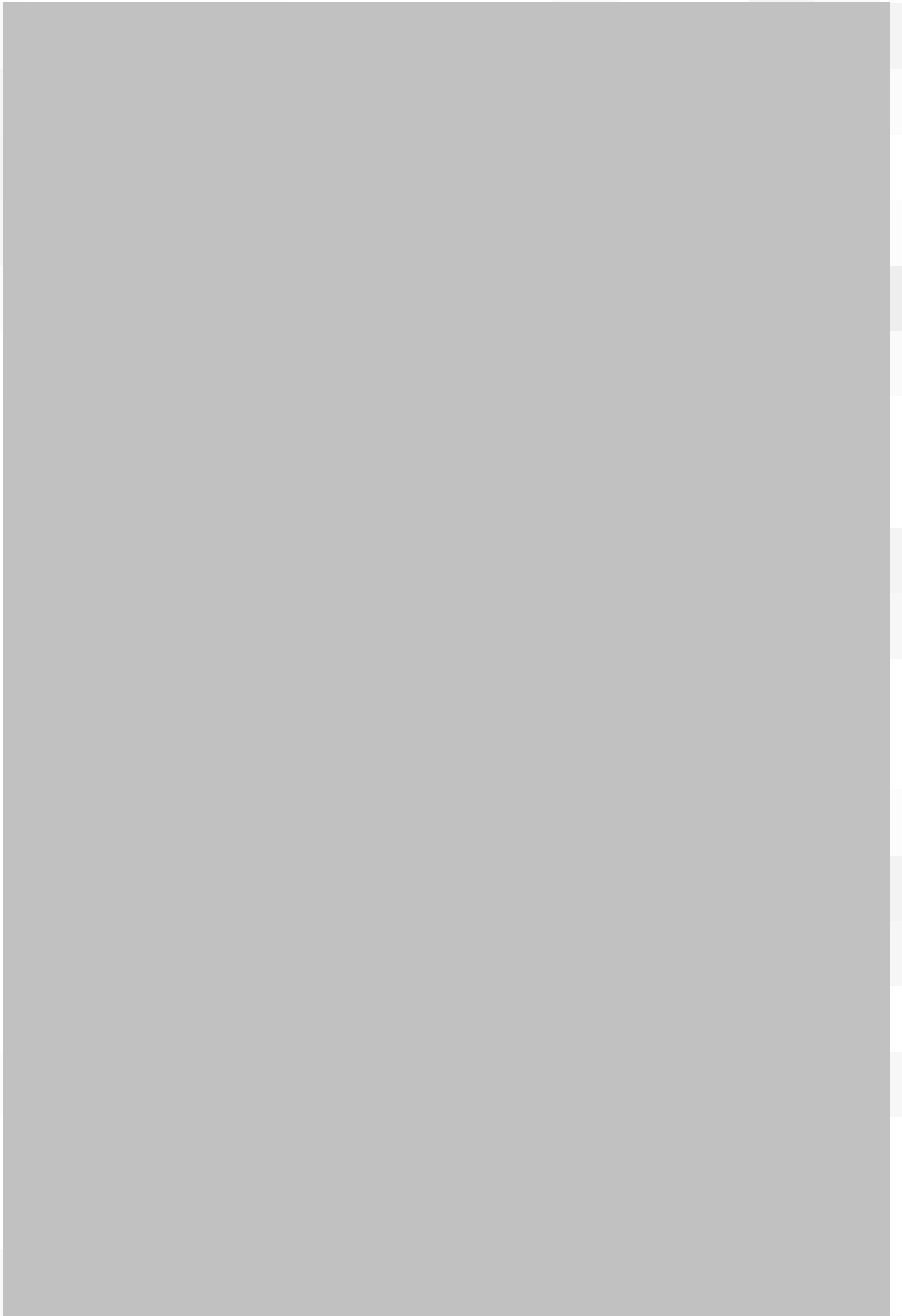
La *descrizione di un'invenzione* deve illustrare la stessa con particolari sufficienti in modo tale da permettere a chi ha una comprovata esperienza tecnica nello stesso settore di ricostruire e mettere in pratica l'invenzione basandosi esclusivamente su tali dati e disegni e, quindi, senza dover ricorrere ad alcun ulteriore sforzo inventivo. Nel caso in cui la descrizione dell'invenzione non presenti tali caratteristiche, il brevetto non potrà essere concesso.

Le *rivendicazioni* determinano l'ambito della tutela di un brevetto. Le stesse rivestono un ruolo fondamentale in quanto una imprecisa formulazione può determinare l'inutilità di un brevetto, rendendolo facile da eludere. Nel contenzioso sui brevetti interpretare le rivendicazioni è, generalmente, il primo passo per valutare la validità o l'avvenuta violazione. Tramite i *disegni* è possibile visualizzare i particolari tecnici dell'invenzione seppur in modo astratto. Tali disegni, possono aiutare ad illustrare alcune caratteristiche dell'invenzione indicate nella descrizione (fig.3).

Struttura del brevetto



3. Disegno del brevetto depositato. Legenda: 1 pannello termoacustico morfologicamente definito; 2 fibra biopolimerica di caseina; 3 fibra o resina termocoesiva; 4 soluzione basica che può contenere idrossido di ammonio, di potassio e/o sodio; 5 caseina; 6 precipitazione dell'idrossido di rame $\text{Cu}(\text{OH})_2$; 7-8 soluzione viscosa con messa in presenza di un metallo anfotero e formazione del tetrammino complesso; 9 bagno coagulante in acido solforico e bisolfato sodico; 10 fibra di caseina ottenuta per polimerizzazione lineare della viscosa; 11 estrusore; 12 bagno di fissaggio con uno o più acidi policarbonilici; 13 asta in vetro.



Stato della tecnica e ricerca d'antiorità

Oltre a verificare la brevettabilità di un'invenzione, una ricerca tempestiva ed efficace delle banche dati dei brevetti è in grado di fornire informazioni e conoscenze estremamente utili circa:

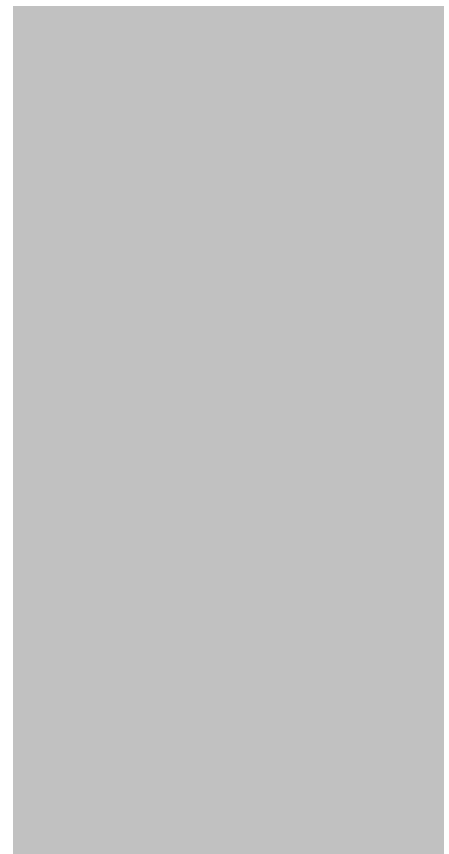
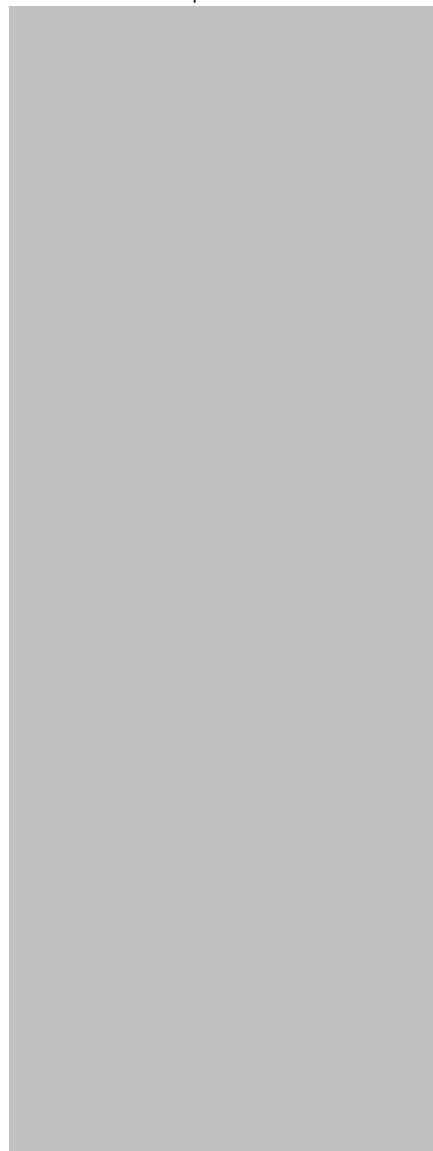
- *le attività di ricerca e sviluppo di attuali e futuri concorrenti;*
- *le attuali tendenze in un certo campo della tecnologia;*
- *le tecnologie per la concessione o l'ottenimento di licenze d'uso;*
- *i potenziali fornitori, partner commerciali o gruppi di ricercatori;*
- *le potenziali posizioni di mercato nel proprio Paese ed all'estero;*
- *i brevetti disponibili attualmente, al fine di assicurarsi che il vostro prodotto non sia in violazione degli stessi (libertà di operare);*
- *i brevetti connessi che siano venuti a scadere e la relativa tecnologia ormai di dominio pubblico;*
- *i possibili nuovi sviluppi basati sulle attuali tecnologie innovative.*

Mentre l'accesso alle informazioni in materia brevettuale è piuttosto semplice, non è altrettanto agevole compiere una ricerca brevettuale di qualità. Spesso, infatti, il linguaggio brevettuale è complesso e non immediato e le ricerche relative richiedono notevoli conoscenze e perizia. Mentre le ricerche preliminari possono essere facilmente e gratuitamente compiute attraverso banche dati di brevetti in rete, i soggetti interessati che devono far dipendere le loro scelte strategiche dalle informazioni in materia brevettuale (cioè se richiedere o meno un brevetto) generalmente si servono dei servizi offerti da professionisti e/o usano banche dati commerciali più sofisticate.

Nel presente brevetto ci si è serviti per l'analisi dello stato dell'arte della consulenza degli Uffici Brevetti del Politecnico di Milano e dell'Università degli Studi della Basilicata e della società GLP s.r.l. Una ricerca sullo stato dell'arte può essere realizzata basandosi su parole chiave, classificazioni

di brevetti o altri criteri di ricerca. Il successo nella ricerca dello stato dell'arte esistente dipende dalla strategia di ricerca impiegata, dal sistema di classificazione usato, dalle conoscenze tecniche del ricercatore e dalla banca dati impiegata.

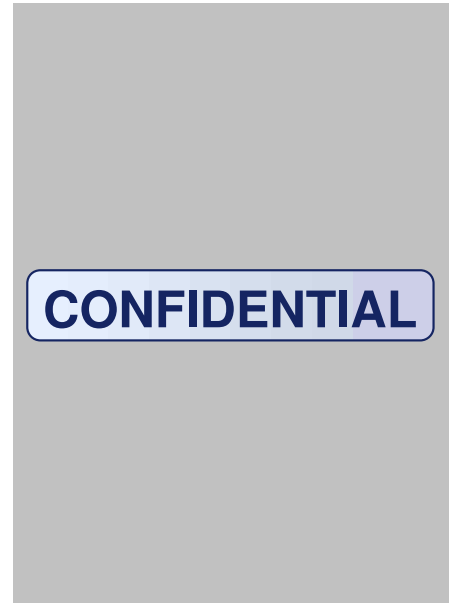
Nel presente caso, la caseina, chimicamente classificabile come fosfocaseinato di calcio è all'attualità classificata come rifiuto speciale dell'industria casearia (D.Lgs 5.2.1997, n.22) ed impiegata come prodotto surrogato per la produzione di integratori alimentari. Storicamente la caseina trovava impiego nella produzione di colle e adesivi naturali, in sostituzione delle resine sintetiche ed impiegata – per esempio - nel campo del restauro per la produzione di colori pigmentanti e impacchi consolidanti.





Tali fibre sono state impiegate esclusivamente nell'industria tessile, senza alcuna applicazione in ambito edilizio.

Nonostante alcune affinità in merito al processo di polimerizzazione del Lanital e della innovativa fibra biopolimerica a base di caseina, sussistono due differenze sostanziali:



Esiste, pertanto, la necessità di definire un metodo per la realizzazione di una fibra a matrice biopolimerica a base di caseina che possa superare almeno uno degli inconvenienti della tecnica e che possa trovare un ambito di applicazione nel settore dell'isolamento termico e di quello acustico degli edifici vecchi e nuovi.

Esposizione del trovato

Nel presente paragrafo si descrive l'esposizione del trovato in riferimento alla domanda depositata. La descrizione di un'invenzione deve illustrare la stessa con particolari sufficienti in modo tale da permettere a chi ha una comprovata esperienza tecnica nello stesso settore di ricostruire e mettere in pratica l'invenzione basandosi esclusivamente su tali dati e disegni e, quindi, senza dover ricorrere ad alcun ulteriore sforzo inventivo.

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

Rivendicazioni e forme di protezione

Le rivendicazioni determinano l'ambito della tutela di un brevetto. Le stesse rivestono un ruolo fondamentale in quanto una imprecisa formulazione può determinare l'inutilità di un brevetto, rendendolo facile da eludere.

Nel contenzioso sui brevetti interpretare le rivendicazioni è, generalmente, il primo passo per valutarne la validità o l'avvenuta violazione.

Si riportano le rivendicazioni formulate per il presente trovato:

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

Campo di applicazione e commercializzazione del brevetto



Per favorire la commercializzazione della fibra biopolimerica a base di caseina è indispensabile la validazione del prototipo industriale secondo i principi regolamentari e normativi. Nel panorama crescen-

te della sostenibilità ambientale nel settore delle costruzioni è importante che il prodotto risponda, non solo alla legislazione e normazione vigente sul territorio italiano ed europeo (marchio CE, Norme UNI, etc.), ma risponda a requisiti e criteri delineati dagli indirizzi normativi e ai protocolli europei per l'applicazione di materiali sostenibili, biodegradabili, rinnovabili, riciclabili e con alti contenuti di riciclato (Direttiva 2008/98/CE; CAM - Criteri Ambientali Minimi, Certificazione ambientale EPD - Environmental Product Declaration, etc.).

Un brevetto di per sé non è garanzia di successo commerciale. Esso è uno strumento che aumenta la capacità di un soggetto di beneficiare delle proprie invenzioni. Perché possa fornire un beneficio, un brevetto deve essere sfruttato efficacemente; in linea di massima esso produrrà profitti solo se il prodotto incontrerà i favori del mercato oppure se aumenterà la forza ed il potere contrattuale dell'impresa stessa. Per lanciare sul mercato un'invenzione brevettata, si dispone di una serie di opzioni:

- *commercializzare direttamente l'invenzione brevettata;*
- *vendere il brevetto a terzi;*
- *concedere in licenza il brevetto o stabilire una joint venture o altre alleanze strategiche con imprese o realtà imprenditoriali che dispongono di beni complementari.*

Commercializzare l'invenzione

Come già detto, la cessione a terzi equivale a dire il trasferimento della titolarità di un brevetto ad un'altra persona o ente.

Vendere il brevetto a terzi

La concessione in licenza di un brevetto a terzi, consente invece di ricevere delle retribuzioni (di solito si tratta di royalty) a fronte dell'autorizzazione all'utilizzo. Per tale motivo la concessione di una licenza può essere una strategia finanziaria molto valida dal punto di vista economico. Con la vendita, invece, si ottiene evidentemente un ricavo sotto forma di pagamento unico e definitivo che non prevede royalty periodiche.

Concedere in licenza il brevetto o stabilire joint venture

Un brevetto viene ceduto in licenza quando il relativo proprietario (il licenziante) concede il permesso ad altro soggetto (il licenziatario) di utilizzare l'invenzione brevettata per scopi concordati reciprocamente. In questi casi, un contratto di concessione viene generalmente firmato tra le due parti, specificando i termini e l'ambito dell'accordo. La concessione di una licenza è particolarmente utile se il soggetto che possiede l'invenzione non si trova nella condizione di produrla del tutto o in quantità sufficiente per soddisfare una certa esigenza di mercato o coprire una determinata area geografica.

Ci sono tre tipi di accordi di licenza che dipendono dal numero di coloro che hanno ottenuto la stessa e che potranno sfruttare commercialmente il brevetto:

- *licenza esclusiva*: un solo concessionario ha il diritto di utilizzare la tecnologia brevettata, la quale non può essere usata dal proprietario del brevetto;
- *licenza unica*: un solo concessionario, unitamente al proprietario del brevetto, ha il diritto di utilizzare la tecnologia brevettata;
- *licenza non esclusiva*: diversi concessionari, verosimilmente in aree diverse, ed il titolare del brevetto hanno il diritto di utilizzare la tecnologia brevettata.

In un singolo accordo di concessione può essere prevista l'assegnazione di alcuni diritti su base esclusiva ed altri su base unica o non esclusiva.

La scelta della tipologia di licenza (esclusiva o non esclusiva), dipende dal tipo di prodotto brevettato e dalla strategia commerciale che si vuole adottare. Ad esempio, se la tecnologia brevettata può diventare uno standard necessario per tutti coloro che fanno parte di un dato mercato al fine di realizzare i propri affari, una licenza non esclusiva largamente concessa sarebbe la più vantaggiosa.

Se, invece, il prodotto necessita di notevoli investimenti per la commercializzazione (ad esempio, un prodotto edile che richiede investimenti per compiere validazioni e certificazione) un potenziale licenziatario verosimilmente non desidererebbe la concorrenza di altri licenziatari e, comprensibilmente, potrà cercare di ottenere una licenza esclusiva.

Per il mantenimento di un brevetto occorre pagare una tassa di concessione annuale all'Ufficio Brevetti di ciascun paese nel quale il brevetto è stato concesso. Le tasse del deposito e di mantenimento variano a seconda del tipo e dell'estensione geografica del brevetto. Sulla base dell'estensione geografica, infatti, è possibile distinguere le tre tipologie di brevetto: italiano, europeo, internazionale. L'estensione europea ed internazionale del brevetto è strettamente correlata allo sviluppo commerciale che si vuole raggiungere del trovato⁴.

Per la fibra biopolimerica a base di caseina e per il relativo pannello termoacustico è, quindi, importante valutare la dimensione del mercato degli isolanti per le diverse aree geografiche, i principali operatori del mercato ed il settore di applicazione (edilizia residenziale, edilizia non residenziale, industriale, richiesta di sistemi HVAC (*Heating, Ventilation and Air Concitioning*) e OEM (*Original Equipement Manufacturer*)).

A livello globale, l'Europa è stato il più grande mercato per l'isolamento durante il periodo storico (2014-2017). Ciò è principalmente attribuito alle iniziative dell'Unione Europea (UE) nel promuovere l'isolamento termico come mezzo per il risparmio energetico. Inoltre, si prevede che anche la crescente consapevolezza dei consumatori riguardo ai vantaggi dell'isolamento avrà un impatto positivo sulla crescita del mercato regionale dell'isolamento. La Germania è la regione a guidare il mercato europeo, seguita da Francia, Regno Unito, Italia e Olanda.

5. Mercato mondiale dei materiali isolanti. Regioni geografiche con il più alto tasso di crescita annuo composto (CAGR - *Compound Annual Growth Rate* 2018-2025), maggiori prodotti isolanti commercializzati e principali operatore del mercato. Elaborazione grafica tratta dal Report di Prescient & Strategic Intelligence: *Insulation Market Research Report: by Product (Glass Wool, Mineral Wool, EPS, XPS), Application (Residential Construction, Non-Residential Construction, Industrial, HVAC & OEM) – Global Market Size, Share, Development, Growth, and Demand Forecast, 2014–2025*, 2018.

Oggi è significativa l'aumento esponenziale del *tasso di crescita annuo composto*, definito come *CAGR-Compound Annual Growth Rate* dell'isolamento, soprattutto nella regione APAC (Asia Pacifica), principalmente dovuta alla rapida industrializzazione, alla crescita economica e alle iniziative di risparmio energetico da parte dei governi per ridurre le emissioni di gas serra. La Cina è la regione a guidare il settore dell'isolamento dell'APAC nel periodo di previsione, generando entrate per 17,8 miliardi di dollari entro il 2025, seguito dai paesi emergenti quali India, Filippine, Thailandia, Malesia e Indonesia⁵. Anche Russia, Giappone e Brasile offrono un enorme potenziale di crescita a seguito degli sforzi compiuti per contrastare per contrastare l'aumento dei costi energetici e le crescenti iniziative governative verso l'efficienza energetica, che

si prevede innescherà nei prossimi anni la domanda di prodotti isolanti negli edifici industriali e residenziali. Nel Nord America (Stati Uniti e Canada), il cui mercato degli isolanti è monopolizzato dalle fibre minerali (lana di vetro e lana di roccia) e dall'EPS, si stima che il finanziamenti del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti incrementerà la domanda dei prodotti isolanti, stimolando l'intera crescita globale. Secondo una ricerca condotta dal 2016 dalla *Harvard School of Public Health*, si è scoperto che circa 45 milioni di residenze negli Stati Uniti presentano condizioni di isolamento insufficiente, il che rappresenta un'enorme opportunità per l'isolamento nel paese⁶.

L'analisi del mercato, sintetizzata nella figura seguente è un dato indispensabile per l'internazionalizzazione del brevetto (fig.5).



6.2. Sviluppo di una strategia brevettuale: prototipazione e definizione di un modello di business

Criteria e requisiti per la prototipazione del brevetto

Per la fase del deposito della domanda di brevetto della fibra biopolimerica a base di caseina e del relativo pannello termoacustico non si richiede necessariamente un prototipo, ma è sufficiente disporre di una progettazione processuale tecnica per la realizzazione del trovato e dei principi di innovatività e industrialità su cui il brevetto si basa. Solo nel momento in cui il brevetto dovesse riguardare un modello di utilità si renderà necessario sviluppare le caratteristiche funzionali del prodotto attraverso disegni o modelli.

Quando si sviluppa un brevetto è usuale procedere al deposito senza aver prima realizzato un prototipo, rendendosi conto - solo nel seguito - di dover apportare una serie di modifiche al progetto iniziale. In questo caso è importante valutare che le modifiche apportate al progetto iniziale rientrino nella protezione garantita dal brevetto. In particolare occorre prendere in considerazione le rivendicazioni e analizzare che cosa esse proteggano. Ciò che viene rivendicato risulta, quindi, compreso anche nel prototipo sperimentato posteriormente: in tal caso esso risulterà protetto. Contrariamente, se il prototipo presenterà delle caratteristiche del tutto differenti, allora il requisito di protezione verrà meno.

Accade, quindi, che il prototipo abbia i requisiti indicati nel brevetto iniziale, ma presenti - in aggiunta o in alternativa) - delle soluzioni tecniche secondarie o migliorative o che comunque lo diversificano dal progetto originale. In questo caso il requisito di protezione è ancora preservato, ma può risultare sempre conveniente depositare una nuova domanda di brevetto per proteggere le caratteristiche non presenti inizialmente rendendo,

d'altronde, l'invenzione commercialmente più appetibile e interessante. Una valutazione simile potrà essere effettuata solo a seguito di un confronto concreto tra prototipo e domanda di brevetto.

Nel caso in cui, a seguito del deposito, la realizzazione del prototipo comporti delle modifiche al progetto iniziale è possibile durante i successivi dodici mesi dalla data di deposito far valere il *diritto di priorità*⁷ per effettuare un nuovo deposito di una successiva domanda di brevetto nazionale, europea o internazionale integrando alle rivendicazioni già richiamate dal primo deposito, le modifiche attinenti la prototipazione (fig.6).

La commercializzazione del brevetto a seguito della validazione del prototipo e alle eventuali modifiche ed integrazioni al progetto nativo, può avvenire anche senza la concessione del brevetto, che solitamente richiede per il rilascio un tempo di circa 24 mesi dalla data di deposito. Esistono, infatti, molti oggetti/modelli che vengono prodotti senza che sia stato richiesto alcun brevetto, in quanto quest'ultimo non rappresenta un 'lasciapassare' per avviare la produzione. Pertanto è sicuramente possibile iniziare a commercializzare un'invenzione senza attendere necessariamente la concessione del brevetto o - qualora non esistesse nessun brevetto - avere premura di controllare che nessun altro abbia precedentemente brevettato l'oggetto o il modello che si intende produrre.

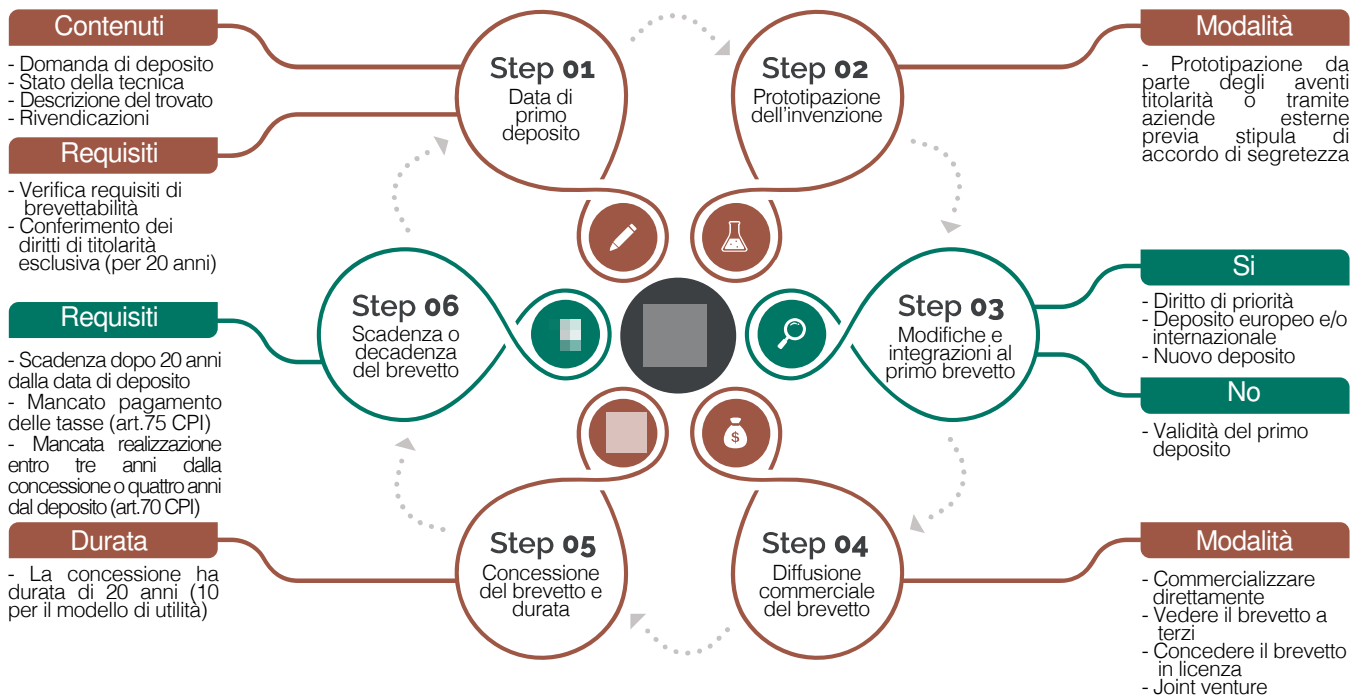
È importante, in fase di prototipazione, porre attenzione alle scadenze e agli adempimenti burocratici, la cui inosservanza può comportare la *decadenza di un brevetto*⁸. I diritti esclusivi, infatti, si ottengono con la concessione del brevetto; tuttavia essi decorrono dalla data di deposito della domanda di brevetto e durano 20 anni (10 per il modello di utilità) allo scadere dei quali non è possibile rinnovare il brevetto, che diventa liberamente riproducibile da tutti⁹.

●
Diritto di priorità
(art. 4 CPI)

Nella fase di prototipazione è importante valutare che le modifiche soddisfino i requisiti di protezione riportati nelle rivendicazioni.

●
Decadenza del brevetto
(artt. 26, 27 e 75 CPI)

●
Durata del brevetto
(art. 60 CPI)



6

6. Sviluppo temporale di una strategia brevettuale e della prototipazione dell'invenzione.

La decadenza prematura del brevetto, quindi, dipende da innumerevoli fattori, tra questi la mancata fase di attuazione del brevetto, subordinata alla prototipazione e commercializzazione del trovato. Attuazione, infatti, significa fabbricazione e vendita del prodotto in uno dei Stati Membri dell'Unione Europea po dell'Organizzazione Mondiale del Commercio. Trascorsi tre anni dalla data di rilascio del brevetto o quattro anni dalla data di deposito della domanda se questo termine scade, qualora il titolare del brevetto o il suo avente causa, direttamente o a mezzo di uno o più licenziatari, non abbia attuato l'invenzione brevettata, producendo nel territorio dello Stato o importando oggetti prodotti in uno Stato membro della Unione europea o dello Spazio economico europeo ovvero in uno Stato membro dell'Organizzazione Mondiale del Commercio, ovvero l'abbia attuata in misura tale da risultare in grave sproporzione con i bisogni del Paese, può essere concessa *licenza obbligatoria* per l'uso non esclusivo dell'invenzione medesima, a favore di ogni interessato che ne faccia richiesta.

to decade, qualora l'invenzione non sia stata attuata entro due anni dalla data di concessione della prima licenza obbligatoria o lo sia stata in misura tale da risultare in grave sproporzione con i bisogni del Paese¹⁰.

Per potere mantenere in vita il brevetto occorre pagare la tassa di mantenimento prevista annualmente o, per i modelli di utilità, allo scadere del primo quinquennio. Come previsto dall'art. 75 CPI il brevetto decade per mancato pagamento della tassa annuale prevista. La tassa deve essere pagata alla scadenza ma può essere anche pagata, con sovrattassa, nei sei mesi successivi. Scaduto questo ulteriore termine il brevetto decade senza alcuna possibilità di recuperarlo.

●
Licenza obbligatoria
(art. 70 CPI)

La concessione della licenza obbligatoria non esonera il titolare del brevetto o il suo avente causa dall'onere di attuare l'invenzione. Il brevetto

Scenari di sviluppo per la fase di prototipazione brevettuale

La titolarità del brevetto si pone come valido strumento per ottenere risorse finanziarie integrative da destinare alla prototipazione del trovato, il cui scopo è confermare o migliorare le caratteristiche del trovato sempre nel rispetto delle rivendicazioni della domanda di deposito. Questo processo rappresenta una pietra miliare per allineare il prototipo alle esigenze di mercato in vista di una futura produzione e commercializzazione, nonché come valido sussidio per attirare investitori pronti a finanziare progetti ambiziosi.

Come già detto, per la fase di prototipazione del pannello in fibra biopolimerica a base di caseina è possibile servirsi del supporto di aziende di settore o laboratori, previa sottoscrizione di un accordo di segretezza che dovrà contenere delle specifiche clausole che vincolino alla riservatezza e la cui promulgazione è finalizzata ai test o alla sperimentazione. Sarà obiettivo dell'azienda o delle aziende realizzare il primo prototipo, il cui primario obiettivo è la valutazione e validazione delle proprietà fisiche, chimiche e meccaniche, sulla base delle quali apportare eventuali miglioramenti dal punto di vista prestazionale. Tale passaggio rappresenta il primo passo verso la definizione di un marchio distintivo del prodotto e della produzione a livello industriale, un percorso che può essere sintetizzato dalla locuzione "dall'idea al brevetto, dal prototipo al prodotto".

La prototipazione richiede, quindi, un certo dispendio di risorse in termini economici e naturalmente di tempo. Per questo motivo sarebbe utile usufruire di agevolazioni per la valorizzazione economica dei brevetti, incentivando l'utilizzo dei diritti di proprietà industriale per realizzare politiche industriali a favore della capacità di ricerca, di sperimentazione e di innovazione. Numerose sono le misure di finanziamento a favore di diversi soggetti (inventori, enti, PMI, etc.) per lo sviluppo di una strategia brevettuale.

Brevetti +

Ministero dello Sviluppo Economico

7

Brevetti +

"Brevetti+" un incentivo del Ministero dello Sviluppo Economico – Direzione Generale per la Tutela della Proprietà Industriale – Ufficio Italiano Brevetti e Marchi che mira a sostenere la capacità innovativa e competitiva di diversi *stakeholders* (tra cui i titolari di una domanda nazionale di brevetto per invenzione industriale) attraverso la valorizzazione economica dei brevetti su mercati nazionale ed internazionale. Le agevolazioni (del valore massimo di €140.000, nel rispetto della regola del *de minimis*) sono finalizzate all'acquisto di servizi specialistici relativi a:

- *industrializzazione e ingegnerizzazione del brevetto*: ovvero servizi quali studio di fattibilità, progettazione produttiva, progettazione ed ingegnerizzazione del prototipo, test di produzione, produzione pre-serie, rilascio di certificazioni di prodotto o di processo;
- *organizzazione e sviluppo*: quali servizi di IT Governance¹¹, studi ed analisi per lo sviluppo di nuovi mercati geografici e settoriali, servizi per la progettazione organizzativa, organizzazione dei processi produttivi, definizione della strategia di comunicazione, promozione e canali distributivi;
- *trasferimento tecnologico*: tra cui *proof of concept*¹², *due diligence*¹³, predisposizione accordi di segretezza, predisposizione accordi di concessione in licenza del brevetto, costi dei contratti di collaborazione tra PMI e istituti di ricerca/università (accordi di ricerca sponsorizzati), contributo all'acquisto del brevetto (solo per spin-off e le start up innovative iscritte nel registro speciale al momento della presentazione della domanda di accesso).

7. Brevetti +, incentivo del Ministero dello Sviluppo Economico – Direzione Generale per la Tutela della Proprietà Industriale – Ufficio Italiano Brevetti e Marchi.

Dall'idea al brevetto;
dal prototipo al
prodotto.

EIC Accelerator

Anche in ambito europeo, la Commissione Europea ha introdotto nuove opportunità di finanziamento per la ricerca e l'innovazione. Tra le opportunità, "l'EIC Accelerator" (che sostituisce lo "SME Instrument" all'interno del programma europeo Horizon 2020) potrebbe rappresentare lo strumento più confacente alla fase di sviluppo e prototipazione della fibra biopolimerica a base di caseina ed il relativo pannello termico ed isolante.

All'interno dello *European Council Innovation* (EIC), la Commissione Europea ha deciso di introdurre, all'interno della cornice *Horizon Europe*, una nuova *mission* dedicata a diversi *stakeholders* (soggetti singoli, start-up, PMI, spin-off, organismi di ricerca, università), con lo scopo di sviluppare e commercializzare nuovi prodotti, servizi e modelli di business ad alto rischio e ad alto potenziale, in grado di creare nuovi mercati o modificare profondamente quelli esistenti. Si tratta dello strumento più interessante, grazie alla sua natura senza ambiti tematici specifici (*bottom-up*) attraverso finanziamenti nella forma di *grant* (cofinanziamento a copertura del 70% delle spese ammissibili tra 500.000€ e 2.500.000€) o *blended finance* (delle

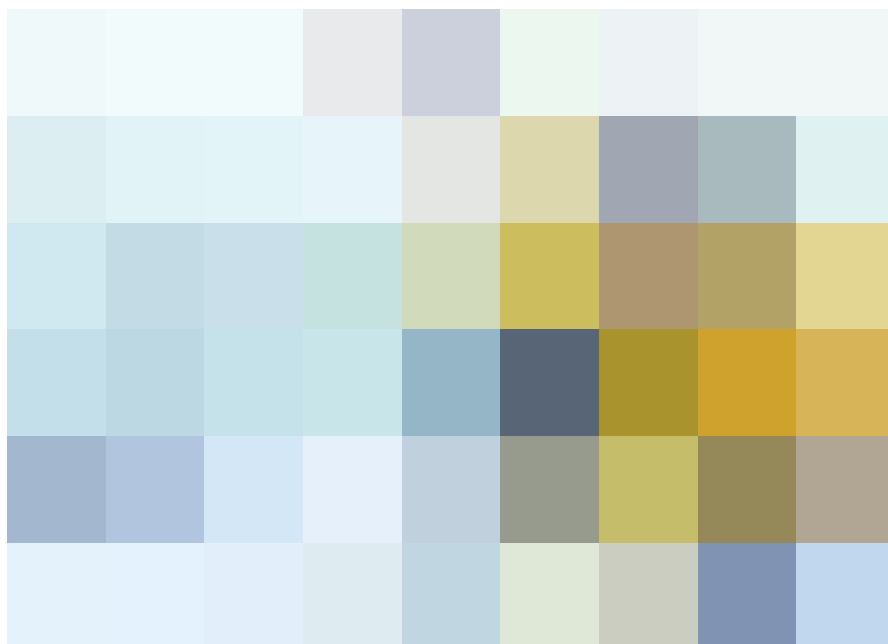
spese ammissibili fino ad un massimo di 2.500.000€ + equity fino a 15.000.000€) e di servizi dedicati di *coaching* e di *business acceleration*. Il finanziamento sostiene i processi di sviluppo e pre-industrializzazione che includono attività di:

- *prototipazione e testing*;
- *up-scaling, design e costruzione*;
- *adattamento alle diverse esigenze di mercato nei paesi europei*;
- *price model*;
- *redazione di una strategia comunicativa e marketing efficiente*.

Rispetto al programma precedente, EIC Accelerator si compone di due macro-aree:

- *EIC Accelerator Open*: che continuerà a finanziare la diffusione di prodotti o servizi innovativi sviluppati in tutti i settori;
- *EIC Accelerator Challenges*: che servirà a finanziare innovazioni rivoluzionarie in particolari ambiti. Per il 2021 tali ambiti riguardano la "salute strategica e tecnologie digitali" e il "Green Deal nell'Unione Europea", tematica ampiamente affrontata nella presente ricerca e che si pone come ambito ideale su cui indirizzare la prototipazione e la creazione di un modello di business sull'isolamento termico con materiali biopolimerici, quali la fibra di caseina.

8. European Commission, Horizon Europe - Investing to shape our future, Giugno 2020.



**E
I
C**
Accelerator
European Council

PoC - Proof of Concept

Dal punto di vista della ricerca e dello sviluppo tecnologico in ambito accademico, il Ministero dello Sviluppo Economico sostiene dei bandi per la realizzazione di programmi di valorizzazione dei brevetti tramite finanziamento di progetti di *Proof of Concept* (PoC) affinché possano diventare oggetto di azioni di sviluppo e parte del sistema imprenditoriale.

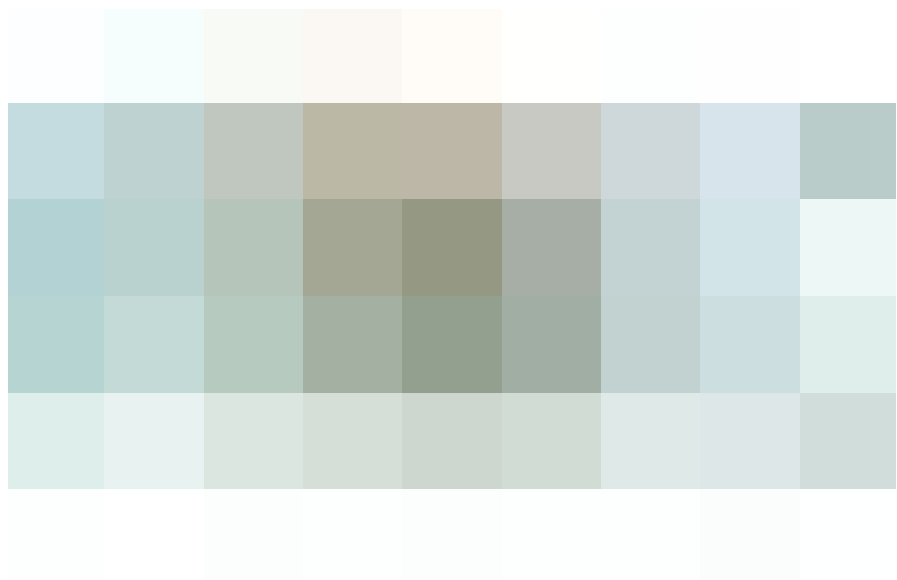
Solitamente i progetti PoC hanno durata complessiva non superiore a 18 mesi e sono presentati dalle Università statali e non statali, dagli Enti Pubblici di Ricerca - EPR e dagli Istituti di Ricovero e Cura a Carattere Scientifico - IRCCS presenti sul territorio nazionale, che detengono almeno un brevetto e/o abbiano presentato domanda di almeno un brevetto, ai fini di innalzare il livello di maturità tecnologica dei titoli di proprietà secondo la scala di TRL (*Technology readiness levels*)¹⁴. Come nel caso del bando europeo EIC Acceleration, anche per i PoC la misura di finanziamento non è superiore al 70% del totale dei costi ammissibili, entro un importo massimo di finanziamento solitamente non superiore a € 320.000. I costi ammissibili al finanziamento solitamente prevedono:

- *spese di personale (ricercatori, tecnici e altro personale di supporto, purché impegnati nelle attività riconducibili al progetto e non inseriti a tempo indeterminato nell'organico);*
- *materiali, attrezzature e licenze software (se gli strumenti e le attrezzature non sono utilizzati per tutto il loro ciclo di vita per lo svolgimento delle attività progettuali, è considerata ammissibile unicamente la quota parte corrispondente alla durata del progetto; nel caso di attrezzature già presenti presso il soggetto proponente, è considerata ammissibile la relativa quota di utilizzo);*
- *servizi di consulenza specialistica tecnologica (tali costi non potranno essere superiori al 50% del totale dei costi ammissibili).*

Anche la Divisione Sviluppo Tecnologico dell'Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile - ENEA, attraverso la Disposizione n.203/2019/PRES, dispone annualmente il programma "*Proof of Concept Program*", che mira a ridurre la distanza tra risultati della ricerca e applicazione industriale e a favorire il trasferimento tecnologico verso l'industria al fine di sostenere lo sviluppo di tecnologie con basso grado di maturità tecnologica (anche in questo caso misurabile secondo la scala TRL - *Technology readiness levels*). In questo caso, le attività di ricerca dovranno essere svolte in collaborazione con un partner industriale che dovrà contribuire alle attività previste, da selezionarsi con avviso pubblico, sulla base di una manifestazione di interesse, comunque non vincolante per l'Agenzia. La quantità di progetti finanziati dipenderà dal numero delle proposte finanziabili ricevute; il contributo complessivo ENEA non potrà comunque eccedere l'ammontare complessivo del Fondo che - nell'annualità del 2020 - sarà di importo massimo pari a 1.000.000 di euro. Le risorse finanziarie sono rese disponibili per realizzare esperimenti che dimostrino la fattibilità di una tecnologia o del *concept* di un prodotto per:

- *costruire/migliorare un prototipo per prepararne la commercializzazione;*

9. PoC - Proof of Concept



- *verificare la fattibilità commerciale per lo scale up¹⁵;*
- *dimostrare la mitigazione del rischio per un potenziale investitore/industria o licenziatario, nel caso esista un brevetto;*
- *affrontare e superare uno specifico gap identificato dall'industria e che ne ostacola l'attrattività per gli investitori.*

Trasferimento Tecnologico

Sempre dal punto di vista delle risorse in ambito di ricerca, sono spesso disponibili finanziamenti di progetto di potenziamento *capacity building* degli UTT - Uffici di Trasferimento Tecnologico al fine di aumentare l'intensità dei flussi di trasferimento tecnologico verso il sistema imprese (*knowledge transfer manager*). Nel presente caso, il processo di brevettazione e di prototipazione potrebbe subire una conversione da invenzione scientifica in prodotti e processi industriali attraverso la promulgazione del brevetto in apposite piattaforme facilmente consultabili da piccole imprese, distretti tecnologici e incubatori. Una di queste è la *Knowledgeshare* è un progetto congiunto del Politecnico di Torino, del Ministero dello Sviluppo Economico - MISE, dell'Ufficio Italiano Brevetti e Marchi - UIBM e Netval che vuole rappresentare per le imprese italiane il punto d'incontro con la conoscenza sviluppata dalla ricerca universitaria e dei Centri di Ricerca, che può essere oggetto di applicazione concreta. È un portale nato per rendere disponibili in modo chiaro e comprensibile informazioni relative a brevetti e tecnologie che rappresentano l'eccellenza del *know-how* scientifico delle Università italiane e dei Centri di Ricerca, al fine di rendere fruibili le notizie riguardanti la Terza missione e mettere in contatto gruppi di ricerca ed imprese al fine di valorizzarne i risultati. La registrazione del brevetto della fibra di caseina e del relativo pannello sulla piattaforma summenzionata, rappresenta un primo importante passo per la conversione del progetto in prodotto industriale.

Fondo per la crescita sostenibile

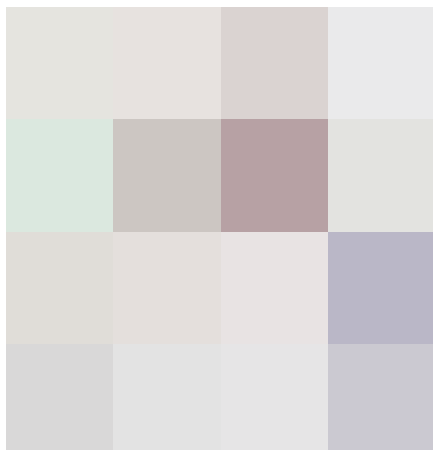
Con la riforma degli incentivi alle imprese (Decreto Crescita 2012 e successive modifiche), il FIT - Fondo per l'Innovazione Tecnologica ha assunto la denominazione di "Fondo per la Crescita Sostenibile", destinato al finanziamento di programmi e interventi, quali:

- *la promozione di progetti di ricerca, sviluppo e innovazione di rilevanza strategica per il rilancio della competitività del sistema produttivo, anche tramite il consolidamento dei centri e delle strutture di ricerca e sviluppo delle imprese;*
- *il rafforzamento della struttura produttiva, il riutilizzo di impianti produttivi e il rilancio di aree che versano in situazioni di crisi complessa di rilevanza nazionale tramite la sottoscrizione di accordi di programma;*
- *la promozione della presenza internazionale delle imprese e l'attrazione di investimenti dall'estero, anche in raccordo con le azioni che saranno attivate dall'ICE - Agenzia per la promozione all'estero e l'internazionalizzazione delle imprese italiane.*

Le agevolazioni del Fondo sono concesse nella forma del finanziamento agevolato. La possibilità di concedere incentivi in forma diversa è subordinata al cofinanziamento comunitario o regionale.

Gli interventi del Fondo sono attuati con bandi ovvero direttive del Ministro dello sviluppo economico, in cui sono individuati, in particolare, l'ammontare delle risorse disponibili, i requisiti di accesso dei soggetti beneficiari, le condizioni di ammissibilità dei programmi d'investimento o dei progetti di ricerca e sviluppo, le spese ammissibili, nel rispetto delle intensità massime stabilite dalla normativa comunitaria, nonché i termini e le modalità per la presentazione delle domande, i criteri di valutazione dei programmi e le modalità per la concessione ed erogazione degli aiuti.

10. Piattaforma Knowledgeshare, progetto congiunto del Politecnico di Torino, del Ministero dello Sviluppo Economico - MISE, dell'Ufficio Italiano Brevetti e Marchi - UIBM e Netval.



Start-up innovative, innovation hub, incubatori e organismi di ricerca

La creazione di un sistema imprenditoriale come start-up, *innovation hub*, incubatori e acceleratori di idee e organismi di ricerca (per esempio spin-off universitari o accademici), permette di accedere alle agevolazioni con lo scopo di presentare un progetto di sviluppo avente le seguenti caratteristiche:

- essere basato su una soluzione innovativa da proporre sul mercato, sebbene da consolidare negli aspetti più operativi, che soddisfi esigenze che rendano il progetto scalabile;
- essere finalizzato a realizzare il prototipo (Minimum Viable Product)¹⁶ o la prima applicazione industriale del prodotto o servizio per attestare i feedback dei clienti e/o investitori.

Per tale linea di intervento, sono ammissibili alle agevolazioni i piani di attività, aventi una durata non inferiore a 12 mesi, che prevedono l'acquisizione di servizi finalizzati ad accelerare e facilitare la realizzazione di un determinato progetto di sviluppo. I predetti servizi, che devono essere erogati dagli attori dell'ecosistema dell'innovazione abilitati, possono riguardare i seguenti ambiti:

- consulenza operativa e strategica finalizzata allo sviluppo e all'implementazione del progetto;
- gestione proprietà intellettuale;
- supporto nell'autovalutazione della maturità digitale;
- sviluppo e scouting di tecnologie e prototipazione;
- campagne di crowdfunding;
- la messa a disposizione dello spazio fisico e dei relativi servizi accessori di connessione e networking necessari per lo svolgimento delle attività di progetto.

11. Sintesi dei programmi di sviluppo per la prototipazione della fibra biopolimerica a base di caseina e relativo pannello.

Sintesi dei programmi di sviluppo per la prototipazione

Programma	Descrizione	Soggetti	Servizi	Agevolazioni
Brevetti +	Sostenere la capacità innovativa e competitiva di diversi stakeholders attraverso la valorizzazione economica dei brevetti su mercati nazionale ed internazionale.	- titolari di brevetto - imprese neo-costituite in forma di società di capitali a seguito di spin-off universitari/accademici	- industrializzazione e ingegnerizzazione del brevetto - organizzazione e sviluppo - trasferimento tecnologico	- €140.000, nel rispetto della regola del de minimis
EIC Accelerator	Sviluppare nuovi prodotti, servizi e modelli di business ad alto rischio e ad alto potenziale, in grado di creare nuovi mercati o modificare profondamente quelli esistenti.	- soggetti singoli - start-up - PMI - spin-off - università - organismi di ricerca	- prototipazione e testing - up-scaling - coaching - business acceleration - price model - strategie comunicative	- grant finance (copertura del 70% delle spese ammissibili tra €500.000 e €2.500.000 - blended finance (spese ammissibili fino a €2.500.000 + equity fino a €15.000.000)
PoC Proof of concept	Innalzare il livello di maturità tecnologica dei brevetti e dei titoli di proprietà secondo la scala di TRL (Technology readiness levels)	- università statali e non - enti pubblici di ricerca - istituti di ricovero e cura a carattere scientifico	- spese personale - materiali e attrezzature - consulenza specialistica - prototipazione e testing - fattibilità commerciale - mitigazione del rischio - ricerca investitori	- copertura del 70% delle spese ammissibili per un massimo di €320.000 - importo massimo di €1.000.000 (PoC Enea)
Trasferimento Tecnologico	Potenziamento capacity building degli UTT al fine di aumentare l'intensità dei flussi di trasferimento tecnologico verso il sistema imprese (knowledge transfer manager)	- università statali e non - PMI	- prototipazione e testing - knowledge transfer manager	

Dal prototipo alla creazione di un modello di business

Il brevetto rappresenta un formidabile strumento commerciale che consente attraverso la ricerca e l'innovazione di acquisire risorse economiche supplementari da investire in modelli di business.

Il brevetto (ed il relativo prototipo), infatti, può essere percepito dai partner commerciali, dagli investitori e dai clienti, come una dimostrazione dell'alto livello di qualità, specializzazione e capacità sperimentale e tecnologica degli inventori e dell'ente di appartenenza (in questo caso l'Università degli Studi della Basilicata ed il Politecnico di Milano). Attraverso il brevetto e il relativo prototipo non solo si dispone di un diritto esclusivo sul mercato, ma è possibile ottenere innumerevoli vantaggi economici e competitivi.

Come già detto in precedenza, i titolari del brevetto possono cedere l'uso dello stesso a terzi in cambio di un compenso e/o *royalty*, in modo da produrre profitti supplementari e accedere a nuovi mercati che sarebbero altrimenti inaccessibili. Fino a quando il prodotto non diventa "reale" è soltanto una idea.

Certamente il brevetto non è un mezzo per garantire a priori il successo commerciale del pannello in fibra biopolimerica a base di caseina, ma il vantaggio commerciale dovrà scaturire necessariamente dalle potenzialità insite nel prodotto stesso.

Esistono, infatti, dei criteri per cui un brevetto può essere considerato un *asset* in grado di produrre valore, ovvero:

- *possedere un mercato potenziale;*
- *il prodotto oggetto di brevettazione non deve diventare obsoleto a breve termine ed/od essere sostituito da un prodotto più semplice da ottenere a parità di prestazioni;*
- *il prodotto oggetto di brevettazione dovrà limitare a terzi di produrre, vendere o importare un elemento che sia in contraffazione*

con una o più rivendicazioni;

- *il sistema legale dei Paesi in cui verrà depositato il brevetto, dovrà essere efficiente ed in grado di far valere i propri diritti.*

La necessità di dotarsi di un modello di business risiede nella volontà di fornire uno strumento logico ed una strategia per comprendere il valore economico, dei servizi e della tecnologia del pannello in fibra biopolimerica di caseina e come esso crea valore per i diversi *stakeholder*. Inoltre l'importanza del modello di business fornisce una base per sfruttare la tecnologia innovativa, definire una *mission* e *vision* del progetto, produrre un'analisi chiara dell'industria, includendo opportunità e rischi, realizzare un profilo dei potenziali clienti, sviluppare una strategia di marketing e realizzare un piano d'azione e un programma per raggiungere scopi e obiettivi.

Per tale motivo è importante perseguire una adeguata gestione e tutela degli *asset* in grado di produrre valore attraverso la predisposizione di un piano (*Innovation Plan*). L'*Innovation Plan* ha lo scopo di massimizzare il valore della proprietà intellettuale e minimizzare il rischio di ledere i diritti a terzi. Si tratta di uno strumento decisionale utile a:

- *evitare di disperdere risorse;*
- *massimizzare il valore del capitale intellettuale;*
- *minimizzare i rischi di contraffazione;*
- *identificare gli asset intangibili;*
- *assegnare una priorità ai beni individuati;*
- *codificare in titoli di proprietà intellettuale solo gli asset importanti per il business;*
- *analizzare il portafoglio brevettuale della concorrenza;*
- *monitorare i prodotti della concorrenza*¹⁷.

Diversi sono comunque gli strumenti per la definizione di un modello di business, sovente basati su grafici e schemi visivi. Nella letteratura viene spesso

usata la classificazione di quattro elementi dei modelli di business:

- proposte di valore per il cliente;
- risorse chiave;
- attività chiave;
- costi e flussi di ricavo.

Tra questi lo strumento più utilizzato oggi per la rappresentazione grafica dei problemi correlati alla strategia¹⁸ è il *business model canvas* che classifica i processi e le attività di impresa (o futura impresa) in nove blocchi:

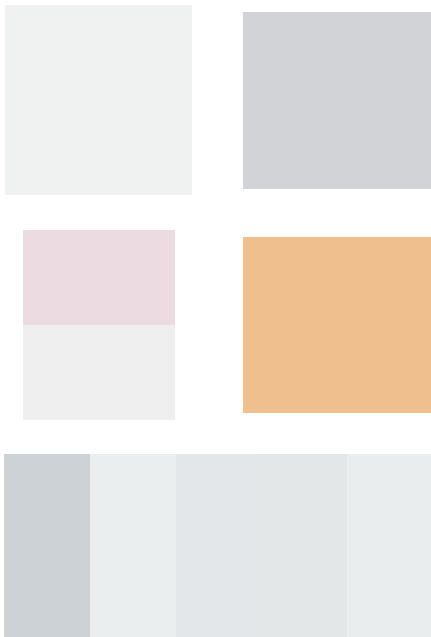
- *segmento di clientela*: rappresenta il target di clienti attuali o futuri dell'impresa;
- *relazione con i clienti*: rappresenta la natura del rapporto, il tipo di relazione, il legame stabilito, l'intimità ed il L.C.A. con i clienti;
- *canali*: sono il mezzo attraverso i quali un'impresa fornisce il suo prodotto al cliente;
- *proposta di valore*: è l'insieme dei benefici che l'impresa crea per soddisfare le aspettative del cliente;

- *flussi di ricavo*: è la metodologia dell'impresa per far sì che i clienti acquistino il prodotto o il servizio (Per cosa pagano i clienti? Come pagano? Quanto sono disposti a pagare? Come vorrebbero pagare?);
- *risorse chiave*: possono essere tangibili (per esempio le risorse fisiche) e intangibili (per esempio il brevetto, il capitale umano, etc.);
- *attività chiave*: sono le attività rilevanti e fondamentali per produrre il bene-servizio;
- *partner chiave*: è la rete di partner e fornitori (alleanza strategica, *joint venture*, partnership, etc.);
- *costi*: si suddividono in *costi fissi* (che rimangono invariati nel tempo) e *costi variabili* (variano in relazione alla produzione) (fig.12).

In relazione ai criteri summenzionati è stato sviluppato un modello di business che si pone come base per l'eventuale sviluppo commerciale della fibra biopolimerica a base di caseina e del relativo pannello termoacustico.

12. Business Model Canvas per lo sviluppo commerciale della fibra biopolimerica a base di caseina e relativo pannello.

Key Partners	Key Activities	Value Proposition	Customer Relationships	Customer Segments
<ul style="list-style-type: none"> - Aziende di settore - Enti di ricerca - Tecnici e designer - Joint venture 	<ul style="list-style-type: none"> - Programmi di ricerca e sperimentazione - Advertising - Attività logistica - Protezione brevetto - Promozione 	<ul style="list-style-type: none"> - Isolamento termico ed acustico naturale - Sostenibilità ambientale e basso impatto ambientale nell'intero L.C.A. - Impiego di C&CW - Bioedilizia - Compatibilità normativa sulla transizione ecologica - Processi di economia circolare 	<ul style="list-style-type: none"> - Relazione identitaria - Partnership - Certificazioni e protocolli di qualità - Regional sales Manager - Programmi ed eventi fieristici 	<ul style="list-style-type: none"> - Imprese edili - Fornitori - ESCo - Energy Service Company - Industria tessile - Industria dei salotti - Interior design
	Key Resources		Channels	
	<ul style="list-style-type: none"> - Proprietà intellettuale - Laboratori e attrezzature - Macchinari - Risorse fisiche 		<ul style="list-style-type: none"> - Networking - Contatti di vendita - Rivenditori autorizzati - Website e mobile apps 	
Cost Structure			Revenue Streams	
<ul style="list-style-type: none"> - Costi di gestione - Costi di produzione - Costi di manutenzione dei macchinari e del laboratorio - Materie prime (fibre termocoesive) - Macchinari (formatrice, cardatrice, etc.) - Costi logistici, d'impianto e commerciali - Costi di mantenimento del brevetto e della tutela della P.I. - Ricerca e prototipazione di nuovi prodotti 			<ul style="list-style-type: none"> - Ricavo dalla dismissione della caseina - Incentivi per l'adozione di politiche economiche circolari (materiali sostenibili, biopolimeri, C&DW, bioedilizia, etc.) - i clienti pagano per la sostenibilità del prodotto a parità di prestazioni termiche ed acustiche, durabilità e compatibilità 	



13

Programmi di sviluppo imprenditoriale

In concomitanza alla fase di sperimentazione e brevettazione della fibra biopolimerica a base di caseina e con l'intento di incentivare una strategia di sviluppo commerciale si è reso particolarmente produttivo la partecipazione diretta a concorsi, workshop e programmi di incubazione dell'idea. Queste esperienze sono state condotte e maturate nella massima cautela per la preservazione dei dati sensibili inerenti il progetto brevettuale evitando la promulgazione dei processi di produzione, onde evitare l'annullamento del requisito di novità del trovato, criterio essenziale per l'avvallimento positivo del deposito. I progetti di partecipazione temporaneamente portati a compimento durante il triennio del dottorato di ricerca sono:

- primo classificato al concorso di idee "The Royal Contest", promosso da Shell Italia E&P e Università degli Studi della Basilicata con il

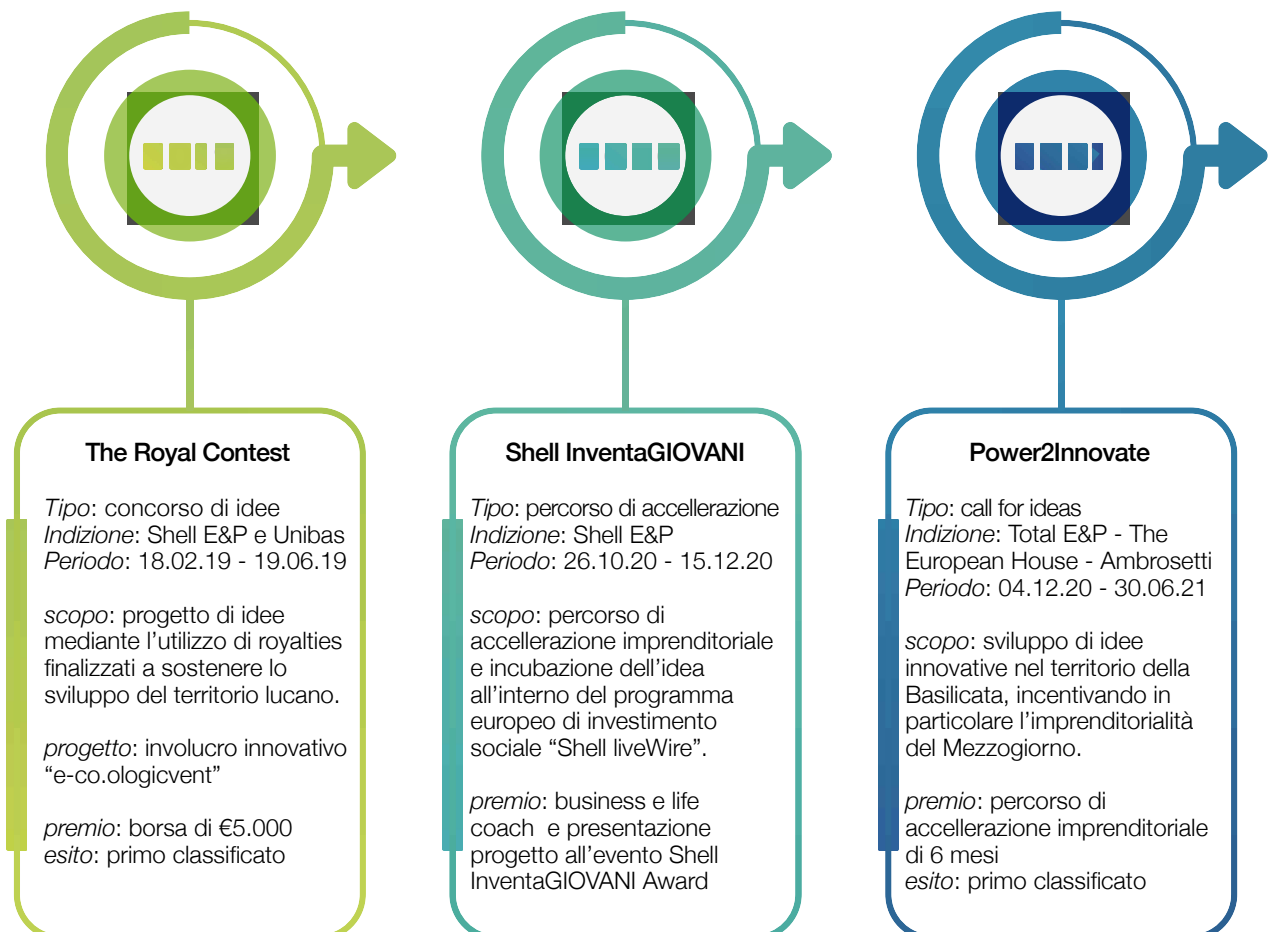
progetto "e-co.ologicvent" (18 Febbraio 2019 - 19 Giugno 2019);

- percorso di accelerazione imprenditoriale e incubazione dell'idea all'interno del programma europeo di investimento sociale "Shell liveWire - Shell inventaGIOVANI" (26 Ottobre 2020 - 15 Dicembre 2020);
- partecipazione alla call for ideas "Power2Innovate", promossa e sostenuta da Total E&P in collaborazione con The European House - Ambrosetti, con il progetto "e-co.In.su.lat" (4 Dicembre 2020 - 30 Giugno 2021).

I tre programmi hanno avuto come obiettivo generale la stesura di un progetto di business innovativo finalizzato a sostenere lo sviluppo del territorio lucano. In relazione al progredire della sperimentazione della fibra di caseina, attraverso tali programmi è stato possibile affinare step by step un processo di incubazione dell'idea e immaginare scenari di sviluppo futuro del progetto brevettato (fig.14).

13. Enti promotori dei programmi di sviluppo.

14. Timeline di partecipazione ai tre programmi di sviluppo dell'idea e del modello di business.



The Royal Contest

Impiegare una ipotetica disponibilità di 2 milioni di euro di royalties petrolifere per elaborare un progetto di sviluppo territoriale. Questa l'idea alla base della seconda edizione, dopo il successo del 2018, del "The Royal Contest", il concorso di idee promosso da Shell Italia E&P e realizzato in collaborazione con l'Università della Basilicata.

Primo del suo genere nel settore dell'*oil&gas* in Italia, il concorso aveva l'obiettivo di stimolare l'immaginazione dei giovani per trasformare una risorsa naturale (nella fattispecie, gli idrocarburi) in una leva di sviluppo territoriale mediante l'elaborazione di un progetto specifico. Tre gli ambiti tematici tra cui scegliere:

- *energia e ambiente;*
- *infrastrutture, turismo e mobilità;*
- *sviluppo sociale.*

L'ambito tematico scelto dal gruppo FivePoints (composto dal dottorando Donato Gallo, dall'architetto Marica Acito e dalle studentesse Unibas Cristina Acito, Mariapia Pace e Federica Iuliano) è quello relativo all'energia e ambiente.

L'idea ha il nome di *e-co.ologicvent*, un innovativo involucro edilizio realizzato con pannelli modulari, accessibili economicamente agli *stakeholders* coinvolti nel progetto e che dovranno occuparsi semplicemente di riciclare plastica e inventariarla mediante un applicativo digitale dedicato (fig.15).

Infatti, *e-co.ologicvent* è acronimo di

- "e-co" di "e-commerce" (la tipologia di vendita mediante app dedicata);
- "e-co.ologic" di "ecologico" (i materiali utilizzati, quali la plastica);
- "co.ol" di "cooling" (raffreddamento);
- "vent" di "vento" e di "venturi" (il sistema fisico di funzionamento del pannello termoisolante).

L'applicazione *e-co.ologicvent* sviluppata dall'omonima *Innovation Hub*, oltre a fornire un supporto



Il primo involucro edilizio realizzato con pannelli
e-co di "e-commerce"
e-co.ologic di "ecologico"
co.ol di "cooling" (raffreddamento)
vent di "vento" e di "venturi"

alla corretta raccolta della plastica, rappresenta l'elemento connettivo tra gli *stakeholders* e l'azienda innovativa. L'applicazione rappresenta il registro del quantitativo di plastica raccolta per ogni utenza, essa sia una famiglia, un condominio o un edificio pubblico. Raggiunto il quantitativo di plastica raccolta prefissato dall'applicazione, l'utente pubblico o privato, riceve il pannello *e-co.ologicvent* utilizzato per isolare termicamente la propria abitazione o luogo di lavoro.

Gli obiettivi derivanti dall'utilizzazione del pannello *e-co.ologicvent* sono:

- *sensibilizzare gli utenti nella raccolta della plastica mediante la digitalizzazione;*
- *isolare termicamente il patrimonio edilizio nuovo ed esistente;*
- *diminuire i consumi energetici degli edifici per il raffrescamento e il riscaldamento;*
- *ridurre le emissioni di CO₂ nel settore delle costruzioni, tra i maggiori responsabili delle emissioni di CO₂ globali causati da diversi processi, quali l'estrazione e la produzione dei materiali edili, la costruzione degli edifici, la gestione degli stessi e lo smaltimento a fine del ciclo di vita di un organismo edilizio;*
- *migliorare il benessere indoor di abitazioni ed edifici pubblici.*

15. Logo dell'innovativo involucro "e-co.ologicvent".

Il pannello smart è l'unione di tre materiali da riciclo, la plastica (raccolta, sminuzzata e trasformata in materiale termoplastico per creare gli elementi a 'imbuto'), il pannello in lana di caseina (ottenuto dal processo di caseificazione della caseina prodotta in lana di latte e impiegata per l'isolamento termico della casa) e le lastre di gesso (elementi che conferiscono al pannello la resistenza meccanica necessaria alla posa in opera). Il pannello, quindi, ha un contenuto del 100% di materia riciclata e del 100% di materia riciclabile alla fine del ciclo di vita del pannello (fig.16).

Il funzionamento del pannello si basa sul principio fisico definito "effetto Venturi", ovvero un graduale abbassamento di temperatura dell'aria che

percorre un elemento 'a imbuto', grazie alla differenza di pressione. Il sistema di ventilazione innescato dall'effetto venturi e dall'effetto cammino, a seconda della stagione (estiva o invernale), varierà il gradiente di temperatura dell'aria esterna (calda o fredda), migliorando il benessere *indoor* e riducendo sensibilmente l'utilizzazione di energia per riscaldare o raffreddare gli ambienti interni con una conseguente riduzione di CO₂.

I segmenti di mercato dove l'involucro edilizio e-co.ologicvent trova applicazione sono:

- *riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente;*
- *realizzazione di edifici NZEB - Nearly Zero Energy Building;*
- *up-cycling e C&DW.*

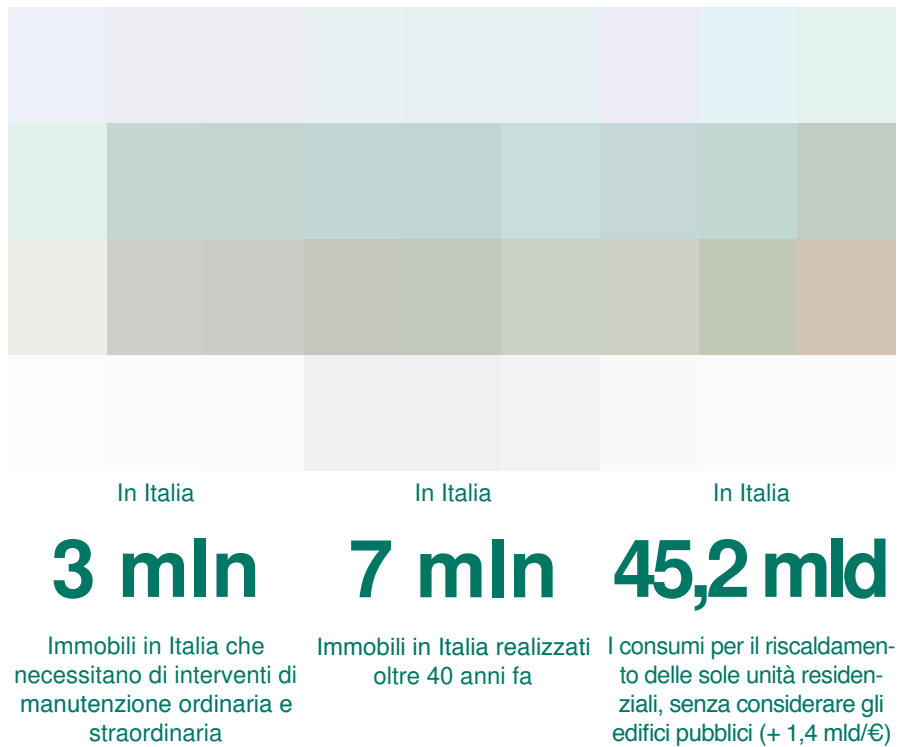
16. Rappresentazione grafica dell'idea progettuale dell'involucro "e-co.ologicvent".



Il pannello smart e-co.ologicvent si inserisce nel mercato degli involucri destinati alla riqualificazione energetica, processo catalizzato dall'incremento della vendita di tali sistemi diffusi grazie a specifici riferimenti normativi, a protocolli di sostenibilità ambientale (ITACA, LEED, CasaClima) e ai provvedimenti di defiscalizzazione sul recupero energetico e sull'efficientamento energetico.

Solo in Italia, secondo alcuni dati diffusi dal CRESME, vi sono quasi tre milioni di immobili che necessitano di interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, di efficientamento energetico-prestazionale e di miglioramento dei requisiti di comfort e benessere dell'ambiente interno. Sette milioni, invece, sono gli edifici in Italia realizzati oltre 40 anni fa con sistemi costruttivi obsoleti. 45,2 miliardi sono i consumi annuali per il riscaldamento e l'elettricità delle sole unità residenziali, senza considerare gli edifici pubblici (+1,4 mld/€) (fig.17).

I dati relativi l'inquinamento della plastica in Italia, lasciano trapelare una importante problematica da affrontare, anche in riferimento agli obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030 (fig.18). Nella figura 18 è possibile constatare come un cittadino italiano produce in me-



dia 1 kg di plastica in soli 5 giorni e solo una piccola parte è smaltita in maniera adeguata. Il business della Innovation Hub e-co.ologicvent nasce dalla scoperta del problema dell'utilizzo della plastica (*problem finding*), si sviluppa con l'inquadramento del problema (*problem shaping*) e si delinea con la risoluzione del problema attraverso l'ideazione del pannello smart (*problem solving*).

17. Elaborazione grafica in relazione alla domanda delle facciate continue (milioni di euro), in UNICMI, *Rapporto sul mercato italiano dell'involucro edilizio*, 2018.
18. Elaborazione grafica dell'analisi dettagliata del destino di 1kg di plastica in diversi paesi. Estrapolazione basata sui dati LDPE

17



18

Partendo da una iniziale cifra di investimento di 2 milioni di euro proveniente da *royalties* petrolifere le fasi ideative del progetto si sviluppano in:

- *Step 1 - Download e registrazione dell'app e-co.ologicvent*: l'utente scarica l'applicazione e-co.ologicvent e registra il proprio profilo. Il profilo può essere a carattere familiare (ovvero utilizzabile da tutti i componenti di un nucleo familiare), oppure condiviso (utilizzabile da tutti i membri di un condominio o edificio pubblico).
- *Step 2 - Raccolta della plastica*: l'utente, la famiglia, i condomini o gli utenti di un edificio pubblico raccolgono la plastica. Non importa se essa sia raccolta in un parco o provenga dagli imballaggi, l'importante che sia pulita e riciclabile;
- *Step 3 - Ritiro della plastica*: un operatore ecologico facente parte della Innovation Hub e-co.ologicvent, a cadenza temporale raccoglie la plastica prodotta dai diversi utenti. Il quantitativo (espresso in kg) viene registrato nell'applicazione fino a raggiungere un determinato limite (con variabilità crescente se si tratta di un solo utente o di un numero maggiore di utenti).
- *Step 4 - Produzione del pannello*: la plastica ritirata gratuitamente dall'operatore ecologico, diviene materia prima per la produzione di uno dei componenti ('imbuto') del pannello e come elemento di termocoazione della fibra di caseina. I costi di produzione dell'azienda, saranno, quindi, particolarmente contenuti in quanto la materia prima ha un costo pari a zero. La plastica viene sminuzzata e utilizzata per creare un profilo termoplastico (imbuto); la caseina (anch'essa prodotto di scarto) viene reimmessa nel ciclo per la produzione di fibra di caseina, utilizzata come isolante termico; le lastre di gesso, invece, hanno un costo esiguo e possono essere riciclate molte volte.
- *Step 5 - Premialità*: l'utente, la famiglia o un edificio pubblico che avranno raggiunto il limite di plastica raccolta previsto dall'applicazione, ricevono il pannello smart a un prezzo minore e più accessibile rispetto alla media di mercato. Esso, servirà all'azienda solo per ammortare i costi di produzione e manodopera. Il guadagno aziendale, invece, sarà ottenibile come:
 - aliquota percentuale di risparmio in bolletta di ciascun utente;
 - incentivi, fondi nazionali ed europei e premialità per aziende vocate alla sostenibilità e al riciclo;
 - pubblicità e-commerce nell'applicazione;
 - mercato degli involucri per nuova edilizia ed edifici NZEB (il pannello, venduto all'azienda costruttrice, in questo caso ha un prezzo in linea con i prodotti simili);
 - certificati bianchi.
- *Step 6 - Applicazione*: ottenuto l'involucro, ciascun utente potrà tenere sotto controllo il rendimento dell'involucro dal punto di vista del consumo energetico, del tasso di umidità interna ed esterna, della ventilazione, delle emissioni di CO2 e di risparmio economico. I dati saranno trasmessi alla Innovation Hub per sviluppare una rete telematica di scambio ed elaborazione dati, utili per creare campagne di *digital marketing* e creare offerte del prodotto del *cliente target* (dal più sensibile al meno sensibile). L'applicazione, inoltre, incentiva anche i possessori dell'involucro e-co.ologicvent a continuare con la raccolta della plastica, ottenendo una diminuzione della tassa comunale dei rifiuti, agevolazioni fiscali e premialità, contribuendo a fornire plastica esuberante destinata a mercati indirizzati alla creazione di altri eco-prodotti riciclati.

Tutte le fasi elencate sono esplicitate nella pagina seguente in cui si riportano le tavole grafiche presentate durante la cerimonia di premiazione avvenuta il 19 Giugno 2019 presso il Campus di Macchia Romana, Potenza da parte dell'Amministratore Delegato Shell E&P Marco Brun (figg.19-21).





20. Slide esplicative delle fasi dell'idea di business dell'innovativo involucro "e.co. ologicvent, presentate durante la cerimonia di premiazione avvenuta il 19 Giugno 2019 presso il Campus di Macchia Romana, Potenza

La convenienza economica per l'utente di dotarsi dell'involucro e-co.ologicvent afferisce all'accessibilità economica dei pannelli notevolmente inferiore rispetto alla media di mercato (circa 50,00€ a metro quadro) coadiuvato dal risparmio in bolletta e dall'aumento del valore di mercato di ciascun immobile (privato o pubblico), risultando, quindi, un investimento particolarmente conveniente nel breve e nel lungo periodo.

Il *Business Plan* del progetto aziendale, invece, vede il 'pareggio' della manodopera e del costo di produzione del pannello e-co.ologicvent con l'acquisto (da parte dell'utente) dello stesso.

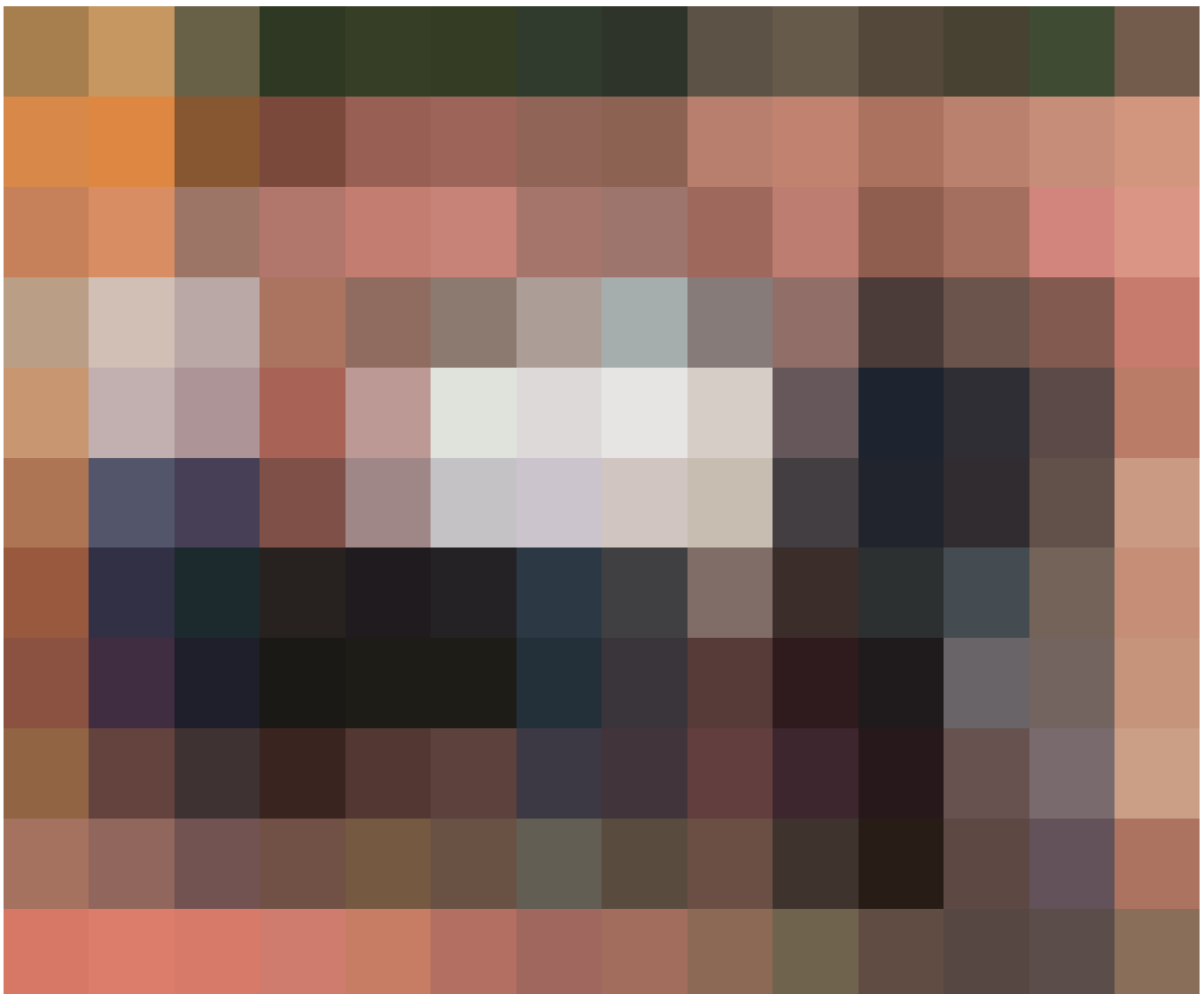
Attraverso il calcolo del *Valore Attuale Netto* (VAN) e del *Ritorno sugli Investimenti* (ROI) è atteso come l'azien-

da possa trarre benefici attraverso:

- *l'aliquota percentuale di risparmio in bolletta per ciascun utente;*
- *incentivazioni statali ed europee;*
- *campagna di digital marketing;*
- *mercato degli involucri per nuova edilizia che consta, negli ultimi anni, un aumento sostanziale del numero di permessi a costruire (+40%).*

Le KPI - Key Performance Indicators del processo aziendale, invece, comporterà un incremento occupazionale, dello sviluppo e della ricerca, un incremento del valore di mercato degli immobili con l'aumento della certificazione energetica, riduzione dei consumi energetici e di CO₂ immessa nell'ambiente e la creazione di un nuovo segmento di mercato del *digital marketing* degli involucri edilizi.

21. Cerimonia di premiazione da parte dell'Amministratore Delegato di Shell E&P Marco Brun del gruppo FivePoints (composto da Marica Acito, Cristina Acito, Mariapia Pace, Federica Iuliano) per il progetto dell'innovativo involucro "e-co.ologicvent", 19 Giugno 2019, Campus Macchia Romana - Potenza.



Shell inventaGIOVANI

La vittoria del “The Royal Contest” ha permesso attraverso il percorso Shell inventaGIOVANI di sviluppare l’idea “e.co.ologicvent” in un programma di investimento sociale, economico ed imprenditoriale. Shell InventaGIOVANI, parte del progetto *Shell liveWIRE* è un programma promosso da *Royal Dutch Shell* dal 1982 con l’obiettivo di incoraggiare ed aiutare i giovani di età compresa tra i 16 ed i 25 anni a sviluppare nuovi progetti per l’avvio di attività imprenditoriali.

Il progetto *LiveWIRE Basilicata* nasce dalla volontà di Shell Italia E&P di attuare un programma di investimento sociale nella regione Basilicata, dove Shell è presente, come partner, in due progetti petroliferi. Al fine di mostrare concretamente il proprio interesse per la regione, Shell Italia E&P mette a disposizione della popolazione locale l’esperienza ventennale di *Shell-LiveWIRE International* nel supportare l’attivazione e la crescita di piccoli progetti imprenditoriali da parte di giovani imprenditori in tutto il mondo. Il programma ha un respiro internazionale e una struttura predefinita ma viene adattato alle esigenze e alle caratteristiche specifiche del luogo in cui è svolto. Dal 2020, Shell liveWIRE viene implementato a Taranto e provincia.

La partecipazione al programma è avvenuta nel periodo compreso tra il 26 Ottobre 2020 ed il 15 Dicembre 2020, in cui sono state intraprese attività formative inerenti:

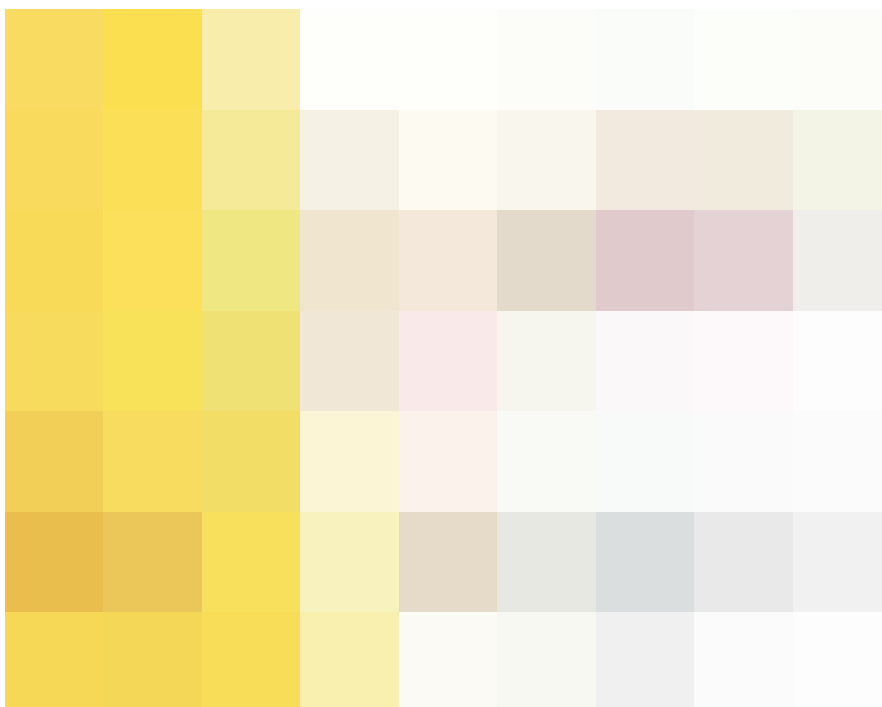
- *introduzione Shell InventaGIOVANI e Business Model Canvas;*
- *Business skills;*
- *Demo&pitch practice coaching.*

Gli obiettivi principali del programma sono:

- *creare consapevolezza e supportare i giovani che decidono di intraprendere una carriera imprenditoriale;*
- *informare e fornire le competenze necessarie per gestire un’attività imprenditoriale;*
- *seguire e supportare le fasi iniziali, più critiche, successive all’avvio delle attività;*
- *implementare in Italia un progetto di respiro globale che Shell ha promosso in 18 Paesi;*
- *inserire gli imprenditori della Basilicata e di Taranto e provincia in una rete di connessione locale e internazionale con giovani imprenditori che attraverso LiveWIRE si sono lanciati nel mondo del business.*

Nello specifico la partecipazione al programma ha permesso di acquisire delle competenze per la stesura di un valido piano d’impresa per la prototipazione e commercializzazione del pannello termoisolante in fibra biopolimerica a base di caseina e di essere guidati attraverso una attività di business e *life coach* svolto da consulenti specializzati avente ad oggetto lo sviluppo del modello di business e del *pitch* da presentare all’*Investors Day* e all’evento *Shell InventaGIOVANI Award*.

22. Programma Shell InventaGIOVANI, promosso da Shell E&P con il patrocinio della Regione Basilicata e Confindustria.



Power2Innovate

Il progetto dell'innovativo involucro "e-co.ologicvent" nato con il concorso di idee "The Royal Contest" e il propedeutico sviluppo dello stesso all'interno del programma Shell inventaGIOVANI e della ricerca di dottorato ha favorito un primo approccio verso lo sviluppo imprenditoriale dell'idea mediante la partecipazione e premiazione alla call for ideas "Power2Innovate".

La call è una iniziativa promossa e sostenuta da Total E&P in collaborazione con The European House – Ambrosetti, rivolta a startup e aspiranti imprenditori del Mezzogiorno con idee innovative e ad alto potenziale, per lo sviluppo di soluzioni sostenibili in Basilicata nelle aree in linea con le competenze strategiche della Regione: *Industria High Tech, AgriFood, Cultura e Turismo*.

Il progetto imprenditoriale presentato all'interno dell'indirizzo *High Tech*, prende il nome di "e-co.In.su.lat - Isolamento sostenibile e-commerce con fibra di latte" e rappresenta l'elemento cardine di una proposta di piano ad ampio respiro per lo sviluppo energetico del patrimonio edilizio in Basilicata e prototipazione di innovativi materiali biopolimerici per architettura&industria 4.0.

E-co.In.su.lat, quindi, rappresenta un piano di sviluppo energetico per la riqualificazione del patrimonio edilizio della Basilicata basato sulla commercializzazione online di un innovativo pannello smart biopolimerico in fibra di caseina e plastica, ottenuto dal riciclo di due materie prime di scarto presenti nella regione e in molti territori europei: la caseina e la plastica.

I bisogni a cui risponde l'idea sono:

- *creazione di una azienda virtuale vocata alla sperimentazione e prototipazione di nuovi materiali biopolimerici di origine naturale con sede in Basilicata, contesto ideale per la sua biodiversità, la sua ubicazione geografica, per le sue caratteristiche geomorfologi-*

che e per la possibilità di sperimentazione in scala ridotta per la definizione di modelli globali da applicarsi nell'architettura e nell'industria 4.0.;

- *sensibilizzare la raccolta di materie plastiche. Verso il primo Hub regionale per la produzione di bioplastiche;*
- *isolare termicamente il patrimonio edilizio storico e contemporaneo;*
- *diminuire i consumi energetici del patrimonio edilizio;*
- *ridurre le emissioni di CO₂ nel settore delle costruzioni;*
- *migliorare il benessere indoor delle abitazioni;*
- *digitalizzazione del mercato degli isolanti termici a matrice naturale attraverso la creazione di una piattaforma digitale dedicata;*
- *incentivare piccole realtà imprenditoriali della regione per la produzione di materiali green da applicarsi in settori diversificati della Regione (agricoltura, industria, artigianato). Verso modelli green di economia circolare (Green Deal Economy);*
- *digital transformation e strategie di sviluppo territoriale della Basilicata.*

L'impresa e-co.In.su.lat, quindi, oltre alla commercializzazione del pannello in fibra di caseina, si inserirebbe nel crescente settore dei prodotti biopolimerici di origine naturale per la creazione di innovativi materiali ottenuti da materie di scarto o di derivazione naturale.

Tale processo troverebbe nella Regione Basilicata, uno sviluppo particolarmente fertile, grazie alla variegata biodiversità e geomorfologia territoriale e grazie alla presenza sinergica di settori vocati all'agricoltura, all'industria ed all'artigianato. In tal modo la Regione si candiderebbe come crocevia strategico per la distribuzione commerciale dei nuovi materiali green, attraverso uno stretto rapporto commerciale con le regioni del Mezzogiorno, in modo particolare con la Puglia, data l'estrema vicinanza con hub commerciali quali l'area portuale di Taranto e l'aeroporto di Bari (fig.23).

Involucro "E-co. In.su.lat - Isolamento sostenibile e-commerce con fibra di latte" come proposta di un piano per lo sviluppo energetico del patrimonio edilizio in Basilicata e prototipazione di innovativi materiali biopolimerici per architettura & industria 4.0.

6.3. Nuovi orizzonti: il mercato dei materiali sperimentali a 'complessità controllata'

La fibra biopolimerica di caseina come materiale a 'complessità controllata'

Nel passato era il materiale a suggerire il potenziale impiego rispetto al progetto che come definito da Ezio Manzini definisce i materiali arcaici «*materiali a complessità subita*»¹⁹, sottolineando l'incapacità da parte dell'uomo di modificare a proprio vantaggio «*la loro complessità prestazionale*»²⁰.

Con le attuali possibilità offerte dalla evoluzione tecnologica e di produzione, i nuovi materiali «*hanno sconvolto i tradizionali paradigmi progettuali e rivoluzionato i vecchi rapporti di prestazione tra resistenza, leggerezza, densità e trasparenza, durezza e flessibilità*»²¹ per giungere attraverso la «*complessità controllata*»²², alla gestione ed alla modificazione delle proprietà e delle anisotropie di un materiale ottenendo un miglioramento delle prestazioni di base e l'acquisizione di nuove proprietà²³.

Il trasferimento delle logiche della natura è ancora più esplicito nei biopolimeri che sono materiali plastici prodotti da materie prime naturali, ad esempio cereali o zucchero o, come nel presente caso, dalla caseina. Essi hanno quindi un processo di generazione industriale mentre il processo di dismissione è organico, quindi possono definirsi a ciclo chiuso.

Tale processo rappresenta un requisito molto auspicato poiché contribuisce a minimizzare l'impatto dei prodotti sugli ecosistemi riducendo il carico di rifiuti, soprattutto nel settore delle costruzioni (definiti C&DW - *Construction & Demolition Waste*) che costituiscono il più grande flusso di rifiuti nell'Unione Europea.

È per questo motivo che la progettazione delle componenti edilizie e delle soluzioni tecniche si indirizza sempre più verso l'ideazione di elementi assemblati 'a secco' scomponibili o monomaterici assicurando la possibilità di un reale riutilizzo o il riciclo di alcune parti al termine del periodo di vita utile dell'elemento, che da rifiuto diventa risorsa (fig.24).

24. Processo produttivo-biologico e processo costruttivo-dismissivo del pannello termoisolante in fibra biopolimerica a base di caseina.



Progettazione eco-orientata e strategie per la produzione di materiali ecosostenibili

Oggi il problema dell'eco-sostenibilità di una soluzione tecnica riguarda tutto il suo ciclo di vita dal prelievo della materia prima, al processo di produzione, alla messa in opera, al periodo di utilizzo, fino alla sua dismissione. Attraverso la valutazione LCA- *Life Cycle Assessment* (UNI EN ISO 14040:2006) e lo sviluppo applicativo della strategia LCT - *Life Cycle Thinking* è possibile ottenere un bilancio complessivo degli impatti per indirizzare alla scelta appropriata del materiale nel progetto d'architettura, che, inoltre, deve essere ponderata rispetto alle effettive esigenze d'uso.

Al fine di una progettazione *eco-orientata* è necessario che l'impronta ecologica²⁴ consideri non solo l'impatto in termini territoriali, ma il consumo di risorse naturali ed energetiche necessarie alla produzione, trasporto, demolizione e smaltimento di tutti i prodotti indispensabili in un intervento di trasformazione.

Questo processo dovrà avere la mi-

nima estensione possibile per limitare l'alterazione degli ecosistemi ed - allo stesso tempo - integrarsi con i valori culturali del luogo sia materiali che immateriali ed incentivare processi sociali positivi in un'ottica di sviluppo sostenibile.

Con lo sviluppo della fibra biopolimerica a base di caseina è possibile dedurre come le tecniche industriali innovative potrebbero disporre oggi di impianti sempre più flessibili e sostenibili che consentono cicli di produzione brevi (lean production) riducendo al minimo l'apporto di materiali ed energia durante le fasi di produzione e limitare gli impatti sull'ecosistema.

Inoltre, la sperimentazione della fibra di caseina, vuole dimostrare come l'uso ciclico di materiali di scarto e di demolizione in edilizia non prescinde, però, dall'impiego di risorse provenienti da altri settori produttivi (in questo caso dall'industria casearia). Tale aspetto si tramuta in un potenziale sviluppo di prodotti edilizi innovativi provenienti da lavorazioni industriali di natura diversa costituendo, quindi, un sistema di scambio di risorse configurato secondo una fitta rete di interrelazioni tra architettura, fonti e ricettori di materiali.

La ricerca, dunque, si conclude proponendo alcuni dei radicali cambiamenti dei modelli di consumo per la riduzione degli sprechi di materia ed energia (*up-cycling* e *superuse*) nella produzione dei beni e nella riduzione dei rifiuti (soprattutto quelli derivanti dal settore delle costruzioni) e delle emissioni nell'ambiente.

Affine a questa ricerca oltre all'aver indagato e sperimentato un materiale prodotto a partire da uno scarto (caseina), è quello di fornire un presupposto per cui diviene essenziale «eliminare il concetto stesso di rifiuto partendo dalla progettazione»²⁵, impiegando strumenti innovativi di digitalizzazione, sostenibilità, interoperabilità, costruzione 4.0. e *Building Information Modeling* (fig.25).

25. Strumenti innovativi per la progettazione integrata dell'intero ciclo di vita di un progetto.



Nuovi orizzonti: up-cycling e superuse

Immaginare una architettura sostenibile oggi, significa saper utilizzare ciò che già esiste per dare loro nuova vita. Riciclare materiali è ormai prassi consolidata in molti settori che spaziano dal design all'architettura; un fenomeno che prende il nome di *up-cycling*²⁶, termine coniato nel 1994 da Thornton Kay nella rivista "Salvo. A monthly look at architectural antiques, reclaimed building materials & Allied Topics" proprio per descrivere il riuso di materiali di scarto provenienti principalmente dall'edilizia.

L'up-cycling contribuisce a ridurre non solo le quantità di energia richiesta per la produzione di nuovi materiali, ma a ridurre i costi (ambientali e monetari) delle materie prime, riducendo notevolmente l'impatto ambientale.

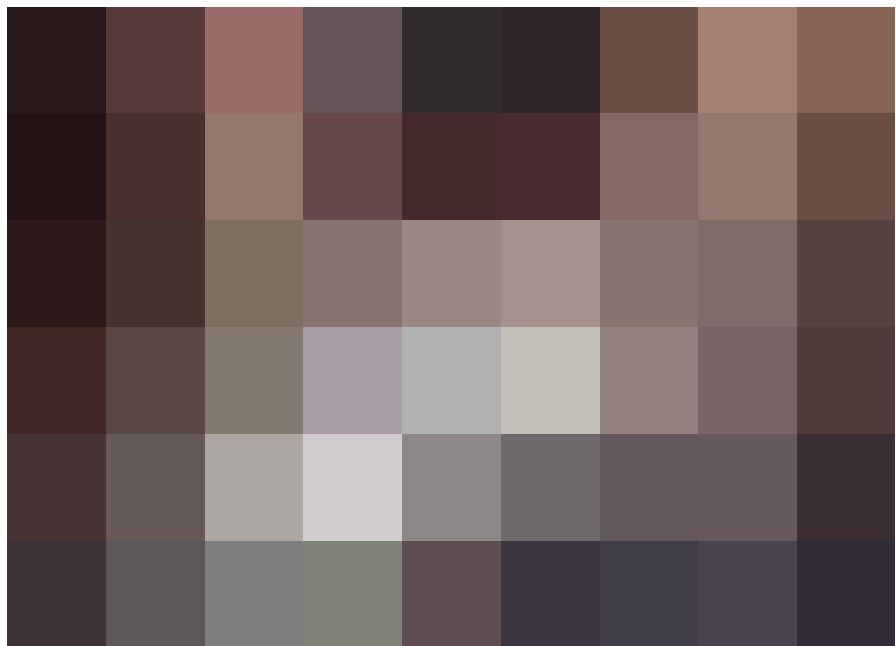
La strategia dell'up-cycling attribuisce, dunque, un maggior valore a dei componenti o materiali di scarto mediante un approccio creativo.

Progettare l'up-cycling in architettura significa mettere in pratica l'innovazione tecnologica tramite la reinterpretazione degli elementi esistenti²⁷.

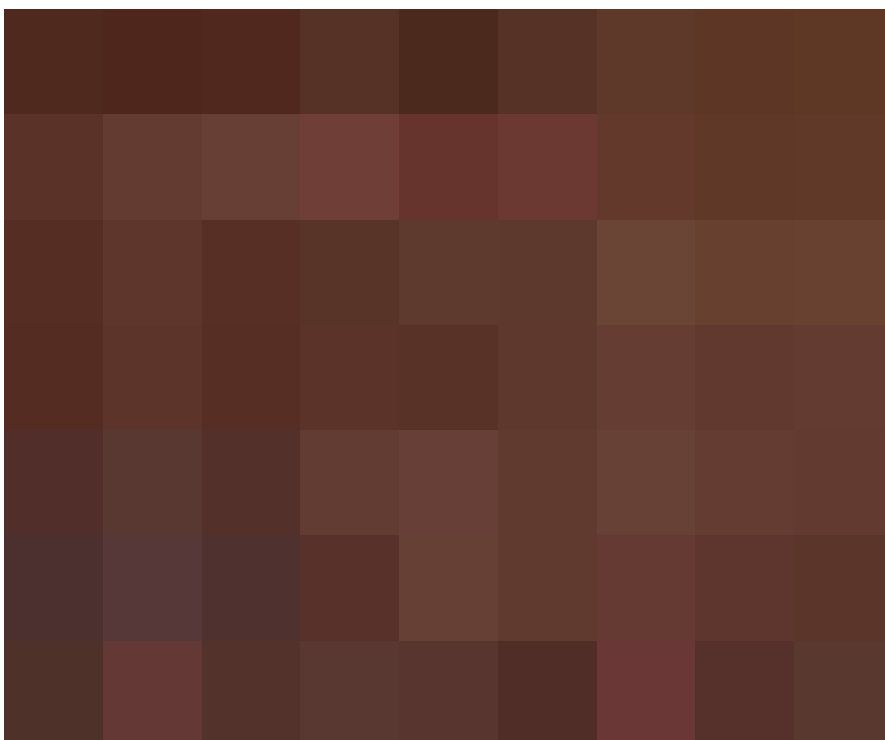
Emblematico è in tal senso l'intervento di recupero "8B Nave" realizzato nel 2009 a Madrid da Arturo Franco Office Architecture. Oggetto d'intervento è un magazzino di un ex mattatoio realizzato nel 1907, in cui le tegole marsigliesi rimosse dalla copertura sono state riutilizzate per la realizzazione di partizioni interne, rivestimenti murari e contro-pareti mediante una tecnica singolare che prevede la sovrapposizione alternata con l'impiego di malta solo in alcuni ricorsi (figg.26-27).

26. Progetto di recupero di un magazzino di un ex mattatoio a Madrid (Spagna), opera di Arturo Office Architecture, 2009, © Carlos Fernández Piñar.

27. Particolare delle partizioni interne realizzate con la sovrapposizione di tegole marsigliesi recuperate dalla demolizione della copertura dell'ex mattatoio, © Carlos Fernández Piñar.



27

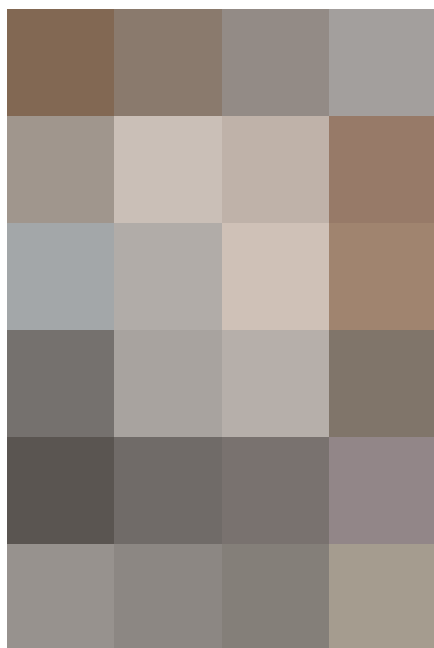


26

"Il riciclo io lo chiamo down-cycling. Quello che ci serve è l'up-cycling, grazie al quale ai vecchi prodotti viene dato un valore maggiore, e non minore".

- Thornton Kay

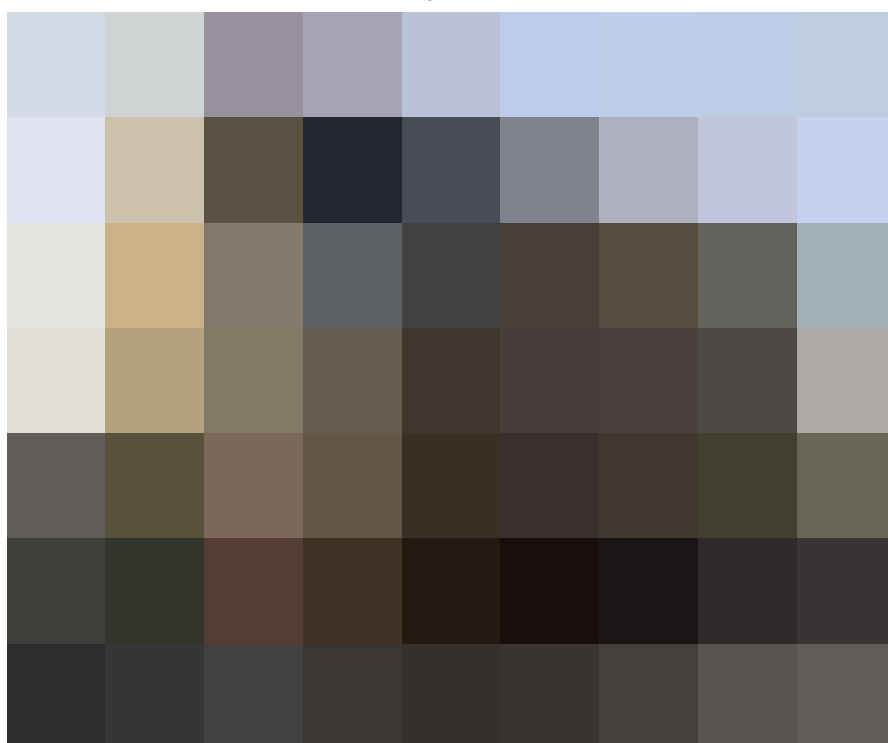
28. Bobina per l'avvolgimento di cavi industriali reimpiegata per ottenere i listelli lignei che compongono il rivestimento della facciata di Villa Welpeloo di Rotterdam, progetto dello studio olandese Superuse Studios, 2009, © Allard van der Hoek.
29. Particolare della facciata, 2009, © Allard van der Hoek.
30. Particolare delle lampade la cui struttura è ottenuta dai raggi di alcuni ombrelli, 2009, © Allard van der Hoek.



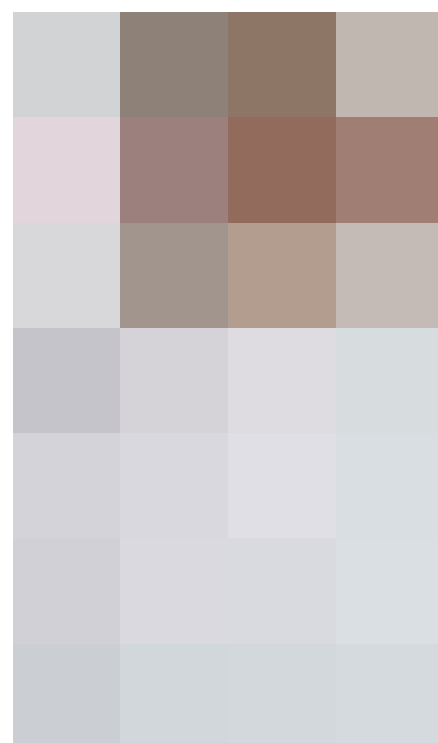
28

Il risultato architettonico ha consentito un doppio beneficio: da una parte, la conservazione dell'energia per inerzia termica incorporata nella massa dei tegumenti di laterizio; dall'altra, le emissioni di CO₂ limitate grazie al reimpiego delle tegole storiche anziché produrle di nuove, la cui produzione avrebbe richiesto un ingente consumo di energia termica. L'uso ciclico di materiali di scarto e di demolizione in edilizia non prescinde, però, dall'impiego di risorse provenienti da altri settori produttivi. Tale aspetto si tramuta in un potenziale sviluppo di prodotti edilizi innovativi provenienti da lavorazioni industriali di natura diversa costituendo, quindi, un sistema di scambio di risorse configurato secondo una fitta rete di interrelazioni tra architettura, fonti e ricettori di materiali, molti dei quali derivanti da un processo di recupero "EoW - End-of-Waste"²⁸, ovvero quando un rifiuto cessa di essere tale quando è in grado di soddisfare criteri specifici per tramutarsi in un prodotto che può essere inserito in nuovi processi produttivi rispettando criteri dettagliati in grado di assicurare un elevato livello di protezione dell'ambiente, della salute umana e agevolando l'utilizzazione accorta e razionale delle risorse umane. In tal senso sono interessanti le ri-

cerche pionieristiche condotte dallo studio olandese *Superuse Studios*, la prima realtà europea ad occuparsi di up-cycling in architettura ed edilizia, sviluppando la piattaforma virtuale *open source Superuse* al fine di promuovere la progettazione con materiali e componenti di recupero. Lo studio è tra i primi ad aver anche realizzato progetti di architettura impiegando materiali di scarto. Un esempio significativo di giusto compromesso tra architettura e utilizzo di materiali di scarto è il progetto di *Villa Welpeloo* a Rotterdam, la cui peculiarità dell'intervento è l'utilizzo per il 60% di materiali di scarto riciclati e reperiti nel raggio di 15 km dal sito. Interessante è il rivestimento della facciata realizzata impiegando i listelli ricavati da seicento bobine per l'avvolgimento di cavi industriali e della relativa struttura realizzata con elementi di acciaio che precedentemente componevano una macchina per la produzione tessile (figg.28-29). Anche l'isolamento termico è assicurato riutilizzando pannelli di polistirene o - ancora - il sistema di illuminazione i cui corpi illuminanti delle lampade da parete sono stati ricavati dai raggi metallici di alcuni ombrelli (fig.30).



29



30

Sempre del Superuse studios è il progetto *Dasparkhotel* realizzato a Linz (Austria) nel 2004, in cui vengono riutilizzati dei tubi prefabbricati in calcestruzzo armato - precedentemente utilizzati come collettori dell'acquedotto - per creare singole unità abitative. L'azienda produttrice li ha forniti gratuitamente assicurando che lo spessore di 20 cm dell'involucro in calcestruzzo del collettore fornisce da solo una sufficiente inerzia termica, non richiedendo quindi ulteriori strati isolanti (fig.31).

C&DW - Construction & Demolition Waste

Al vaglio della transizione ecologica e dell'adozione di modelli di economia circolare, la pratica di gestione degli scarti - soprattutto nel settore delle costruzioni - dovrà essere ancora più ambizioso. I rifiuti da costruzione e demolizione (C&DW - *Construction and Demolition Waste*) costituiscono il più grande flusso di rifiuti nell'UE (ben il 36%, con 374 milioni di tonnellate nel 2016,



31. Tubi prefabbricati in calcestruzzo armato riutilizzati come singole unità abitative del *Dasparkhotel* di Linz (Austria), 2004, © Das park hotel.

32. Parco *Wikado Playground*, progetto urbano a Rotterdam di Superuse studios in cui sono riutilizzate le pale delle turbine eoliche dismesse, 2009, © Denis Guzzo.

31

Wikado Playground, infine, è un progetto urbano a Rotterdam in cui i Superuse studios riutilizza le pale delle turbine eoliche dismesse, un rifiuto critico soprattutto nei Paesi Bassi, sia per la breve vita utile delle turbine (10-25 anni) sia perché realizzate in materiali difficilmente riciclabili ma ad alte prestazioni (fibre di vetro o di carbonio), soggette per lo più ad incenerimento (fig.32).

Sulla base di queste esperienze si esprime una riflessione sulla valenza culturale dei materiali riciclati ed in modo particolare sulla assoluta necessità di una profonda innovazione culturale e tecnologica nella direzione di approcci metodologicamente circolari e olistici di up-cycling, superuse, *cradle to cradle*²⁹, etc.



32

escluso il suolo scavato di cui solo in Italia sono 39 milioni di tonnellate³⁰) (fig.33), con quantità relativamente stabili prodotte nel tempo e tassi di recupero elevati. Sebbene questo possa suggerire che il settore delle costruzioni sia altamente circolare, il controllo delle pratiche di gestione dei rifiuti rivela che il recupero di C&DW è in gran parte basato su operazioni di riempimento e recupero di basso grado, come l'utilizzo di aggregati riciclati nelle sottofondi stradali. I flussi di materiali di demolizione e ristrutturazione, infatti, non sono adatti al riutilizzo o al riciclaggio a causa delle pratiche edilizie del passato e della mancanza di generazione di materiali di elevata purezza durante la demolizione. Ciò ostacola la piena attuazione degli obiettivi dell'economia circola-

re. Pertanto, il valore intrinseco dei materiali che compongono C&DW viene eroso, gli aspetti qualitativi del riciclaggio non vengono affrontati sistematicamente e il riciclaggio non viene eseguito in circuiti chiusi.

La Direttiva 2008/98/CE ha fissato che gli Stati membri devono adottare misure per promuovere la demolizione selettiva, promuovendo: la rimozione e dismissione sicura delle sostanze pericolose; favorire il riutilizzo e il riciclo di materiali di scarto di alta qualità mediante una demolizione selettiva e garantire l'istituzione di sistemi di smistamento per i rifiuti da costruzione e demolizione almeno per i materiali come il legno, le frazioni minerali (cemento, mattoni, ceramiche, elementi lapidei, etc.), i metalli, il vetro, la plastica.

33. C&DW - Construction & Demolition Waste (rifiuti da costruzione e demolizione) generati nell'Unione Europea, in AMCS, *Overcoming hurdles in the construction & demolition waste industry*, 2019.

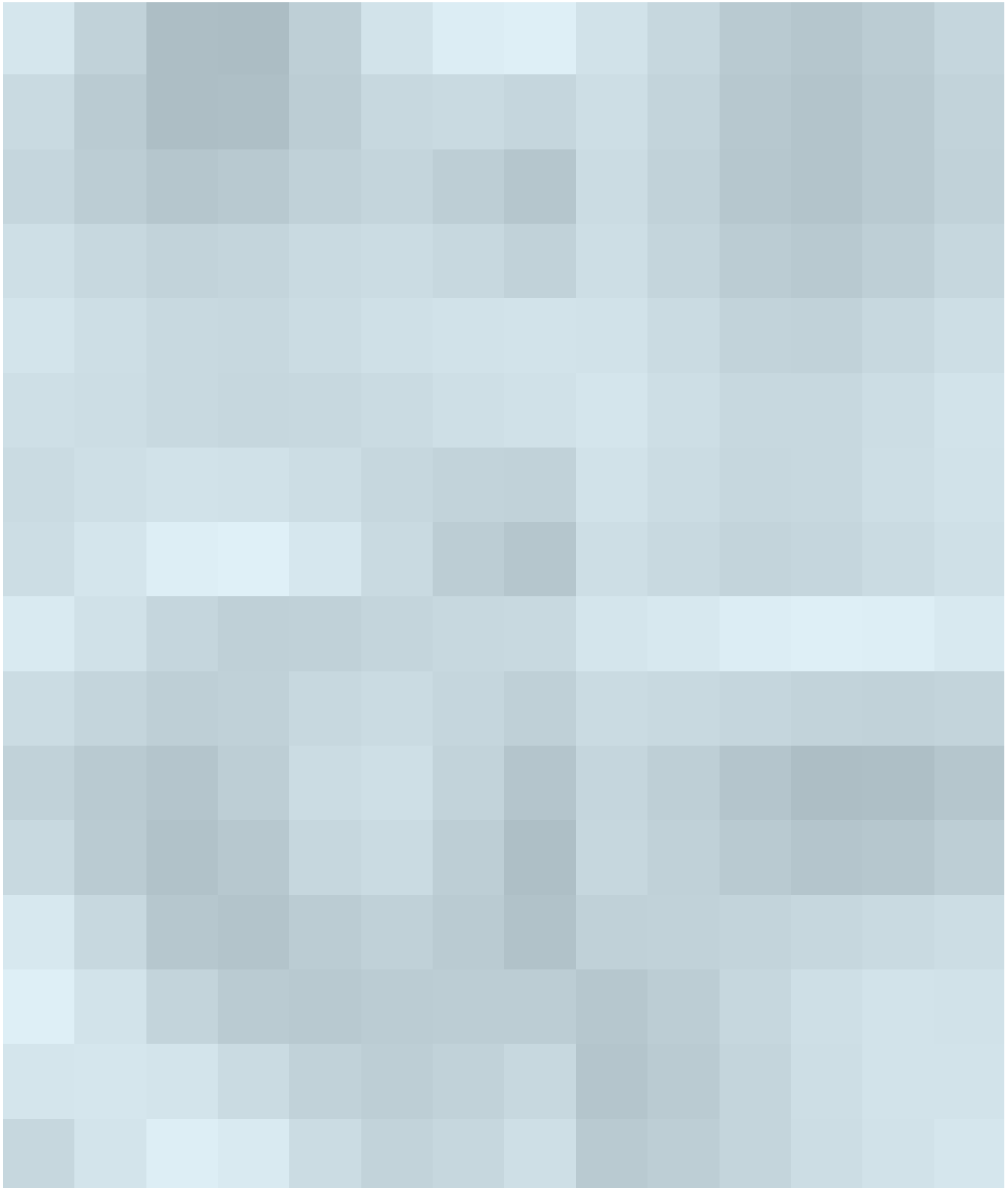


Purtroppo, secondo l'Unione Europea, i problemi che impediscono il riutilizzo ed il riciclaggio di scarti di demolizione e ricostruzione sono la mancanza di fiducia nella qualità dei rifiuti recuperati e nella gestione dei rifiuti, in modo particolare nell'insorgere di potenziali rischi per la salute

dei lavoratori che manipolano i materiali di riciclo. A tal proposito è stato emanato il protocollo di gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione dell'UE come linea guida per aiutare le imprese, le autorità pubbliche e gli enti di certificazione a gestire correttamente i C&DW (fig.34).

34. Schema di sintesi della gestione dei rifiuti derivanti dal processo di demolizione e costruzione in edilizia.

35. Monocoque, involucro strutturale organico a condizioni di carico multiscalare © Neri Oxman and The Mediated Matter Group.



Esempi di materiali e tecniche costruttive sperimentali a 'complessità gestita'

Il rapporto tra uomo e materia ha plasmato secoli di storia dell'architettura e dell'*ars costruendi*, mutevole a seconda della tipologia di ambiente, di condizione geomorfologica e del *genius loci*. Sin dalla preistoria l'uomo ha inventato - attraverso la tecnica e gli strumenti - materiali, manufatti e architetture sempre più sofisticate e rispondenti alle esigenze abitative. Dal XX secolo - definito come età dei materiali - e con la nascita del sistema industriale vengono messi a punto strumenti di trasformazione controllata della materia, come il vetro e le leghe metalliche che rivoluzioneranno i linguaggi architettonici, introducendo il mito della leggerezza e della civiltà delle macchine, espressione estetica e anticulturale del classicismo e delle arti plastiche a favore della nuova forma della «*macchina per abitare*» («*La maison est une machine à habiter*»)³¹.

Ma è con le attuali conoscenze che l'uomo è arrivato a manipolare la materia nella sua struttura molecolare, un traguardo che determina la transizione dal una «complessità controllata» - in cui l'obiettivo era quello di produrre materiali perfetti, privi di impurità e anisotropie - ad una «*complessità gestita dei materiali immateriali*»³², nella quale anisotropie ed impurità vengono progettate appositamente per ottenere prestazioni molto precise che fanno sì che i materiali avanzati assomiglino ai materiali organici naturali in grado di risolvere problemi di alta ingegneria proprio attraverso la realizzazione di strutture complesse e profondamente anisotrope.

La materia e i materiali diventano così sempre più simili ad un organismo vivente in grado di recepire e reagire a stimoli. Questo si tramuta nella creazione di un nuovo filone di studi di progettazione di nuovi materiali che si ispira direttamente alla natura, come la *bionica*, e la *biomimetica*, in grado di realizzare artefatti avanzati

ispirandosi alla natura ed ai principi che sono alla sua base organizzativa ed evolutiva. Si aprirebbe, quindi, lo sviluppo verso un nuovo approccio basato sulla progettazione generativa e del *generative design*, in grado di utilizzare algoritmi ispirati a principi della genetica e della natura, l'unica aspirazione e ispirazione per lo sviluppo di nanotecnologie. Un esempio sono rappresentati dai materiali autopulenti, il cui principio funzionale risiede nel fiore di loto ed in modo particolare nella capacità di alcune foglie di mantenersi pulite facendo scorrere le goccioline d'acqua sulla superficie senza farle aderire.

Rispetto a tale scenario, la gestione dei processi di ripensamento e utilizzo della materia, riguarda, oltre la tecnologia dell'architettura, diversi settori come la scienza dei materiali e la chimica molecolare, che hanno permesso la messa a punto di processi di produzione di materiali a complessità gestita e stanno contribuendo a modificare, radicalmente, le dinamiche produttive e realizzative del settore delle costruzioni e del progetto di architettura.

L'utilizzo della caseina come materiale naturale per la realizzazione di un pannello isolante rappresenterebbe solo la genesi di un contesto futuro della progettazione sempre più vocata allo sviluppo di un nuovo paradigma, ovvero quello della creazione di materiali in grado di imitare la natura, le sue logiche di funzionamento e le sue dinamiche comportamentali. Una natura la cui essenza è nella complessità. Partendo da questi propositi, la ricerca si conclude passando in rassegna alcune delle realtà emergenti di materiali a complessità gestita, suggestionando ciò che la fibra biopolimerica a base di caseina può rappresentare come trasferimento delle logiche della natura all'interno di un materiale generato industrialmente ma avente un processo di dismissione organico. Un requisito molto auspicato al fine di raggiungere quella «unità organica sintesi di forma e tecnica»³³ e contribuire a sostenibilità ambientale.

GreenBiz: i fanghi inerti

Uno dei primi esempi nati dal connubio tra il settore delle costruzioni e il recupero degli scarti di lavorazione industriale è GreenBiz un materiale inerte realizzato in Giappone attraverso il recupero dei depositi fangosi derivanti dalla lavorazione per la tintura del colore e considerati rifiuti speciali (fig.36). I residui vengono ridotti in *digestato*³⁴ attraverso il processo di digestione anaerobica e successivamente privato dagli agenti inquinanti, centrifugato e cotto ad alta temperatura in miscela con argilla ed altri elementi. Il materiale finale ottenuto è una lastra ceramicata porosa molto leggera, in grado di imbibirsi di acqua fino ad aumentare del 50% il proprio volume e successivamente rilasciarla lentamente. Questa proprietà è stata, quindi, sfruttata per la realizzazione del substrato di coperture e facciate verdi (come l'esempio dell'azienda Komatsu Matele) (fig.37) per la crescita di alcune varietà di piante. GreenBiz, brevettato a livello mondiale, ha trovato impiego anche per la realizzazione di massetti autobloccanti ad elevata permeabilità, capaci di mitigare, grazie alla estrema porosità, le prime piogge. Ulteriori applicazioni di GreenBiz,

ancora oggetto di sperimentazione, riguarda la possibilità di sfruttare le proprietà isolanti, fonoassorbenti e di resistenza al fuoco per la realizzazione di pannelli di rivestimento isolanti o per la progettazione di schermature, come la struttura prototipo di parapetto, denominata *GreenFrame* e utilizzata nel primo edificio italiano NZEB sito nel Campus di Bovisa del Politecnico di Milano (fig.38).

- 36. Lastre di GreenBiz, in www.komatsumatele.co.jp.
- 37. Copertura verde dell'azienda Komatsu Matele Corporation, produttrice del GreenBiz, in www.komatsumatele.co.jp.
- 38. Parapetto GreenFrame del VELUXlab sito nel Campus di Bovisa del Politecnico di Milano, in www.nordzinc.com.



36



37



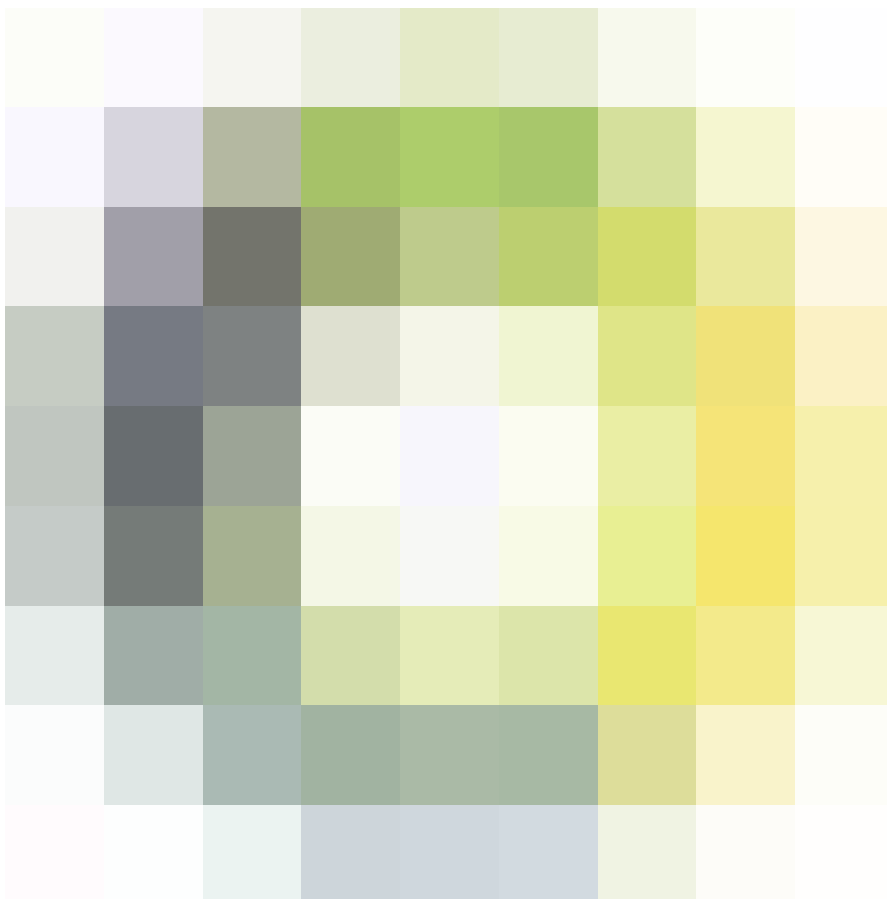
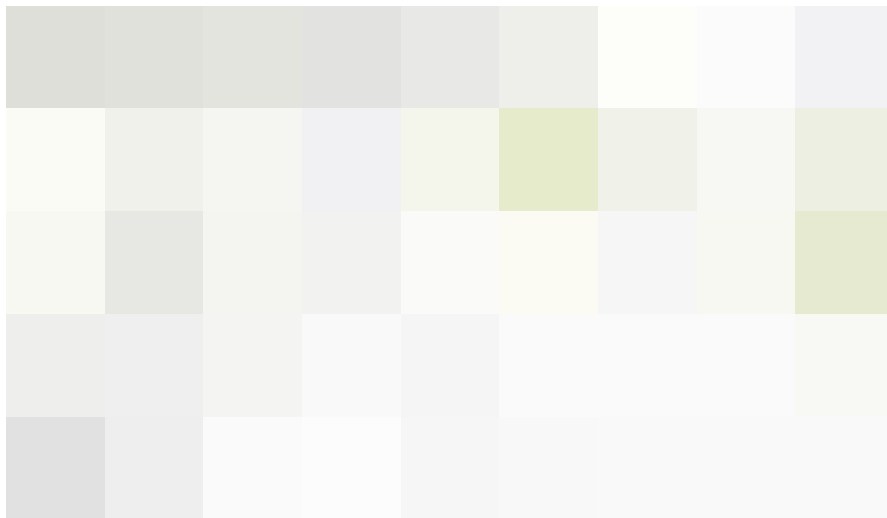
38

Ricehouse: biocomposti di lolla di riso

RiceHouse è una realtà imprenditoriale fondata dall'architetto Tiziana Monterisi e rappresenta un esempio concreto di come prodotti secondari della coltivazione del riso possono diventare materiali tecnologicamente avanzati per una edilizia sostenibile, senza produrre rifiuti ponendo l'uomo al centro di un processo industriale il più possibile sostenibile (fig.39).

39. Economia di processo circolare, modello economico della realtà imprenditoriale RiceHouse in Italia, in www.ricehouse.it.

40. Pannello isolante termoacustico RH 600, in www.ricehouse.it.



L'obiettivo principale dell'azienda è la commercializzazione di materiali quali paglia di riso, lolla, termo-in-tonaci, massetti alleggeriti e finiture in lolla-calce e pannelli isolanti. Le malte naturali, per esempio, sono ottenute miscelando calce aerea e lolla di riso, un sottoprodotto agricolo derivante dal processo di sbramatura del risone o riso grezzo. Le caratteristiche principali offerte dai biocomposti lolla-calce sono legate ad un elevato isolamento termico, alle eccellenti prestazioni acustiche della miscela, ad un'elevata traspirabilità del materiale unito e ad un'ottima capacità di regolamentazione dell'umidità interna. In campo edilizio presenta un'elevata versatilità sia nel campo delle ristrutturazioni, adattandosi ad ogni tipologia di muratura, sia nelle nuove costruzioni. È un materiale sano, durevole, del tutto riciclabile, estremamente ecologico in grado di ridurre e sequestrare notevoli quantitativi di CO₂ dall'ambiente nell'intero ciclo di vita. Un altro prodotto innovativo dell'azienda è il pannello isolante termoacustico costituito da una miscela naturale a base di lolla di riso e legante 100% naturale. Il pannello, grazie alle sue caratteristiche di resistenza termica e traspirabilità, è un ottimo isolante per la bioedilizia. Questo prodotto è stato studiato per essere utilizzato principalmente come isolante in coperture, solai e cappotti. Non può essere utilizzato come pannello strutturale o collaborativo. Materiale caratterizzato da un bassissimo impatto ambientale, assenza totale di formaldeide, slegato dalla filiera del petrolio, con ottima resistenza all'acqua e al fuoco³⁵ (fig.40).



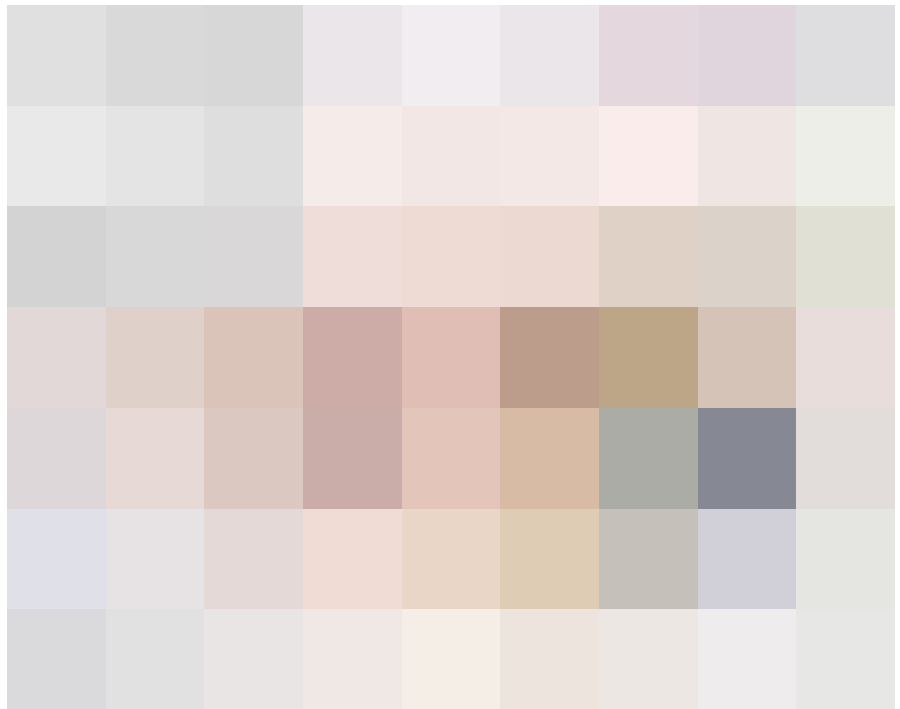
Grazie alle ottime prestazioni, alla grande versatilità e commercializzazione dei prodotti RiceHouse, sono state numerose le applicazioni dei prodotti aziendali, aggiudicandosi prestigiosi premi come il CasaClima Startup Awards 2018, Good Energy Award 2018, Premio Sviluppo Sostenibile 2018, ING Challenge 2018, "Best Smart City Vision" a Seeds&Chips Milano 2019, Premio Speciale Repower 2019, Premio Innovability, Le Village 2019.

I progetti più prestigiosi sono quelli nati con la collaborazione con Wasp, azienda leader nel settore della stampa 3D con il grande successo prima di "GAIA" - una casa di ultima generazione stampata in 3D con i materiali completamente naturali di RiceHouse - poi con "TECLA" - un habitat ecosostenibile a Massa Lombarda (RA) stampato in 3D con una miscela di terra cruda e bio-materiali RiceHouse, progettato e ingegnerizzato dallo studio MC A - Mario Cucinella Architects (figg.41-44).

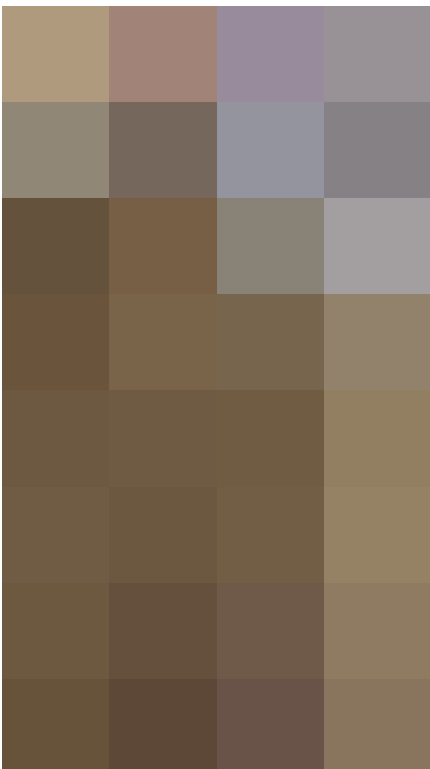
TECLA è il primo habitat costruito impiegando simultaneamente molteplici stampanti collaborative Crane WASP ed è la dimostrazione che la tecnologia 3D è in grado di realiz-

zare edifici ottimizzando il processo costruttivo e minimizzando l'impiego delle risorse umane ed energetiche. Un materiale biodegradabile e riciclabile a chilometro zero che renderà effettivamente la costruzione priva di qualsiasi forma di scarto fornendo un modello sostenibile in grado di dare un significativo impulso alle economie nazionali e locali, migliorando il benessere delle comunità coinvolte³⁶.

- 41. Dettaglio del materiale estruso in terra cruda e biocomposti, in www.3dwasp.com.
- 42. Schema progettuale dell'habitat TECLA, progettato dallo studio MC A - Mario Cucinella Architects, in www.3dwasp.com.
- 43. Immagine della stampante 3D Crane WASP durante la realizzazione dell'involucro in terra cruda e materiali biocomposti, in www.3dwasp.com.
- 44. Intonaco RH 200, in www.ricehouse.it.



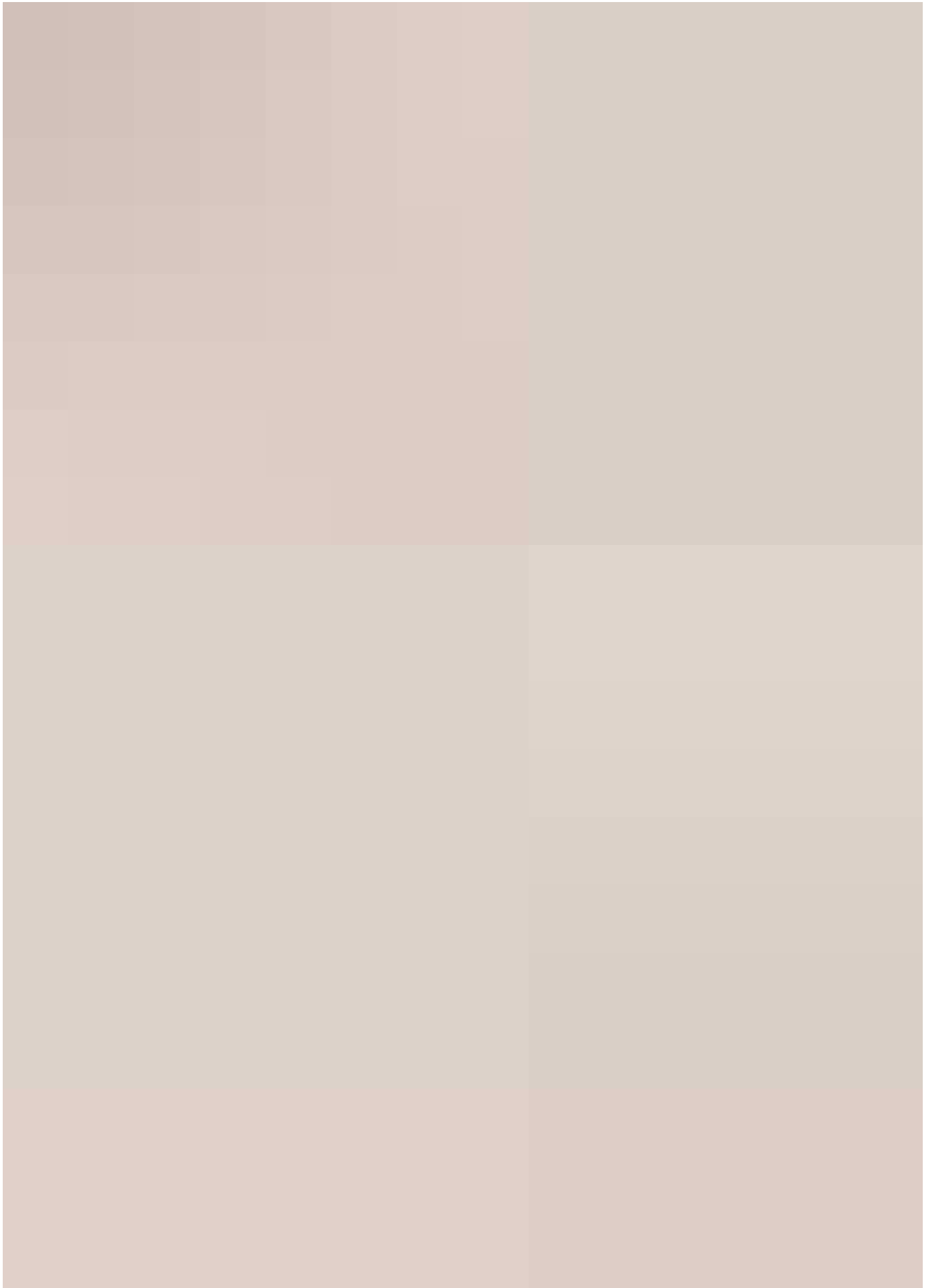
42



41



43



Mogu: fibra di funghi

Un altro esempio di incontro simbiotico tra architettura e scarti dell'industria agro-alimentare è rappresentato dai biomateriali *Mogu*, biocompositi sperimentati e prodotti dall'officina italiana con una rinnovata anima imprenditoriale nel settore della micologia.

L'azienda che si inquadra nel mondo delle biotecnologie applicate ai materiali ha sviluppato dei prodotti per l'edilizia e il design partendo dalla fermentazione fungina che si sviluppa su qualsiasi materiale organico che contenga cellulosa, un polisaccaride di cui si cibano (figg.45-46). In modo particolare viene lavorata materia organica di scarto, proveniente dalla filiere produttive, dall'industria alimentare e tessile facendo crescere i funghi (o meglio del *micelio*, cioè l'apparato vegetativo del fungo formato da un fitto intrico di filamenti chiamati *ife*, microtuboli in cui scorre il *protoplasma*) che hanno il compito di strutturare il prodotto finale.

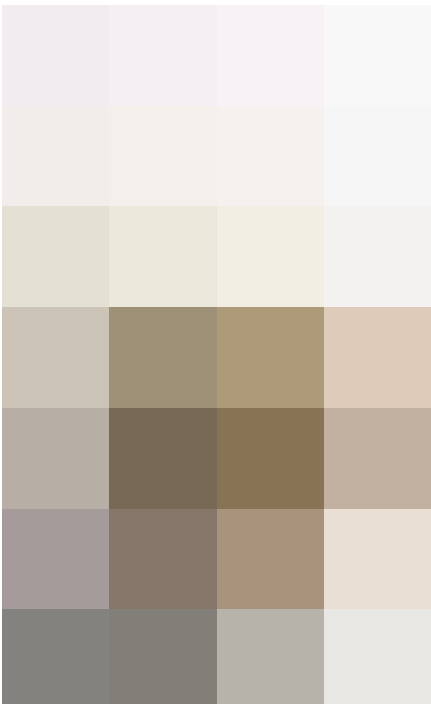
L'obiettivo di questi biomateriali è di proporsi come alternative responsabili alla grande varietà di tradizionali materiali sintetici e/o altamente inquinanti, come ad esempio le plastiche e non solo.

L'azienda ha sviluppato una serie di prodotti molto leggeri e porosi che trovano applicazione nel settore dell'architettura, dell'*interior design* e della bioedilizia per produrre rivestimenti e pannelli che sfruttano le proprietà morfologiche del materiale (in modo da utilizzarlo anche come isolante acustico o termico), pavimentazioni con finiture a base di resine naturali e stuoie flessibili da proporsi come alternative ai tradizionali materiali tessili o pellami di origine animale (fig.47).

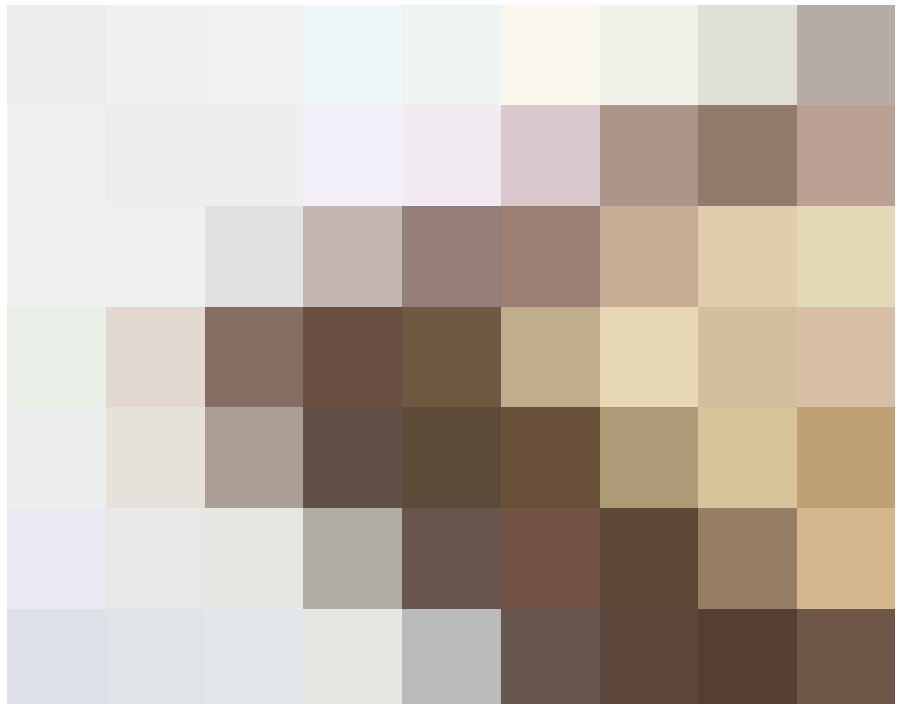
- 45. Funghi cresciuti su substrati organici, © Mogu srl - Inarzo (Varese).
- 46. Funghi cresciuti su substrati organici, © Mogu srl - Inarzo (Varese).
- 47. Campionature di pannelli pressati, © Mogu srl - Inarzo (Varese).
- 48. Prove di coltura su piastre in laboratorio, © Mogu srl - Inarzo (Varese).



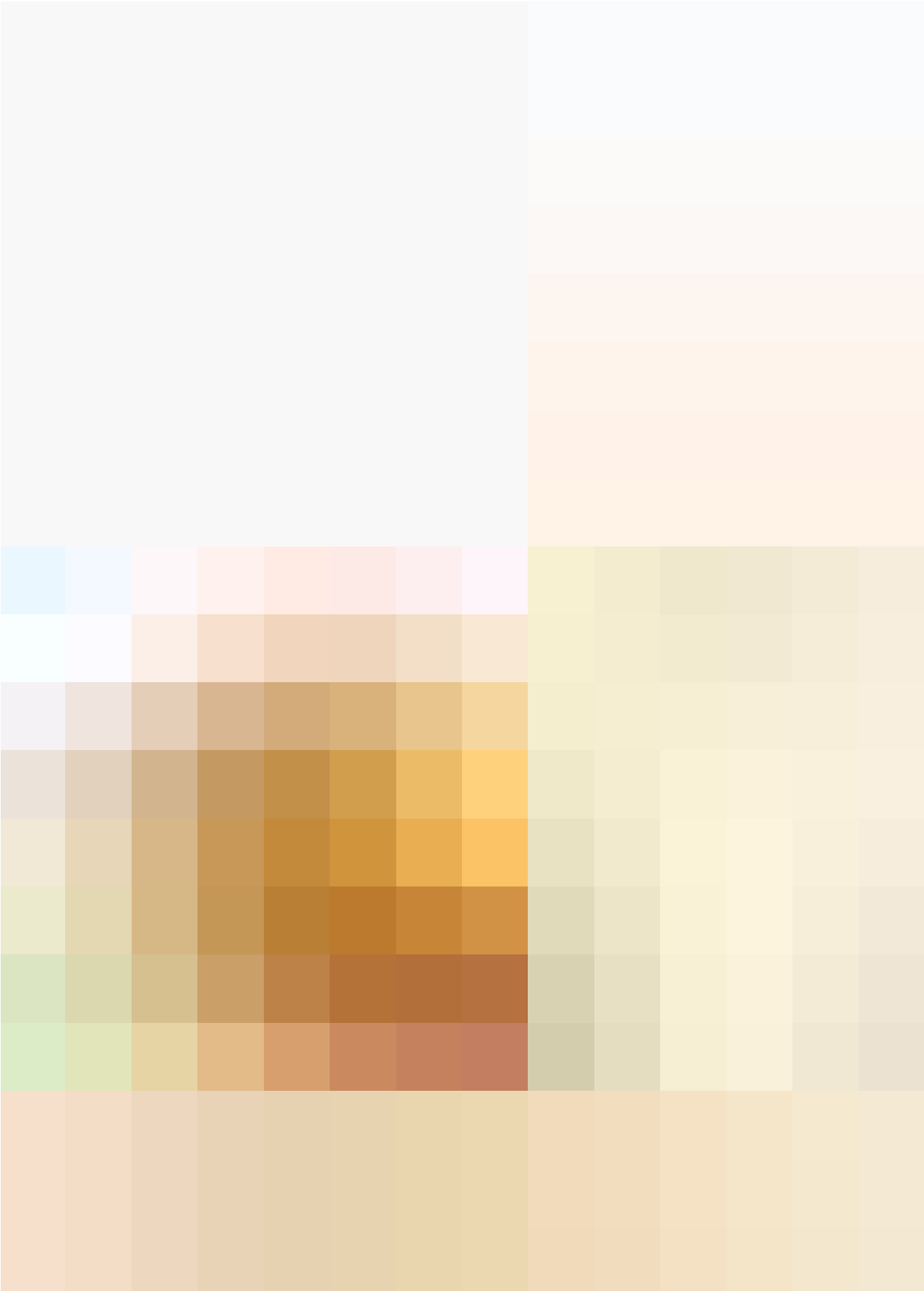
46



45



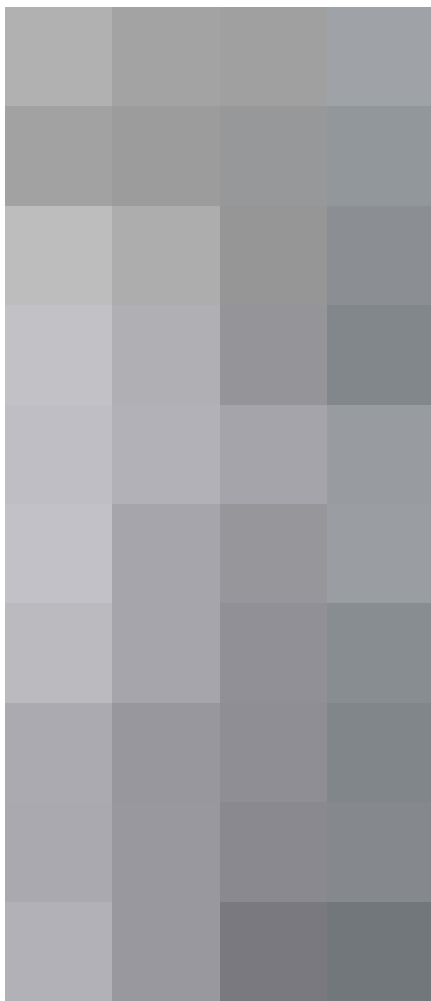
47



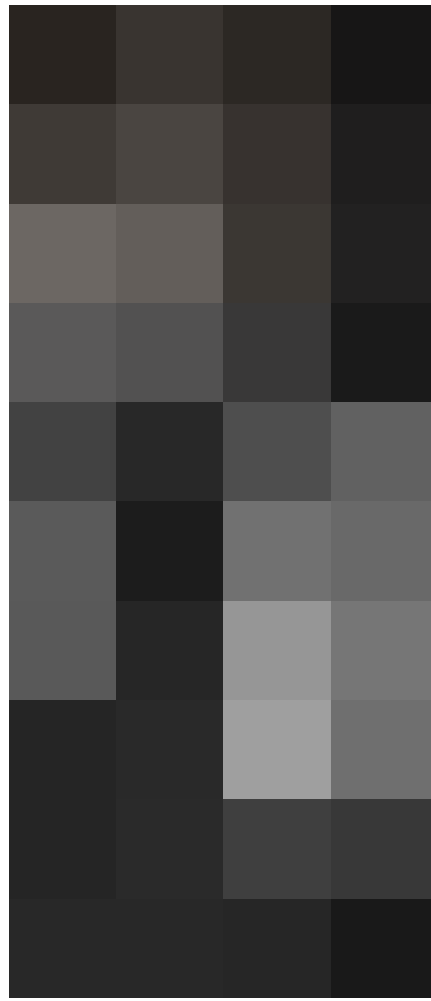
**Stonethica: materiali lapidei
composti da scarti di lavorazione del
marmo e della pietra naturale**

Stonethica nasce come linea di produzione di materiali lapidei destinati all'architettura e al design, all'interno di un ciclo eco-sostenibile mediante il recupero degli scarti provenienti dalla lavorazione del marmo e della pietra naturale, uniti tramite una resina bicomponente atossica. I prodotti realizzati con un contenuto di riciclato tra il 98,6% e il 99,4% fa parte di un tessuto economico innovativo chiamato economia circolare con lo scopo ultimo di preservare materiali lapidei, primi tra tutti il marmo, un risorsa destinata all'esaurimento.

Il ciclo di produzione Stonethica utilizza principalmente marmi apuani ma prevede l'uso di scarti provenienti da diverse lavorazioni lapidee anche in abbinamento con materiali di natura eterogenea. Una caratteristica, quest'ultima, che permette un alto livello di personalizzazione del prodotto in risposta a precise esigenze di progettazione d'interni, di gusto e di stile (figg.49-50).



49



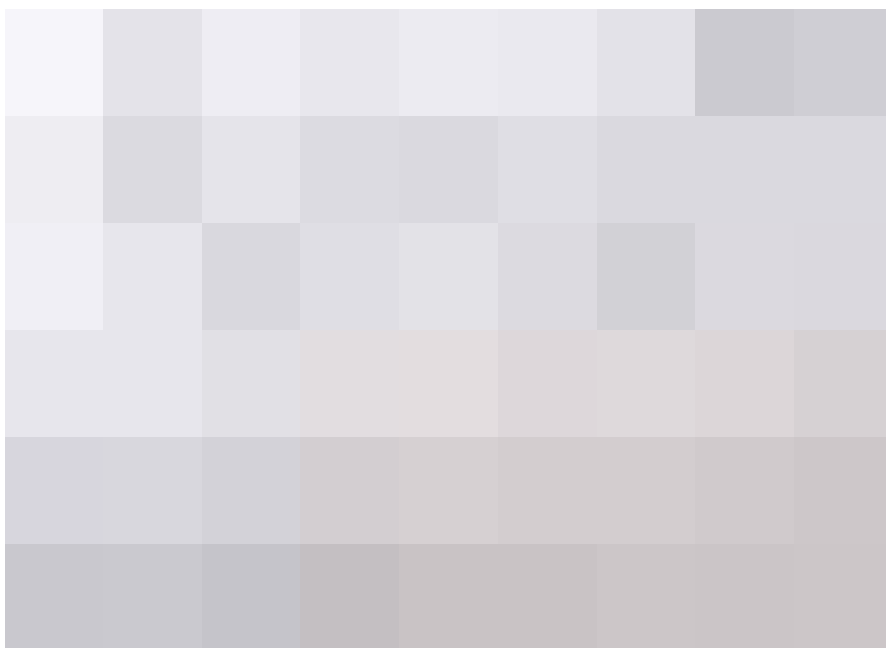
50

Clear Wood: il legno trasparente

Ideato nel *KTH Royal Institute of Technology* di Stoccolma, il legno trasparente ha una trasmittanza ottica dell'85% che lo rende quasi trasparente.

L'effetto è reso possibile mediante l'estrazione della lignina, un polimero organico che conferisce il caratteristico colore al legno e che insieme alla cellulosa costituiscono la struttura cellulare di un elemento vegetale. Attraverso l'aggiunta di metilmetacrilato prepolimerizzato (PMMA) viene modificato l'indice di rifrazione del materiale variandone la trasparenza a seconda della richiesta.

Nel materiale così ottenuto è possibile osservare il *floema* (o *libro*) e lo *xilema*, i tessuti vegetali che hanno il compito di trasportare la linfa grezza necessaria alla sopravvivenza dell'essenza vegetale (fig.51).



51

49. Scarti di lavorazione del marmo.

50. Collezione *Contrasti*, progetto di Moreno Ratti in collaborazione con Stonethica, in www.stonethica.com.

51. Clear Wood, il legno trasparente, in www.madec.polimi.it

UMMs – Ultralight Metallic Microlattices

Gli UMMs – Ultralight Metallic Microlattices (microreticoli metallici ultraleggeri) sono dei materiali artificiali strutturati in forma di geometrie reticolari metalliche, progettati dalla compagnia aeronautica statunitense *Boeing*, in una *joint venture* con *HRL Laboratories*, società dell'avanguardia tecnologica che conduce numerose ricerche pionieristiche per soluzioni tecnologiche innovative, riconosciuta come leader nel campo delle scienze fisiche ed ingegneristiche.

Le società hanno sviluppato il *Boeing Microlattice*, un materiale innovativo estremamente leggero che possa essere usato nel prossimo futuro per alcune componenti degli aeromobili e in altri settori.

Nonostante si tratti di un metallo (con una resistenza paragonabile a quella del titanio), il materiale è notevolmente più leggero del polistirene utilizzato per l'isolamento termico degli edifici.

L'estrema leggerezza del materiale risiede nella struttura tridimensionale a celle aperte composta da una fitta maglia di nanotubi metallici cavi ottenuti da una matrice polimerica con diametri di circa 100 μm , con spessori metallici di circa 500nm (figg.52-54).

Il reticolo geometrico del *Boeing Microlattice* è composto per il 99,9% di aria e pertanto le sue proprietà dipendono dalla sua struttura piuttosto che dalla sua composizione chimica, analogamente per tutti i cosiddetti *metamateriali*. La densità del reticolo è pertanto di circa 0,9 milligrammi per centimetro cubo, caratteristica che ne fa il materiale più leggero del mondo, inferiore anche dell'aerogel, con densità pari a 1 milligrammo per centimetro cubo³⁷.

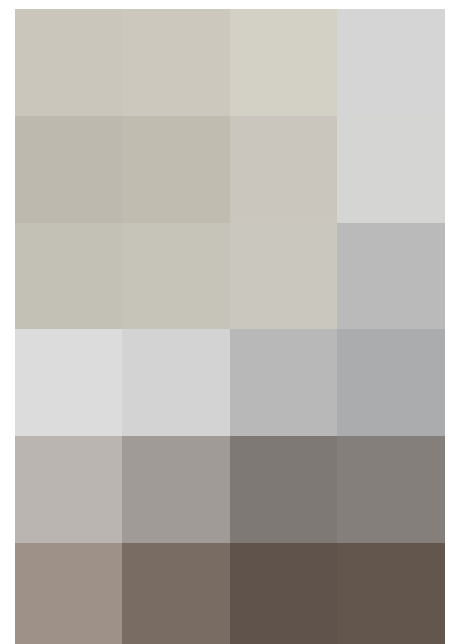
52. Campione di microreticolo metallico ultraleggero (UMMs - *Ultralight Metallic Microlattices*).
53. Il materiale è talmente leggero da poter stare sopra la lanugine del dente di leone senza danneggiarlo, © Dan Little, HRL Laboratories, LLC.
54. Campioni di microreticolo metallico ultraleggero (UMMs - *Ultralight Metallic Microlattices*).



52



53



54

La Nanocellulosa

La cellulosa è uno dei polimeri naturali più abbondanti al mondo con buone proprietà termiche e meccaniche nonché una elevata biodegradabilità. Pertanto l'utilizzo di nano fibre di cellulosa per la costituzione di materiali bionanocompositi è una strategia che sta riscuotendo negli ultimi anni notevole interesse. Un esempio significativo è rappresentato dall'Aerogel, la nanocellulosa ottenuta attraverso un processo di liofilizzazione e trattamento termico³⁸.

I materiali realizzati con la nanocellulosa sono versatili e molto resistenti (in modo particolare in combinazione con grafene che la rende più resistente dell'acciaio). La nanocellulosa è impiegata in diversi settori, quali automobilistico, elettronica, alimentare e in architettura. Interessante è, infatti, l'applicazione come materiale isolante, risultato di una ricerca finanziata dalla *Swedish strategic foundation* in collaborazione con il Politecnico di Torino in cui hanno messo a punto il processo *freeze-casting*³⁹ per la realizzazione di una

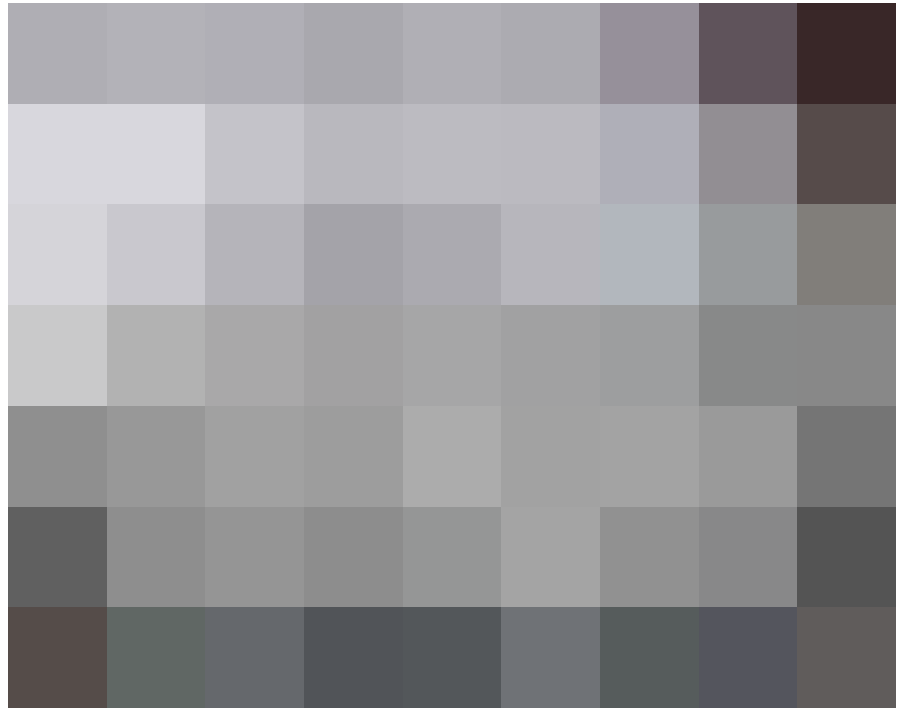
schiuma di nano cellulosa ottenuta combinando ossido di grafene e nano particelle di sepiolite (minerale fillosilicato idrato di magnesio) caratterizzato da proprietà elevate di isolamento termico, leggerezza e resistenza al fuoco (senza l'aggiunta di additivi ignifuganti) (fig.55).

55. Nanocellulosa, © Rise Research Institute of Sweden.

56. Film lubrificato autopulente SLIPS, © Wyss Institute at Harvard University.

57. Pianta carnivora *Nepenthes*, elemento ispiratore della tecnologia SLIPS.

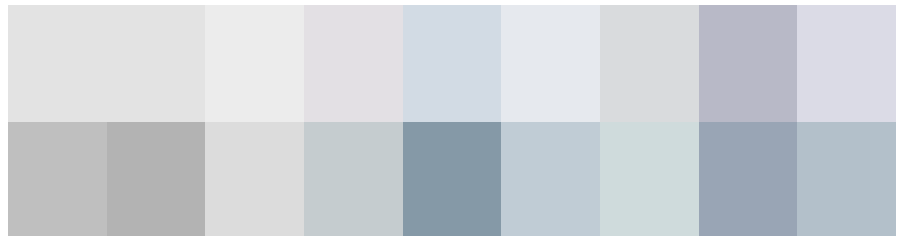
58. Film lubrificato autopulente SLIPS, © Wyss Institute at Harvard University.



55

Slippery Liquid-Infused Porous Surface

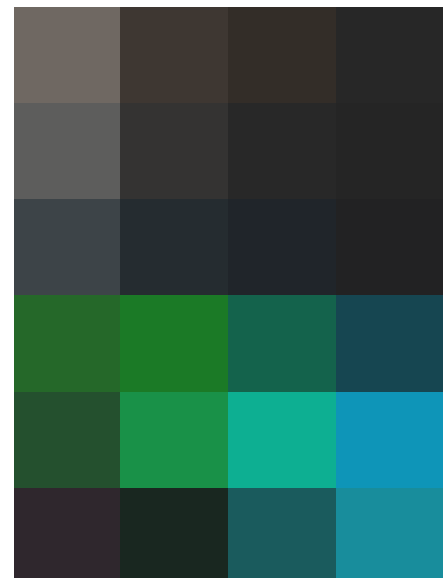
Si tratta di un film viscoso poroso imbibito di un fluido lubrificante, totalmente trasparente e resistente alle temperature più estreme e a forti pressioni, ideale per essere applicato in architettura per la realizzazione di ampie superfici e rivestimenti autopulenti, repellenti e autoriparanti (fig.56). Ideato dai ricercatori della *Harvard School of Engineering and Applied Sciences*, il materiale denominato *SLIPS* imita le capacità delle piante carnivore di far scivolare al loro interno le prede (fig.57). *SLIPS* è commercializzato da *Adaptive Surface Technologies*, una società nata dal *Wyss Institute*, che fornirà soluzioni di rivestimento dei materiali a molteplici mercati industriali, di consumo e biomedicali creando superfici scivolose personalizzate e altamente repellenti per un vasta gamma di applicazioni (fig.58).



56



57



58

Il polistirolo ecologico

Il lavoro sperimentale condotto presso la *School of Mechanical and Materials Engineering* e sostenuto dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti e dall'Ufficio di Commercializzazione della *Washington State University* consiste nella produzione di una schiuma vegetale costituita principalmente da nano cristalli di cellulosa stabilizzati (75%) e portati allo stato solido mediante la rimozione dei solventi (utilizzando acqua anziché solventi nocivi) con processi di essiccazione. La stabilità dimensionale del prodotto, molto simile al polistirolo convenzionale (derivato

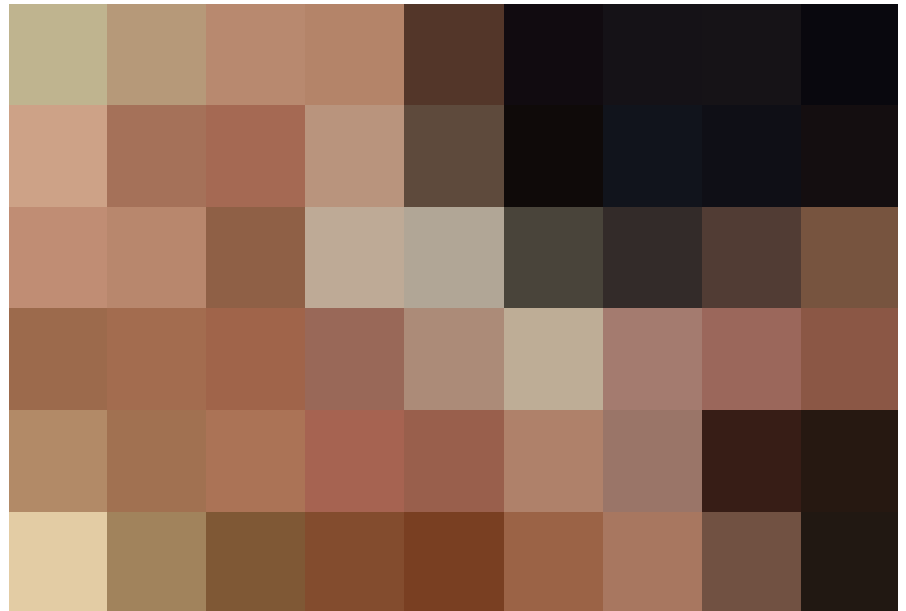
dal petrolio) è garantita aggiungendo alcool polivinilico, un polimero che si lega ai cristalli di nano cellulosa rendendo le schiume anche più flessibili.

Il prodotto è molto leggero e può sopportare fino a duecento volte il proprio peso senza cambiare l'aspetto morfologico e dimensionale.

Il polistirolo ecologico, oggi ancora oggetto di sperimentazione, potrebbe avere numerose applicazioni nel settore del packaging, nell'alimentare, nel biomedicale e nell'edilizia come materiali termoisolanti e ignifughi e come dispositivi di accumulo di energia basati su nano cellulosa.

59. Campione solido dell'innovativa schiuma a base di cellulosa, © Washington State University.

60. *GreenBrick - Pullayell* è un materiale da costruzione sostenibile, che utilizza materiali derivanti dagli scarti di lavorazione di due importanti tradizioni marchigiane: la manifattura della carta e l'allevamento del pollame. Il materiale, molto simile all'eco-mattone di laterizio e carta ideato in Spagna è ottenuto da argilla con aggiunta di *pulper* (scarto dell'industria cartaria) e fanghi di depurazione dell'industria cartaria e polvere di guscio d'uovo dell'industria alimentare, in Grattini G., *GreenBrick, una mattonella in Pullayell*, Tesi di laurea in Disegno industriale e ambiente, Università di Camerino.



59



E-co mattoni di carta e laterizio

Un altro esempio di utilizzo della cellulosa è quello proposto da un team di ricercatori spagnoli, ovvero mattoni ottenuti da un impasto di cellulosa (derivanti dai fanghi di depurazione delle acque reflue di una cartiera) e argilla, successivamente essiccati in forno fino a completa solidificazione. In tal modo i mattoni di carta-laterizio acquistano le caratteristiche meccaniche indispensabili per l'impiego in edilizia. Altri vantaggi, rispetto ai convenzionali mattoni di laterizio sono il risparmio energetico, il recupero di materie di scarto e la riduzione del tempo di cottura, fattore che contribuisce alla riduzione di energia termica e CO₂.

60

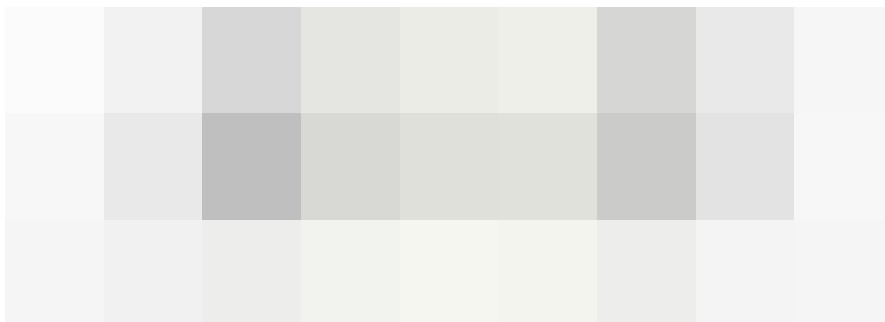
BioBuild: sistema di facciata autoportante in biocompositi

BioBuild è il primo pannello di facciata autoportante al mondo per la costruzione di edifici realizzato con materiali biocompositi. Riduce l'energia incorporata nei sistemi di facciata («*embodied energy*»⁴⁰) fino al 50% rispetto ai materiali da costruzione convenzionali senza alcun aumento dei costi. Progettato da *Arup* e *GXN Innovation*, il progetto BioBuild è stato finanziato dal Settimo Programma Quadro della Commissione Europea per la ricerca e lo sviluppo tecnologico.

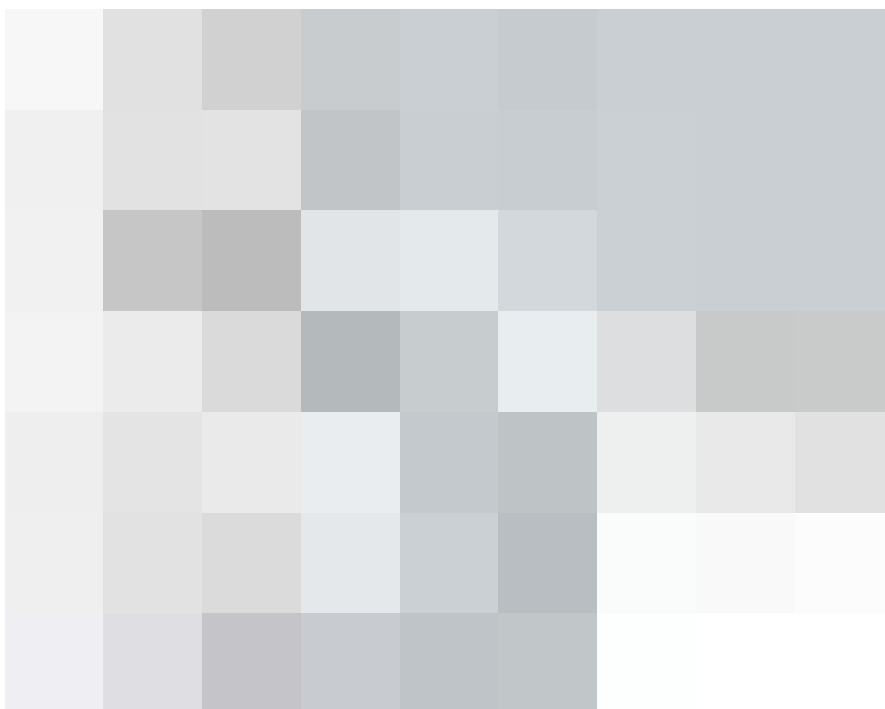
Il progetto BioBuild mira a modellare un ambiente costruito migliore sviluppando e utilizzando materiali innovativi basati su risorse naturali rapidamente rinnovabili. I biocompositi sono composti da fibre naturali come lino, canapa e juta; così come resine naturali ottenute dal sottoprodotto della lavorazione agricola di mais, canna da zucchero e altre colture. Con le opportune lavorazioni, possono essere convertiti in prodotti leggeri, durevoli e ad alte prestazioni che migliorano la sostenibilità dei sistemi costruttivi.

Sviluppato principalmente per edifici per uffici commerciali, il pannello di facciata è alto 4,0 metri e largo 2,3 metri e include una finestra. È composto da due gusci esterni in biocomposito, realizzati in tessuto di lino e resina *biobased*, con uno strato centrale di materiale isolante (fig.61). Il pannello è concepito per essere consegnato in cantiere come unità completamente prefabbricata (figg.62-63). Una parte centrale per la progettazione è stata un approccio alla progettazione del ciclo di vita. Tutte le parti del sistema possono essere facilmente staccate l'una dall'altra ed essere riciclate o riutilizzate alla fine del ciclo di vita.

Nel 2015, il sistema tecnologico di facciata BioBuild ha ottenuto tra i vari riconoscimenti, il *Jec Innovation Award Europe* nella categoria «*Construction*».



61



62



63

61. Composizione stratigrafica del sistema facciata BioBuild, © Arup & GXN.

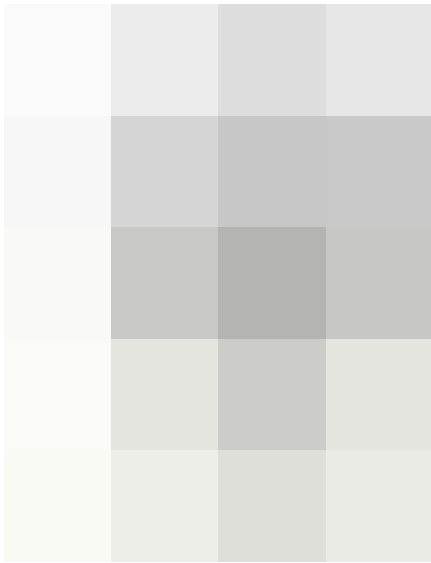
62. Sistema di connessione meccanica del sistema facciata BioBuild, © Arup & GXN.

63. Facciata BioBuild, © Arup & GXN.

Hydroceramic: parete con sistema di raffrescamento passivo low-tech

64. Stratigrafia del pannello Hydroceramic, © Institute for Advanced Architecture of Catalonia.

65. Pannello Hydroceramic, © Institute for Advanced Architecture of Catalonia



64

La facciata auto-raffrescante è un altro esempio di applicazione di materiali biocompositi all'interno di innovativi sistemi costruttivi. In bioedilizia esistono innumerevoli elementi di involucro dinamico che funzionano passivamente in risposta agli agenti climatici esterni. A Barcellona, all'*Institute for Advanced Architecture* della Catalogna un team coordinato dall'architetto Areti Markopoulou hanno ideato una parete in grado di raffrescarsi autonomamente grazie ad un sistema che concorre all'abbassamento di temperatura nelle giornate particolarmente calde.

La parete, denominata *Hydroceramic* è costituita da una combinazione di idrogel in sfere e materiali di supporto, quali la ceramica ed un tessuto. Essa funziona in maniera del tutto analogo al corpo umano che attraverso la sudorazione diminuisce

la temperatura corporea; in egual modo la parete idroceramica riduce la temperatura della superficie aumentando il gradiente di umidità. Il processo è assicurato dagli idrogel, composti da sostanze in grado di assorbire acqua fino a 500 volte il loro peso e rilasciarla in determinate condizioni.

La struttura, ancora in fase di prototipazione, risponde morfologicamente ai pannelli tipo sandwich, in cui:

- il primo strato, in argilla, presenta delle cavità a forma conica con la funzione di permettere l'imbibizione d'acqua dell'idrogel;
- lo strato sottostante è un tessuto elastico con la funzione di immagazzinamento e trasferimento dell'acqua. Inoltre l'elasticità della stuoia permette le variazioni del volume di idrogel e al contempo lo mantiene nella propria posizione;
- l'ultimo strato è nuovamente costituito da argilla, elemento di connessione con gli strati resistenti (figg.64-65).



65

Note bibliografiche

- 1 Disposizione dell'art.46 - "Novità" del Codice della Proprietà Industriale di cui: comma 1. Un'invenzione è considerata nuova se non è compresa nello stato della tecnica; comma 2. Lo stato della tecnica è costituito da tutto ciò che è stato reso accessibile al pubblico nel territorio dello Stato o all'estero prima della data del deposito della domanda di brevetto, mediante una descrizione scritta od orale, una utilizzazione o un qualsiasi altro mezzo; comma 3. È pure considerato come compreso nello stato della tecnica il contenuto di domande di brevetto italiano o di domande di brevetto europeo designanti l'Italia, così come sono state depositate, che abbiano una data di deposito anteriore a quella menzionata nel comma 2 e che siano state pubblicate o rese accessibili al pubblico anche in questa data o più tardi; comma 4. Le disposizioni dei commi 1, 2 e 3 non escludono la brevettabilità di una sostanza o di una composizione di sostanze già compresa nello stato della tecnica, purché in funzione di una nuova utilizzazione.
- 2 Disposizione dell'art.48 del Codice della Proprietà Industriale di cui: comma 1. Un'invenzione è considerata come implicante un'attività inventiva se, per una persona esperta del ramo, essa non risulta in modo evidente dallo stato della tecnica. Se lo stato della tecnica comprende documenti di cui al comma 3, dell'articolo 46, questi documenti non sono presi in considerazione per l'apprezzamento dell'attività inventiva.
- 3 Disposizione dell'art.49 - "Industrialità" del Codice della Proprietà Industriale di cui: comma 1. Un'invenzione è considerata atta ad avere un'applicazione industriale se il suo oggetto può essere fabbricato o utilizzato in qualsiasi genere di industria.
- 4 Ministero dello Sviluppo Economico, *Brevetti. Introduzione all'utilizzo per le piccole e medie imprese*, Dipartimento per l'impresa e l'internazionalizzazione Direzione Generale per la lotta alla contraffazione - UIBM.
- 5 Prescient & Strategic Intelligence, *Insulation Market Research Report: by Product (Glass Wool, Mineral Wool, EPS, XPS), Application (Residential Construction, Non-Residential Construction, Industrial, HVAC & OEM) – Global Market Size, Share, Development, Growth, and Demand Forecast, 2014–2025*, 2018.
- 6 Grand View research, *Insulation Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (EPS, XPS, Glass Wool, Mineral Wool), By Application (Infrastructure, Industrial, HVAC & OEM), By Region, And Segment Forecasts, 2019 - 2025*, 2019.
- 7 Disposizione dell'art.4 - "Priorità" del Codice della Proprietà Industriale di cui: comma 1. Chiunque abbia regolarmente depositato, in o per uno Stato facente parte di una convenzione internazionale ratificata dall'Italia che riconosce il diritto di priorità, una domanda diretta ad ottenere un titolo di proprietà industriale o il suo avente causa, fruisce di un diritto di priorità a decorrere dalla prima domanda per effettuare il deposito di una domanda di brevetto d'invenzione, di modello di utilità, di privativa di nuova varietà vegetale, di registrazione di disegno o modello e di registrazione di marchio, secondo le disposizioni dell'articolo 4 della Convenzione di Unione di Parigi; comma 2. Il termine di priorità è di dodici mesi per i brevetti d'invenzione ed i modelli di utilità e le varietà vegetali, di sei mesi per i disegni o modelli ed i marchi; comma 3. È riconosciuto come idoneo a far nascere il diritto di priorità qualsiasi deposito avente valore di deposito nazionale regolare, cioè idoneo a stabilire la data alla quale la prima domanda è stata depositata, a norma della legislazione nazionale dello Stato nel quale è stato effettuato, o di accordi bilaterali o plurilaterali, qualunque sia la sorte ulteriore di

- tale domanda.
- 8 Disposizione dell'art.75 - "*Decadenza per mancato pagamento dei diritti*" del Codice della Proprietà Industriale di cui: comma 1. Il brevetto per invenzione decade per mancato pagamento entro sei mesi dalla data di scadenza del diritto annuale dovuto, subordinatamente all'osservanza delle disposizioni dei commi 2, 3 e 4.
 - 9 Disposizione dell'art.60 - "*Durata*" del Codice della Proprietà Industriale di cui: comma 1. Il brevetto per invenzione industriale dura venti anni a decorrere dalla data di deposito della domanda e non può essere rinnovato, né può esserne prorogata la durata.
 - 10 Disposizione dell'art.70 - "*Licenza obbligatoria per mancata attuazione*" del Codice della Proprietà Industriale.
 - 11 «*IT Governance*»: si intende il settore del governo d'impresa a cui è demandata la gestione dei sistemi TI (ovvero di Tecnologia dell'Informazione).
 - 12 «*PoC - Proof of Concept*»: è intesa come "prova di fattibilità", una versione preliminare di un progetto con lo scopo di determinare la fattibilità e la fondatezza di alcuni principi costituenti, come nel caso di un prototipo.
 - 13 «*Due diligence*»: indica una serie di azioni ed attività da parte di un soggetto con lo scopo di valutare la convenienza di un investimento, i rischi connessi e gli strumenti di garanzia e tutela.
 - 14 Ministero dello Sviluppo Economico, Bando per la realizzazione di programmi di valorizzazione dei brevetti tramite il finanziamento di progetti di Proof of Concept (PoC) delle Università italiane, degli Enti Pubblici di Ricerca (EPR) italiani e degli Istituti di Ricovero e Cura a Carattere Scientifico (IRCCS), Roma, 2019.
 - 15 «*Scale-up*»: è l'evoluzione naturale di una start-up che ha già sviluppato il suo prodotto e il suo business model, che si afferma nel mercato e presenta delle caratteristiche che le permettono di compiere un salto dimensionale.
 - 16 «*MVP- Minimum Viable Product*»: è la prima versione di un prototipo con caratteristiche minime per essere utilizzabile dai primi clienti e/o investitori, i quali forniranno un feedback per lo sviluppo futuro del prodotto.
 - 17 Balloi A., Barbieri M., Colombo B., Pannofino D., Silipigni F., *Proprietà intellettuale per Start-up. Come un brevetto, un marchio o un disegno industriale possono cambiare la vita della tua Start-up*, Fondazione Politecnico di Milano, Politecnico di Milano (Ufficio Trasferimento Tecnologico), PoliHub, Milano, 2019.
 - 18 Osterwalder A., Pigneur Y., *Business Model Generation. A Handbook for Visionaries, Game changer and Challengers*, John Wiley & Sons, 2010.
 - 19 Manzini E., *Artefatti. Verso una nuova ecologia dell'ambiente artificiale*, Domus Accademy, 1989.
 - 20 *Ibidem*.
 - 21 Vitta M., *La materia manipolata*, Arca Edizioni, 1998, pag.78.
 - 22 Manzini E. (1989), op. cit. (vedi nota 19).
 - 23 Faresin A., *Architettura in calcestruzzo. Soluzioni innovative e sostenibilità*, Utet, Torino, 2012, pag.134.
 - 24 Wackernagel M., Rees W.E., Testemale P., *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*, New Society Pub, 1995.
 - 25 Manzini E. (1989), op. cit. (vedi nota 19).
 - 26 La prima comparsa del termine "upcycling" risale ad un'intervista di Thornton Kay (Salvo, UK) all'ingegnere tedesco Reiner Pilza nel 1994: "*We talked about the impending EU Demolition Waste Streams directive. "Recycling," he said, "I call it downcycling. They smash bricks, they smash everything. What we need is upcycling, where old products are given more value, not less." He despairs of the German situation and recalls the supply of a large quantity of reclaimed woodblock from an English supplier for a contract in Nuremberg, while just down the road a load*

- of similar block was scrapped. In the road outside his premises was the result of the Germans' demolition "waste" recycling. It was a pinky looking aggregate with pieces of handmade brick, old tiles, and discernible parts of useful old items mixed with crushed concrete. Is this the future for Europe?", in rivista SALVO. A monthly look at architectural antiques, reclaimed building materials & Allied Topics", n.23, United Kingdom, 1994, pag.14.*
- 27 Altamura P., *Costruire a zero rifiuti. Strategie e strumenti per la prevenzione e l'upcycling dei materiali di scarto in edilizia*, Franco Angeli, Milano, 2016, pag.59.
- 28 *EoW - End-of-Wast*, definito nell'art.6 della Direttiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 viene individuato in Italia come "cessazione della qualifica di rifiuto". La Direttiva definisce misure appropriate per garantire che i rifiuti sottoposti a un'operazione di riciclaggio o di recupero di altro tipo cessino di essere considerati tali se soddisfano le seguenti condizioni: a) la sostanza o l'oggetto è destinata/o a essere utilizzata/o per scopi specifici; b) esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto; c) la sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti; d) l'utilizzo della sostanza o dell'oggetto non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana. La Commissione monitora l'evoluzione dei criteri nazionali per la cessazione della qualifica di rifiuto negli Stati membri e valuta la necessità di sviluppare a livello di Unione criteri su tale base. Tali criteri dettagliati garantiscono un elevato livello di protezione dell'ambiente e della salute umana e agevolano l'utilizzazione accorta e razionale delle risorse naturali. Essi includono: a) materiali di rifiuto in entrata ammissibili ai fini dell'operazione di recupero; b) processi e tecniche di trattamento consentiti; c) criteri di qualità per i materiali di cui è cessata la qualifica di rifiuto ottenuti dall'operazione di recupero in linea con le norme di prodotto applicabili, compresi i valori limite per le sostanze inquinanti; d) requisiti affinché i sistemi di gestione dimostrino il rispetto dei criteri relativi alla cessazione della qualifica di rifiuto, compresi il controllo della qualità, l'auto-monitoraggio e l'accreditamento; e) un requisito relativo alla dichiarazione di conformità.
- 29 C2C - *Cradle to Cradle* è un approccio olistico innovativo e sostenibile utilizzato nei processi industriali per la creazione di prodotti o servizi che abbiano un impatto positivo sull'uomo e l'ambiente. Tutto ciò nell'ottica di un'economia circolare che vede come fine ultimo l'eliminazione del concetto di rifiuto.
- 30 Deloitte, *Screening template for Construction and Demolition Waste management in Italy*, Ottobre 2015.
- 31 Tentori F., De Simone R., *Le Corbusier*, Laterza, 1987.
- 32 Manzini E., *La materia dell'invenzione*, Arcadia, Milano, 1986, pag.24.
- 33 Nardi G., *Le nuove radici antiche. Saggio sulla questione delle tecniche esecutive in architettura*, Franco Angeli, Milano, 1990.
- 34 «*Digestato*»: è un materiale semi-solido, contenente quantità variabili di sostanza secca, il quale possiede proprietà simili ad un fertilizzante organico. Viene ottenuto attraverso la digestione anaerobica in cui il fango, portato alla temperatura di 32-35°C all'interno di un digestore è mantenuto in un ambiente anaerobico, cioè privo di ossigeno.
- 35 www.ricehouse.it.
- 36 www.3dwaspc.com.
- 37 Smith R., Free M., *The Great Disruption. Competing and Surviving in the Second Wave of the Industrial Revolution*, St. Martin's Publishing Group, 2016, pag.85.
- 38 Melone L., Rossi B., Pastori N., Panzeri W., Mele A., Punta, C., *TEMPO-Oxidized Cellulo-*

- se *Cross-Linked with Branched Polyethyleneimine: Nanostructured Adsorbent Sponges for Water Remediation*, ChemPlusChem 2015, pag.1408.
- 39 «*freeze-casting*»: è un processo per la realizzazione di una schiuma di nanocellulosa ottenuta congelando una sospensione acquosa ceramica o ibrida in uno stampo e sublimando poi la fase solvente solidificata. In funzione della tipologia del materiale si può poi effettuare un trattamento termico per consolidare la struttura. La porosità che caratterizza il materiale dopo sublimazione è rappresentata dalla replica dei cristalli di ghiaccio. Controllando il congelamento si possono realizzare architetture gerarchiche con porosità anisotropa, in cui la porosità è prevalentemente costituita da canali unidirezionali intervallati da lamelle di fase ceramica. Ciò rende più efficaci eventuali successivi processi di infiltrazione con altre fasi.
- 40 «*embodied energy*»: si intende l'energia necessaria ad ottenere il prodotto finale a partire dalla materia prima, inclusi il trasporto, la lavorazione, lo stoccaggio, etc. del prodotto. Un prodotto ottenuto con una minima necessità di energia risulta sicuramente più sostenibile rispetto a un altro, la cui produzione richiede numerosi procedimenti. Sotto questo profilo si possono distinguere: «*embodied energy iniziale*» - che rappresenta la quantità di energia consumata nell'acquisizione della materia prima, la sua lavorazione, il suo trasporto e l'uso nella costruzione - e «*embodied energy ricorrente*» che è riferita alla quantità di energia utilizzata per la manutenzione, la riparazione e la sostituzione di componenti e materiali durante l'intero ciclo di vita dell'edificio, in Rubini L., Sangiorgio S., Le Noci C., *Il nuovo edificio green. Soluzioni per il benessere abitativo e l'efficienza energetica*, Hoepli, Milano, 2016.



Conclusioni

Il progetto di ricerca rappresenta un formidabile strumento che consente attraverso la dicotomia di tradizione e innovazione di acquisire risorse economiche supplementari da investire in modelli di business e/o di ricerca. Il brevetto del pannello termoisolante in fibra biopolimerica a base di caseina può essere percepito dai diversi *stakeholders* come una dimostrazione dell'alto livello di qualità, specializzazione e capacità sperimentale e tecnologica degli inventori e dell'ente di appartenenza. Con lo sviluppo della fibra biopolimerica a base di caseina è possibile dedurre come le tecniche industriali innovative potrebbero disporre oggi di impianti sempre più flessibili e sostenibili che consentono cicli di produzione brevi (*lean production*) riducendo al minimo l'apporto di materiali ed energia durante le fasi di produzione e limitare gli impatti sull'ecosistema. Inoltre, la sperimentazione vuole dimostrare come l'uso ciclico di materiali di scarto e di demolizione in edilizia non prescinde, però, dall'impiego di risorse provenienti da altri settori produttivi (in questo caso dall'industria casearia). Tale aspetto si tramuta in un potenziale sviluppo di prodotti edilizi innovativi provenienti da lavorazioni industriali di natura diversa costituendo, quindi, un sistema di scambio di risorse configurato secondo una fitta rete di interrelazioni tra architettura, fonti e ricettori di materiali. La ricerca, dunque, si conclude proponendo alcuni dei radicali cambiamenti dei modelli di consumo per la riduzione degli sprechi di materia ed energia (*up-cycling* e *superuse*) nella produzione dei beni e nella riduzione dei rifiuti e delle emissioni nell'ambiente. Affine a questa ricerca - oltre all'aver indagato e sperimentato un materiale prodotto a partire da uno scarto (caseina) - è quello di fornire un presupposto per cui diviene essenziale eliminare il concetto stesso di rifiuto partendo dalla progettazione, impiegando strumenti innovativi di digitalizzazione, sostenibilità, interoperabilità, costruzione 4.0. e *Building Information Modeling*. Il risultato della brevettazione rap-

presenta *tout court* il punto di partenza per un possibile sviluppo extra-dottorale per la fase di prototipazione e validazione del campione brevettato attraverso la partecipazione ad ampio respiro a scenari di sviluppo (bandi nazionali - quali Brevetti+ - ed europei - come EIC Accelerator) che vedano la comparazione di inventori, università, aziende e industria delle costruzioni. Attraverso la stretta collaborazione con gli *stakeholders* sarà possibile recepire le più attuali sperimentazioni sul sistema e, coadiuvando la ricerca con la metodologia adottata, fornire nuovi criteri progettuali per l'applicazione dei diversi sistemi di involucro tradizionali e innovativi, promuovendo una lenta ma efficace transizione ecologica e l'adozione di modelli e processi industriali (*Cradle to Cradle*) nell'ottica di un'economia circolare. Lo sviluppo del prototipo del pannello termoisolante in fibra di caseina, si pone come genesi per l'applicazione di materiali biopolimerici in grado di garantire non solo un processo di dismissione biodegradabile, ma promuovere materiali prodotti da scarti che possano limitare l'utilizzo dei polimeri sintetico-artificiali o comunque, tutti quei materiali inquinanti per l'ambiente e che richiedono un elevato apporto di materia ed energia nell'intero ciclo di vita. L'intento è promuovere - attraverso la sinergia interdisciplinare tra architettura e biologia - nuovi materiali naturali per il sistema involucro; materiali che all'attualità sono ancora allo stadio di prototipazione, ma che costituiscono le fondamenta per una nuova pratica di progettazione integrata e sostenibile in architettura ed in innumerevoli settori, penalizzati dall'impiego di risorse non rinnovabili e inquinanti e da processi tradizionali ormai obsoleti. Un innovativo principio messo a disposizione di professionisti, aziende ed enti pubblici preposti alla tutela e gestione del patrimonio edilizio, i quali avranno la possibilità di poter procedere ad una corretta pratica d'intervento e verifica delle soluzioni costruttive di involucro incontrate secondo i nuovi criteri promossi dalla "legislazione green".



Bibliografia

Capitolo 1 - Evoluzione storica, architettonica e tipologica del sistema facciata

- Acocella A., Il primato della tegola da tetto e Artefatti laterizi e percorsi d'acqua, in *Stile Laterizio II*, Media MD, 2013.
- Acocella A., L'architettura di pietra. Antini e nuovi magisteri costruttivi, Alinea, Firenze, 2004.
- Acocella A., Mattoni quadrati di Roma, in *Stile Laterizio II*, Media MD, 2013.
- Adam J.P., *Roman Building: Materials and Techniques*, Routledge, Londra, 1994.
- Alberti L.B., Bartoli C., L'architettura, Libro VI, Biblioteca Pubblica Bavarese, 1667.
- Algarotti F., *Opere del conte Algarotti*. Edizione novissima, tomo VIII, Carlo Palese, Venezia, 1823.
- Altomonte S., L'involucro architettonico come interfaccia dinamica, Alinea Editrice, Firenze, 2005.
- Anati A. F., *Missione a Malta*. Ricerche e studi sulla preistoria dell'arcipelago maltese nel contesto mediterraneo, Jaca Book, Milano, 1988.
- Apollonio F., Zagnoni S., Gresleri G., *Architettura nelle colonie italiane in Africa*, Collana Rassegna, Compositori Editore, 1992.
- Argan G.C., *Storia dell'arte italiana: da Michelangiolo al Futurismo*, Volume 3, Sansoni, 1988.
- Astrua G., *Manuale completo del capomastro assistente edile*, Hoepli, Milano, ristampa 2006.
- Aula S., *Compendio delle antichità romane*, parte II, Tipografia dell'Aquila di Vincenzo Puzziello, Napoli, 1845.
- Aymonino C. (a cura di), *L'abitazione razionale*. Atti dei Congressi CIAM, Marsilio, Padova, 1971.
- Baciocchi M., La casa isotermica, in *Domus*, n.73, Editoriale Domus, Milano, 1934.
- Bahadori M.N., Il "condizionamento" dell'aria nell'architettura iraniana, in *Le Scienze*, n.116, Aprile 1978.
- Barbisan U., Laner F., *Capriate e tetti in legno*. Progetto e recupero, Franco Angeli, Milano, 2000.
- Bauer C., Ocellini M., Toulhier B., *Maison du Peuple de Clichy*, Fichier international de Do.Co.Mo.-Mo., 2018.
- Beaudouin E., Lods M., Bodiansky, *La maison du Peuple à Clichy*, in *L'Ossature métallique*, n.6, 1939.
- Beccu M., Il rapporto mutevole tra struttura e involucro. Evoluzione del tema della facciata contemporanea, in Beccu M., Spartaco P., *L'involucro architettonico contemporaneo tra linguaggio e costruzione*, Tipografia Ceccarelli, Grotte di Castro, 2008.
- Benedetti C., Bacigalupi V., *Legno e architettura*. Il futuro della tradizione, Kappa.Roma, 1991.
- Benevolo L., *Storia dell'architettura del Rinascimento*, Laterza, Roma-Bari, 1968.
- Benjamin W., Le affinità elettive, in Solmi R. (a cura di), *Angelus Novus*, Einaudi, Torino, 1962.
- Benton T., Pessac and Lège revisited: standards, dimensions and failures, in *Annuaire d'études corbusiennes*, Volume 3, Massilia, 2004.
- Bergdoll B., *European architecture 1750-1890*, Oxford University Press, 2000.
- Bertolazzi A., *Modernismi litici*. Il rivestimento in pietra nell'Architettura Moderna, FrancoAngeli, Milano, 2015.
- Bertolazzi A., Segala I., *La poetica della macchina*. Villa Girasole a Marcellise, in *Open4*. Dalla carta al BIT, esposizione curata dall'Ordine degli Ingegneri di Verona e Provincia, Verona, 2015.
- Bertozzi P., Ghini A., *Le forme della tradizione in architettura*. Esperienze a confronto, Franco Angeli, Milano, 2005.
- Besana E., Mainetti M. (a cura di), *Architetture trogloditiche del Mediterraneo*. Il Villaggio di Douiret, jbel tunisi-no-tripolitano, *Opera Ipogea*, n.2, Società Speleologica Italiana, Erga edizioni, Bologna-Genova, 2000.
- Bisi L., *La casa girevole*, Villa "Il Girasole" a Marcellise, Verona, in *Lotus*, n.40.

- Bixio R., Castellani V., Tipologia delle strutture sotterranee della Cappadocia, in *Le città sotterranee della Cappadocia*, Opera Ipogea, n.1, Società Speleologica Italiana, Erga edizioni, Bologna-Genova, 1995.
- Boesiger W., *Le Corbusier - Œuvre complète 1938-1946*, Birkhäuser Basel, Bâle, 1995.
- Bonelli R., Bozzoni C., Pardo V.F., *Storia dell'architettura medievale. L'Occidente Europeo*, Laterza, Bari, 2009.
- Bonfanti E., Biraghi M., Sabatino M., *Nuovo e moderno in architettura*, Mondadori, Milano, 2001.
- Bonta J.P., Scalvini M.L., *Architettura: interpretazione e sistemi espressivi*, Dedalo, Bari, 1981.
- Bosman J., Oechslin W., *Le Corbusier. Und die Schweiz, Dokumente einer schwierigen, Beziehung*, 1987.
- Bosoni G., *Design italiano*. New York: The Museum of Modern, Ed. 5 Continents Editions, Milano, 2008.
- Bötticher K., *Die Tektonik der Hellenen*, Postdam, 1844-1852, in Dal Co F. (a cura di), *Teorie del moderno*, La-terza, Roma-Bari, 1985.
- Bottoni P., *La standardizzazione dell'abitazione collettiva*, in *Quadrante*, n.29, Edizioni del Milione, Milano, 1936.
- Breyman G.A., *Trattato generale di costruzioni civili con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose guida all'insegnamento ed allo studio di Breyman G.A.: Costruzioni metalliche (costruzioni in ferro)*, Volume 3, Antica casa editrice Dottor Francesco Vallardi, Milano, Torino, Napoli, Firenze, Roma, Bologna, Palermo, Catania, 1853.
- Brogiolo G.P., Cagnana A., *Archeologia dell'architettura. Metodi e interpretazioni*, All'insegna del giglio, Firenze, 2012.
- Brogiolo G.P., *Edilizia residenziale tra V e VIII secolo*, Seminario sul Tardoantico e l'Altomedioevo in Italia Centro-settentrionale (Monte Barro - Galbiate, 2-4 settembre 1993), Mantova, 1994.
- Brookes A.J., Grech C., *Hi-Tech. I dettagli dell'involucro*. BE-MA editrice, Milano, 1992.
- Bruschi G., Faccio P., Maffei S.P., Scaramuzza P., *Il calcestruzzo nelle architetture di Carlo Scarpa. Forme, alterazioni, interventi*, Editrice compositori, Bologna.
- Bucci F., Mulazzani M., Luigi Moretti. *Opere e scritti*, Electa, Milano, 2000.
- Burckhardt J., Ghelardi M., *L'arte italiana del Rinascimento*, Saggi Marsilio, 1995.
- Calderaro V., Fornari F., *La ventilazione degli edifici*, HTE n.90, 1994.
- Capurso G., Martire F., *L'ingegneria Made in Italy alla conquista del Mondo?*, in Iori T., Poretti S. (a cura di), *SIXXI/5. Storia dell'ingegneria strutturale in Italia*, Gangemi, Roma, 2011.
- Carotti A. (a cura di), *Vetro strutturale e facciate continue*, Clup, Milano, 2003.
- Casabella Costruzioni, n.123, Marzo, 1938.
- Cascella P., *Facciate ventilate. Elementi di architettura*, Brianza Plastica, 2019.
- Ceccherini N.L., Sala M., *Tecnologie solari*, Alinea Editrice, Firenze, 1994.
- Choay F., *La città. Utopie e realtà*, Einaudi, Torino, 2000.
- Ciocca G., *Costruiamo le case come macchine*, in *Domus*, n.135, Editoriale Domus, Milano, 1939.
- Cohen J-L., *Architecture du front populaire*, in *Le mouvement social*, n.146, Janvier-mars, 1989.
- Cohen J.L., *The future of architecture since 1889. A worldwide history*, Phaidon, Vienna, 2016.
- Concialdi S., *Architettura digitale = nuova architettura?*, in Greco A., Quagliarini E. (a cura di) *L'involucro edilizio. Una progettazione complessa*, Ar.Tec - Associazione Scientifica per la Promozione dei Rapporti tra Architettura e Tecniche dell'Edilizia, Alinea Editrice, Firenze, 2007.
- Conte A., *La città scavata. Pae-saggio di patrimoni tra tradizione e innovazione*, Gangemi, Roma, 2016.
- Cook P., *Experimental Archi-*

- itecture, Londra, 1970.
- Crippa M. A., Storia dell'architettura: il mondo delle costruzioni e le sue immagini, Jaca Book, Milano.
 - Dal Falco F., Stili del razionalismo. Anatomia di quattordici opere di architettura, Gangemi Editore, Roma, 2016.
 - Davoli P., Architettura senza impianti: aspetti bioclimatici dell'architettura preindustriale, Alinea, Firenze, 1993.
 - De Carlo G., Il risultato di un concorso, in Casabella, n.231, Settembre, 1959.
 - De Cesaris A., Il progetto del suolo-sottosuolo, Collana del Dipartimento di Architettura e Progetto, Gangemi Editore, Roma, 2015.
 - de Cordemoy L.G., Nouveau Traité de toute l'architecture ou l'Art de Bastir, utile aux Entrepreneurs et aux Ouvriers, Parigi, 1706.
 - De Fusco R., Trattato di architettura, Altralinea Edizioni, Firenze, 2018.
 - De Mattia D., Architettura antica e progetto. Dalla Bauforschung al progetto architettonico in area archeologica, Gangemi, Roma, 2013.
 - De Quincy Q., Dizionario storico di architettura, in Farinati V. e Teyssot G. (a cura di), Le voci teoriche, Marsilio, Venezia, 1985.
 - De Quincy Q., Encyclopédie méthodique. Architecture, par M. Quatremere de Quincy. Dédiée et présentée a Monseigneur de Lamoignon, Garde des Sceaux de France, &c. Tome premier, Chez Panckoucke, Parigi, 1788.
 - De Tommasi G., Fatiguso F., L'edilizia a struttura mista dei primi del '900: procedure e interventi per la conservazione e manutenzione, Adda Editore, Bari, 2008.
 - De Vecchi P., Cherchiarì E., I tempi dell'arte, Volume 2, Bompiani, Milano, 1999.
 - Del Francia M., Opere da salvare: architetture livornesi di Vittorio Giorgini, in Architetture Livorno, n.2, Edizioni ETS, Pisa, 2006.
 - della Mirandola G.P., Agnolucci P., Oratio de hominis dignitate. Discorso sulla dignità dell'uomo, DigitalSoul, 2018.
 - Delsante I., Innovazione tecnologica e architettura, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2007.
 - Despois J., Le Djebel Nefousa, Larousse éditeurs, Parigi, 1935.
 - Di Stefano E., L'altro sapere. Bello, Arte, Immagine in Leon Battista Alberti, in Aesthetica Preprint - Supplementa, n.4, Centro Internazionale Studi di Estetica, 2000.
 - Eskilson S., The Age of Glass. A Cultural History of Glass in Modern and Contemporary Architecture, Bloomsbury Publishing, 2018.
 - Esposito D., Tecniche costruttive murarie medievali. Murature 'a tufelli' in area romana. Storia della tecnica edilizia e restauro dei monumenti, L'Erma, Roma, 1998.
 - Esposito D., Tecniche costruttive murarie medievali. Murature 'a tufelli' in area romana, "L'Erma" di Bretschneider, Roma, 1998.
 - Fabiani F., Paribeni E. (a cura di), Archeologia a Massa. Scavi all'ombra di Mercurio, Edizioni nuova cultura, Roma, 2016.
 - Faegre T., Tende. Architettura dei nomadi, Dedalo, 1981.
 - Ferrari L., Angelo Invernizzi: un costruttore, il suo tempo e il dopo, S. Martino Buon Albergo, 2007.
 - Ferrazza G., Il problema del costruire nell'Impero, in Rassegna di architettura, IX, 1937.
 - Focillon H.J., Le forme nella materia, in Vita delle forme, Torino, Einaudi, 1990.
 - Formenti C., Cortelletti R., La pratica del Fabbricare, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1933.
 - Forte M., La villa di Livia. Un percorso di ricerca di archeologia virtuale, L'Erma di Bretschneider, Roma, 2007.
 - Frampton K., De Benedetti M., Tettonica e architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo, Skira, Milano, 2005.
 - Frampton K., Storia dell'architettura moderna, Zanichelli, Bologna, 2008.
 - Frampton K., Studies in Tec-

- tonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture, MIT Press, Cambridge-Massachusetts.
- Galano L., Betti M., Elementi di Statica delle costruzioni storiche in muratura, Esculapio, Bologna, 2019.
 - Gallo C., Architettura bioclimatica. Il raffrescamento passivo: stato dell'arte, in *Protecta*, n.96, Speciale Casam-biente & Sicurezza, 2009.
 - Gallo D., Acito M., Alle radici della storia della Grotta del Sole. Da cava a luogo di produzione di miele e cera, in *Mathera - Rivista trimestrale di storia e cultura del territorio*, anno III, n.8, Antros, Matera, 2019.
 - Gallo D., Fontana A., Foschino F., Paolicelli R., Le neviere di Matera, in *Mathera - Rivista trimestrale di storia e cultura del territorio*, anno III, n.9, Antros, Matera, 2019.
 - Gallo N., Appunti sui castelli della Lunigiana, Volume 3, All'insegna del giglio, Firenze, 2004.
 - Garofalo I., Le Stavkirker norvegesi. Un'architettura, una tecnica, Arti Grafiche Saturnia, Trento, 1992.
 - Gasparini K, Schermi urbani. Tecnologia e innovazione. Nuovi sistemi per le facciate mediatiche, Wolters Kluwer Italia, Milanofiori Assago, 2012.
 - Gayle M., Gayle C., Cast-Iron Architecture in America: The Significance of James Bogardus, W.W. Norton, New York, 1998.
 - Gherzi A., Il cemento armato. Le basi della progettazione strutturale esposte in maniera semplice ma rigorosa, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2020.
 - Giedion S., Spazio, Tempo ed Architettura, Hoepli, Milano, 1989.
 - Giuffré A., Le tipologie murarie classiche, in *Lecture sulla Meccanica delle Murature Storiche*, Edizioni Kappa, Roma, 1991.
 - Gottfried A., Quaderni del Manuale di progettazione edilizia: le strutture, Hoepli, Milano, 2003.
 - Griffini E., Costruzione Razionale della Casa, Hoepli, Milano, 1952.
 - Griffini E., La Costruzione Razionale della Casa, IV Edizione, Hoepli, Milano, 1948.
 - Gropius E., Razionalizzazione nella economia edile, in *Quadrante*, n.24, Edizioni del Milione, Milano, 1935.
 - Gropius W., Architettura integrata, in *Architettura integrata*, Il Saggiatore, Milano, 1963.
 - Gubler J., Viollet-Le-Duc, amoureux des Alpes, in *Construire*, n.56, Losanna, 1979.
 - Haegermann G., Huberti G., Mòli H., Vom Caementum zum Spannbeton, volume 1, Bauverlag, Berlino, 1964.
 - Hartmann K., Bollerey F., 200 Jahre Architektur, Delft, 1987.
 - Heidegger M., Gajani S., Costruire, Abitare, Pensare, Ogni Uomo è Tutti Gli Uomini, 2017.
 - Heidegger M., Vattimo G. (a cura di), Costruire abitare pensare, Laterza, Bari, 1976.
 - Herrmann W., Gottfried Semper. *Electa*, Milano, 1990.
 - Herzog T., Krippner R., Lang W., Atlante delle facciate, Utet, Milano, 2005.
 - Holtz D.R., Caissons in Chicago, School of Civil Engineering, Purdue University, Indiana, 1975.
 - Hooke R., A Description of Helioscopes, And Some Other Instruments, Londra, 1676.
 - Horster M., Brunelleschi und Alberti in ihrer Stellung zur römischen Antike, *Mitteilungen des kunsthistorischen Institutes in Florenz*, XVII, 1973.
 - Hvattum M., The Cult of Origins. In Gottfried Semper and the Problem of Historicism, Cambridge University Press, 2004.
 - Invernizzi A., Fagioli E., Villa Girasole in Marcellise (Verona), in Piacentini M. (a cura di). *Architettura*, Rivista del Sindacato Nazionale Fascista Architetti, fascicolo I, S.A. Fratelli Treves Editori, Milano-Roma, 1936.
 - Iori T., Il Sistema Nervi, in Bianchino G., Costi D. (a cura di) *Cantiere Nervi. La costruzione di una identità. Storie, geografie, paralleli*, Quaderni dello CSAC, Skira, Parma, 2012.
 - Isler H., New Shapes for Shells

- twenty Years After, in *Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 1979, n.71.
- Kind-Barkauskas F., Polònyi S., Kauhsen B., Brandt J., *Atlante del Cemento*, Utet, Torino, 2004.
- Lahuerta J.J., Antoni Gaudi, 1852-1926. *Architettura, ideologia e politica*, Mondadori Electa, Milano, 1992.
- Laugier M.A., *Essai sur l'architecture*, Chez Duchesne, 1753.
- Lauter H., *Fortificazioni della città*, in *L'architettura dell'Ellenismo*, Longanesi, Milano.
- Lauter H., *Materiale e tecnica*, in *L'architettura dell'ellenismo*, Longanesi, Milano, 1999.
- Lavin S., *Quatremère de Quincy and the Invention of a Modern Language of Architecture*, MIT Press, Cambridge - Massachusetts, 1992.
- *Le Corbusier* (Charles-Edouard Jeanneret), *Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme*, Crès et C., Parigi, 1930.
- *Le Corbusier* (Charles-Edouard Jeanneret), *Vers une Architecture*, Arthaud, Parigi, 1923.
- *Le Corbusier*, "Pour chauffer et pour ventiler la salle" e "Pour éclairer la salle", *Une Maison - Un Palais. A la recherche d'une unité architecturale*, Crès, Parigi, 1928.
- Le-Duc V., *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, Tomo V, «Façade», Édition Bance — Morel, 1854-1868.
- Lecce C., *Franco Albini e il progetto dell'effimero (1936-1958): le fonti d'archivio come tracce dell'evoluzione di un metodo*, in *A/I/S/Design: storie e ricerche*, Milano.
- Lenza C., *Architettura e mimesi*, in *Op.cit.*, *Rivista quadrimestrale di selezione della critica d'arte contemporanea*, n.72, Edizioni il centro, 1988.
- Locci M., *Gian Lorenzo Bernini. Scena retorica per l'immaginario urbano*, Testo&Immagine, 1998.
- Loos A., *Das Prinzip der Bekleidung*, Vienna, 1898, in Denti G., Peirone S. (a cura di), *Adolf Loos. Opera completa*, Officina, 1997.
- Loos A., *Ornamento e Delitto*, Adelphi, Milano, 1972.
- Lucchini A., *Le pareti ventilate, collana Manuali dell'Edilizia*, Il Sole 24 Ore, 2000.
- Lugli G., *La tecnica edilizia Romana con particolare riguardo a Roma e Lazio*, Roma, 1957.
- Mariano J. detto il Taccola, *Liber Tertius de ingeneis ac aedifiitiis non usitatis, 1427-1433*, in Beck J.H. (a cura di), *Il Polifilo*, Milano, 1969.
- Martin R., *Architettura*, in Charbonneaux J., Martin R., Villard F., *La Grecia arcaica*, Rizzoli, Milano, 1978.
- Martin R., Ginouves R., *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine*, tomo I, Ecole Française de Rome, Parigi, 1997.
- Masoero A., Miracco R., Poli F., *L'estetica della macchina. Da Balla al futurismo torinese*, Mazzotta, 2004.
- Mc Clung W.A., *The Architecture of Paradise. Survivals of Eden and Jerusalem* (trad. it. *Dimore celesti. L'Architettura del Paradiso*), Il Mulino, Bologna, 1987.
- Michell G., *The Penguin guide to the monuments of India*, Viking, Londra, 1989.
- Milizia F., *Opere complete di Francesco Milizia riguardanti le belle arti*, tomo II, Stamperia Cardinali e Frulli, Bologna, 1827.
- Milizia F., *Principi di architettura civile*, t.1., Tipografia Remondiniana, Bassano 1804.
- Minucci G., *Tecnologie e Ricerche. I metalli leggeri nell'architettura. L'alluminio*, in Piacentini M. (a cura di), *Architettura*, *Rivista del Sindacato Nazionale Fascista Architetti, S.A. Fratelli Treves Editori*, Milano-Roma, 1932.
- Moccia C., *Architettura e costruzione*, in Fagioli M., collana *Theoria*, Aiòn edizioni, Firenze, 2012.
- Moccia C., *Realismo e astrazione e altri scritti*, in Fagioli M., collana *Theoria*, Aiòn edizioni, Firenze, 2015.
- Moretti A., *Muraria Arte*, in Enci-

- clopedia dell'Arte Antica Classica ed Orientale, Poligrafico dello Stato, Roma, 1963.
- Moretti L., Valori della modanatura, in Spazio, n.6, 1951.
 - Morolli G., Le colonne di Alberti tra voluptas e necessitas. Diversità morfologiche ed eziologiche tra columnae rotundae e columnae quadrangulae nelle istituzioni del De re aedificatoria, in Leon Battista Alberti teorico delle arti, tomo II.
 - Moscati S., Enciclopedia archeologica: mondo dell'archeologia, Volume 2, Istituto della enciclopedia italiana, 2002.
 - Musmeci S., Il calcolo elettronico e la creazione di nuove forme strutturali, in M. Zevi (a cura di), Il computer nella progettazione, Bulzoni, Roma, 1972.
 - Musmeci S., Ponte sul Basento a Potenza, in L'Industria italiana del cemento, n. 2, 1977.
 - Nastri M., Involucro e architettura, Maggioli, Santarcangelo di Romagna (Rimini), 2008.
 - Nazzaro G.B., Introduzione al futurismo, Guida, Napoli, 1984.
 - Nervi P.L., Una casa girevole, in Quadrante, n.13, Mondiano, Milano, 1934.
 - Nifosi G., Arte in Opera. Dal Rinascimento al Manierismo, Volume 3, Laterza, Bari, 2016.
 - Nigro L., Ritorno a Gerico. Scavare tra archeologia e leggenda, in Archeo, n.31, De Agostini Periodici.
 - Otto F., Tensile Structures, MIT Press, Cambridge, 1979.
 - Pagano G., Catalogo della VII Triennale di Milano, 1940.
 - Pagano G., L'estetica delle costruzioni in acciaio, in Casabella, nn.68-69.
 - Pagliuca A., Gallo D., Trausi P.P., Il riuso dei materiali bellici in architettura. Le Pierced Steel Plank, in Cascone S.M., Margani G., Sapienza V. (a cura di), Nuovi orizzonti per l'architettura sostenibile, Atti di convegno Colloqui. AT.e Catania 2020, EdicomEdizioni, Catania, 2020.
 - Pagliuca A., Materiali Made in Italy. Avanguardia Italiana nell'industria delle costruzioni del primo '900, Gangemi Editore, Roma, 2019.
 - Pagliuca A., Pelosi M., Le Bubbles per alleggerire le volte in laterizio e gli esempi di. Matera, in ANANKE, n.77, 2016.
 - Palladio A., Elementi di Architettura, A spese Remondini, Bassano, 1803.
 - Palladio A., Elementi di architettura, A spese Remondini, Bassano, 1803.
 - Pane A., L'antico e le preesistenze tra Umanesimo e Rinascimento. Teorie, personalità ed interventi su architetture e città, in Casiello S. (a cura di), Verso una storia del restauro dall'età classica al primo Ottocento, Alinea, Firenze, 2008.
 - Peters N., Prouvé, Taschen, Colonia, 2007.
 - Petrucci A., Industrializzazione dell'edilizia, Dedalo, Bari, 1980.
 - Piacentini M. Architettura d'Oggi, Paolo Cremonese Editore, Roma, 1930.
 - Pizzi E., I sistemi di facciata. Guida alla progettazione. Le guide di Modulo, BE-MA, Milano 1987.
 - Pizzi E., Le costruzioni prefabbricate. Guida alla progettazione. Le guide di Modulo, BE-MA, Milano 1986.
 - Plinio C.S., Historia naturale di C. Plinio Secondo. Nuovamente tradotta di latino in volgare toscano per Antonio Brucioli, Libro Trigesimoquinto, capitolo XIV - De muri formacei, et mattoni, et ragione loro.
 - Poggi C.A., Architettura futurista, Vallecchi, Firenze, 1933.
 - Poretti S., La facciata del Palazzo delle Poste di Napoli e la questione dei rivestimenti lapidei nell'architettura italiana degli anni trenta, in Architettura e Costruzione, nn.84-85.
 - Poretti S., Nervi che visse tre volte, in Iori T., Poretti S. (a cura di), Pier Luigi Nervi. L'ambasciata d'Italia a Brasilia, Electa, Milano, 2008.
 - Prouvé J., Stoullig C., Jean Prouvé, Musée de l'école de Nancy, Musée des beaux-arts, 2012.
 - Ramm E., Heinz Isler - The Priority of Form, in Journal of the In-

- ternational Association for Shell and Spatial Structures, 52, n. 3, 2011.
- Rigone P., *Le facciate continue. La manutenzione dell'involucro vetrato*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2011.
 - Romanelli F., Scapaccino E., *Dalla finestra al curtain wall. Ricerche sulle tecnologie del discontinuo*, Officina Edizioni, Roma, 1979.
 - Rossetti M., Tatano V., *Schermature solari*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2013.
 - Rossi, V., *Orientamenti per l'edilizia: elementi prefabbricati*, in *Atti della Società degli ingegneri e degli architetti - Rassegna Tecnica*, n. 5.
 - Sala M. (a cura di), *Schermature solari*, Alinea Editrice, Firenze, 2000.
 - Salvati M., *L'acciaio nelle costruzioni moderne*, Dedalo, Bari, 1980.
 - Sant'Elia A., *L'Architettura futurista*, Direzione del Movimento Futurista, Milano, 1914.
 - Scamozzi V., Ticozzi S., Masieri L., *L'idea dell'architettura universale, Volume I, Libro III, Coi tipi di Borroni e Scotti successori a Vincenzo Ferrario*, Milano, 1838.
 - Schittich C., *Involucri edilizi. Progetti, strati funzionali, materiali*, in *Detail*, Birkhäuser - Edizioni d'Architettura, Monaco di Baviera, 2003.
 - Semper G., *Der Stil in den technischen und tektonischen Künsten, oder praktische Ästhetik. Ein Handbuch für Techniker, Künstler un Kunstfreunde*, Francoforte, 1860.
 - Semper G., *Die vier Elemente der Baukunst*, Braunschweig, 1851, in *Quitze H. (a cura di), La visione estetica di Semper*, Jaca Book, Milano, 1991.
 - Semper G., *Lo Stile*, Laterza, Bari, 1992.
 - Semper G., *Über architektonische Symbole*, Berlino-Stuttgart, 1884.
 - Semper G., *Über den Ursprung einiger Architekturstile*, Kleine Schriften, 1854.
 - Semper G., *Vergleichende Baulehre*, 1850.
 - Simoncini G., *Ritorni al passato nell'architettura francese fra Seicento e primo Ottocento*, Jaca Book, Milano, 2001.
 - Sinopoli N., Tatano V., *Sulle tracce dell'innovazione. Tra tecniche e architettura*, FrancoAngeli, Milano, 2016.
 - Spadolini P., *Design e tecnologia. Un approccio progettuale alla edilizia industrializzata*, Edizioni Luigi Parma, Bologna, 1974.
 - Spiegel H., *Der Stahlhausbau, Wohnbauten aus Stahl - Leipzig*, Alwin Fröhlich Verlag, 1928.
 - Squicciarino N., *Arte tessile, abbigliamento e architettura in Gottfried Semper*, Armando Editore, 2019.
 - Tafuri M., *Dal Co F., Architettura contemporanea*, Electa, Milano, 1979.
 - Taine H., *Philosophie de l'art, Volume I*, Hachette, Parigi, 1881.
 - Tavoletta C., *La persistenza del trilito*, Altralea edizioni, Firenze, 2016.
 - Tentori F., *De Simone R., Le Corbusier*, Laterza, 1987.
 - Teyssot G., *Mimesis dell'architettura, saggio introduttivo in De Quincy Q., Dizionario storico di architettura*, Marsilio, Venezia, 1985.
 - Tommaselli M., *Guida alle Chiese rupestri del materano*, BMG Editrice, Matera, 1988.
 - Trevisan C., *Per la storia della stereotomia. Geometrie, metodi e costruzioni*, Aracne, Roma, 2011.
 - Ugo V., *Laugier e la dimensione teorica dell'architettura*, Dedalo, Bari, 1990.
 - Vaccaro G., *Edificio per le Poste e Telegrafi di Napoli*, in *Architettura. Rivista del Sindacato Nazionale Fascista Architetti*, n.8, fascicolo VIII, Milano, 1936.
 - Valeriani S., *Monaci, dardi e colonnelli. Genesi e caratteristiche delle capriate italiane*, *Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Cádiz, 2005.
 - Ventriglia U., *La geologia della città di Roma*, Bardi, Roma, 1971.

- Venturi R., Brown S., *Architecture as Signs and Systems: for a Mannerist Time*, Belknap Press, Cambridge, 2004.
- Vierendeel A., *La construction architecturale en fonte, fer et acier*, planche 89, Louvain: A. Uystpruyst, Parigi, 1902.
- Villa C., *Rivestimenti*, Antonio Vallardi Editore.
- Vitellozzi A., *Il nuovo Palazzo postale di Napoli*, in *Edilizia Moderna*, n. 23, Milano, 1936.
- Vitruvio M.P., *De architectura*, Libro II, capitolo VIII.
- Vitruvio M.P., Martini F.d.G., Biffi M., *La traduzione del De architectura di Vitruvio*, Scuola normale superiore, 2002.
- Vitruvio M.P., Orsini B., *Dell'Architettura di M. Vitruvio Pollione*, tomo II, Torchi di Carlo Baduel, Perugia, 1802.
- Vives V.R., Bodoni G., *Saggi sul ristabilimento dell'antica arte de' greci e romani pittori*, tomo I, Stamperia Reale, Parma, 1787.
- Von Busse H-B., Waubke N.V., Grimme R., Mertins J., *Atlante delle Terrazze*, Utet, Torino, 1999.
- Wienke U., *Manuale di bioedilizia*, DEI, Roma, 2000.
- Winkelmann J. J., *Storia dell'Arte nell'antichità*, Abscondita, 2007.
- Zappone C., *La serra solare*, Sistemi Editoriali SE, Napoli, 2005.
- Zevi L., *Il Manuale del Restauro Architettonico*, Sez.C., Mancosu Editore, Roma, 2008.
- Zorzi L., *Intonachi, pavimenti, rivestimenti nella moderna edilizia*, Edizioni Tecniche Utilitarie, Bologna, 1935.
- tettonico come interfaccia dinamica: strumenti e criteri per una architettura sostenibile, Firenze, ALINEA, 2004.
- Beesley P., Hirose S., Ruxton J., Trankle M., Turner C., *Responsive Architectures: Subtle Technologies*, Riverside Architectural Press, 2006.
- Boaga G. (a cura di) *L'involucro architettonico. Progetto, degrado e recupero della qualità edilizia*, Masson editoriale Esa, Milano, 1994.
- De Santoli L., Mariotti M., *La ventilazione naturale*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2011.
- Francese D., *Architettura bioclimatica. Risparmio energetico e qualità della vita nelle costruzioni*, UTET, Torino, 1996.
- Franco G., *L'involucro edilizio. Guida alla progettazione e manutenzione delle chiusure verticali portate e portanti*, EPC Libri, Roma, 2003.
- Gaspari J., Trabucco D., Zannoni G., *Involucro edilizio e aspetti di sostenibilità. Riflessioni sul comportamento energetico di pareti massive e stratificate iperisolate: performances ambientali ed embodied Energy*, Franco Angeli, Milano, 2010.
- Greco A., Quagliarini E. (a cura di) *L'involucro edilizio. Una progettazione complessa*, Ar.Tec - Associazione Scientifica per la Promozione dei Rapporti tra Architettura e Tecniche dell'Edilizia, Alinea Editrice, Firenze, 2007.
- Grosso M., *Il raffrescamento passivo degli edifici*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2011.
- Herzog T., Krippner R., Lang W., *Atlante delle facciate*, Utet, Milano, 2005.
- Kroll L., Cavallari L., *Ecologie urbane*, Franco Angeli, Milano, 2011.
- Loonen R.C.G.M., Rico-Martinez J.M., Favoino F., Brzezicki M., Menezes C., La Ferla G., Aelenei L.L., *Design for façade adaptability: Towards a unified and systematic characterization*, in 10th Conference on Advanced Building Skins, 3-4 Novembre 2015,

Capitolo 2 - Il sistema involucro: connettivo tra forme costruttive tradizionali ed innovative strategie di sviluppo prestazionale e sostenibile

- Aelenei L., Aelenei D., Romano R., Mazzucchelli E.S., Brzezicki M., Rico-Martinez J.M., *Case Studies - Adaptive Facade Network*, COST European Cooperation in Science and Technology, TU Delft Open, 2018.
- Altomonte S., *L'involucro archi-*

- Berna, Svizzera.
- Malgarini E.B., Coperture Discontinue a grandi elementi, BE-MA editrice, Milano, 1993.
 - Mazzucchelli E.S., “L’involucro di edifici complessi: aspetti progettuali e costruttivi”, in Modulo n.415, BE-MA Editrice, Milano, Ottobre 2018.
 - Messana R., Capire il comfort, Tecniche Nuove, Milano, 2011.
 - Moranti S., Rosatelli A., Serramenti e sistema di facciata, La Nuova Italia Scientifica, Roma.
 - Opici M.A., Facciate continue, Tecnomedia, Milano, 1990.
 - Paganin G., Guida alle tecniche di costruzione. Strutture e involucro, volume 2, Sistemi editoriali, Gruppo Editoriale Esselibri – Simone, Napoli, 2006.
 - Pastori S., Mereu R., Mazzucchelli E.S., Passoni S., Dotelli G., “Energy Performance Evaluation of a Ventilated Façade System through CFD Modeling and Comparison with International Standards”, *Energies* 2021, 14, 193.
 - Sampaolesi R., Facciate strutturali, in *Aprire*, n.10, 1990.
 - Stefanazzi A., Mazzucchelli E.S., Lucchini A., Teoria e progettazione delle coperture discontinue, Edicom Edizioni, 2020.
 - Sterk T., Using Actuated Tensegrity. Structures to Produce a Responsive Architecture, ORAMBRA, 2009.
 - Tucci F., Ecoefficienza dell’involucro architettonico, Editrice Dedalo, Roma, 2012.
 - Weismantle P., Thompson K., Torrem E., Façade Access & Maintenance for High-Rise Buildings, CTBUH Technical Guides, Chicago, 2018.
- Capitolo 3 - Sperimentazione di una lana isolante a matrice biopolimerica in fibra caseinica applicata per l’isolamento term-acustico in edilizia**
- Andreson P., Storia d’Europa, volume 1, Giulio Einaudi Editore, 1996.
 - Atkins P., Loretta J., Principi di chimica, Zanichelli, 2005.
 - Brown W.H., Poon T., Introduzione alla chimica organica, EdiSES, Napoli, 2006.
 - Bruice P.Y., “Chimica Organica”, EdiSES, 2005.
 - Curran M., Environmental Life-Cycle Assessment, McGraw-Hill Education, 1996.
 - Dal Falco F., Materiali e tipi autarchici. La cultura del prodotto tra industria e artigianato nell’Italia dei primi anni Quaranta, in *AIS/Design Storia e Ricerche*, n.4, Novembre, 2014.
 - Damodaran S., Parkin K.L., Fennema O.R., “Amino acids, peptides and proteins”, in Damodaran S., Parkin K.L., Fennema O.R. (a cura di), “Fennema’s food chemistry”, CRC press, New York, 2007.
 - De Kruif C.G., Holt C., Casein micelle structure, function and interactions, in Fox P.F., McSweeney P.L.H. (a cura di), *Advanced Dairy Chemistry. Proteins*, Kluwe Academic, Plenum Publishers, New York, 2003.
 - Finessi B., Il design italiano oltre la crisi. Autarchia, austerità, autoproduzione, Corraini, Mantova, 2014.
 - Frassine R., Levi M., Marano C., Rink M., “Struttura e proprietà dei materiali polimerici”, in Del Curto B., Marano C., Pedferri M. (a cura di), “Materiali per il Design”, Casa Editrice Ambrosiana, Rozzano (Milano), Settembre 2015.
 - Gentile E., Fascismo. Storia e interpretazione, Laterza, Bari, 2002.
 - Giudici O., La rifinitura dei tessuti di lana e dei tessuti autarchici, Hoepli, Milano, 1944.
 - Horne D.S., Davidson C.M., Influence of heat treatment on gel formation in acidified milks. Protein and fat globule modification, in *Proceedings of IDF Seminar*, 1993.
 - Lavagna M., Mondini D., Paleari M. Murature ad alte prestazioni. Valutazioni termiche, acustiche, ambientali ed economiche di soluzioni di involucro in laterizio, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2011.
 - Luniak B., The identification of textile fibres. Qualitative and

quantitative analysis of fibre blends, Sir Isaac Pit-man & Sons Ltd., Londra, 1953.

- Marinetti F.T., Il poema del vestito di latte, Ufficio Propaganda della SNIA Viscosa (Officine grafiche Esperia), Milano, 1937.
- McClements D., "Food emulsions: principles, practices and techniques", CRC press.
- Minucci G., Isolamento acustico degli edifici, in Notiziario tecnico del periodico Architettura e Arti Decorative: ri-vista d'arte e di storia, n.14, vol.1, Organo del sindacato nazionale Architetti, Betetti e Tumminelli, Milano-Roma, 1931.
- Munari B., La lana, in La rivista illustrata del popolo d'Italia, n.4, Aprile 1936, Alfieri & Lacroix, Milano.
- Pagliuca A., L'architettura del grano a Matera: il Mulino Alvino. Frammenti di tecnologie costruttive del '900, Gangemi Editore, Roma, 2016.
- Quaglierini C., "Chimica delle fibre tessili", Zanichelli, Bologna, 2012.
- Rivista Sapere, fascicolo n.153, Milano, Maggio 1941, Hoepli, Milano, 1941.
- Rivista Sapere. Quindicinale di divulgazione del 15 Marzo 1937, Hoepli, Milano.
- Ruzzenenti M., L'Autarchia verde. Un involontario laboratorio della green economy, Jaca Book, Milano, 2011.
- Slattery C.W., Evard R., A model for the formation and structure of casein micelles form subunits of variable composition, Acta.
- Smith W.F., "Scienza e tecnologia dei materiali", McGraw-Hill, Milano, 1993.
- Vezzoli C., Veneziano R., "Pratiche sostenibili. Itinerari del design nella ricerca italiana", Alinea Editrice, Firenze, 2009.
- Walstra P., Physical Chemistry of Foods, CRC Press, 2002.
- Zavarella V., Leti E., Veggetti P., "Progettazione, costruzioni e impianti", volume 1 - approfondimenti, Zanichelli, 2012.

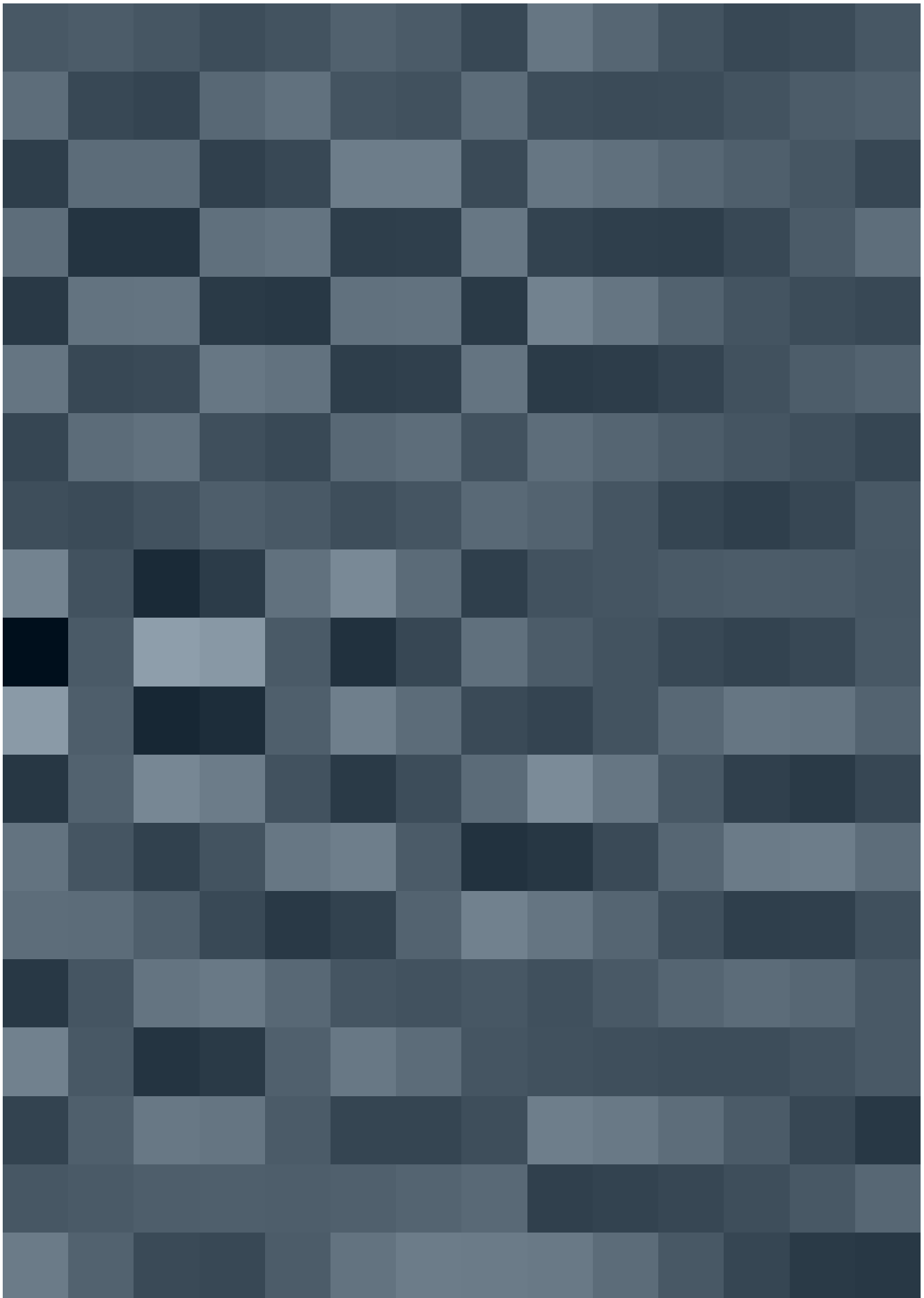
Capitolo 4 - Analisi matriciale comparativa tra la fibra biopolimerica a base di caseina e gli isolanti convenzionali e di nuova generazione

- Argiolas C., Tecnologie per l'involucro, University Press. Architettura 3, CUEC, Cagliari, 2001.
- Baird G., Alcorn A., Haslam P., The energy embodied in building materials – update New Zealand coefficients and their significance, IPENZ Transactions, volume 24, n.1/CE.
- Benedetti C., "Materiali isolanti. Appunti per la progettazione e la posa in opera", in Benedetti C. (a cura di), "Guide pratiche del Mater CasaClima", 3a edizione, bu,press, Università di Bolzano, Bozen-Bolzano, 2014.
- Bertolotti G., Capitelli V., Dizionario delle materie plastiche, Tecniche Nuove, Milano, 2007.
- Beverina L., Futuro materiale. Elettronica da mangiare, plastica biodegradabile, l'energia dove meno te l'aspetti, Il Mulino, 2020.
- Block K., Introduction to Energy Analysis, Techne Press, Amsterdam, 2007.
- Butera F.M., Dalla caverna alla casa ecologica. Storia del comfort e dell'energia, Edizioni Ambiente, Milano, 2004.
- Campioli A., Lavagna M., L'involucro edilizio nella costruzione sostenibile, in Gaspari J. (a cura di), Sfide per una dimensione sostenibile del costruire. Contributi sull'uso dell'energia in architettura, Edicom Edizioni, Monfalcone, 2009.
- Capuano A., Iconologia delle facciate nell'architettura italiana, Gangemi Editore, Roma, 1995.
- Carria F., La manutenzione delle facciate. Tecnologie e metodi di conservazione, BE-MA editrice, Milano, 1999.
- Carria F., Le facciate: tecniche e materiali per il recupero, BE-MA editrice, Milano, 1994.
- Casini M, Smart Building Involucro 2.0., DEI, Roma, 2014.
- Colafranceschi D., Architettura in superficie. Materiali, figure e tecnologie delle nuove facciate

- urbane, Gangemi Editore, Roma, 1995.
- Croce S. (a cura di), Coperture ad alte prestazioni, Rockwool Italia, Milano, 2008.
 - D'Olimpio D., Il Retrofitting energetico e bioclimatico nella riqualificazione edilizia. Tecnologie e soluzioni tecniche per il miglioramento della prestazione energetico-ambientale degli edifici, Legislazione Tecnica, Roma, 2017.
 - D'Olimpio D., La progettazione del Microclima Urbano, Edizioni Kappa, Roma, 2008.
 - Di Sivo M., La parete e la finestra. Architettura e tecnologia delle connessioni tra innovazione e tradizione, Alinea, Firenze, 1997.
 - Direttiva Europea 2008/98/EC, Waste Framework Directive.
 - Fabbri K., Conti M., Progettazione energetica dell'architettura, DEI, Roma, 2008.
 - Faragò F., Manuale pratico di edilizia sostenibile. In: Scudo G., Grosso M. (a cura di), Progettazione ecologica, Sistemi Editoriali, Cercola (Napoli), 2008.
 - Francese D., "Architettura bioclimatica. Risparmio energetico e qualità della vita nelle costruzioni", Utet, Torino, 1996.
 - Francese D., Architettura bioclimatica. Risparmio energetico e qualità della vita nelle costruzioni, UTET, Torino, 1996.
 - Frigione G., Mairo N., Materiali per l'edilizia. Una guida ai materiali strutturali, ausiliari e di rivestimento, Hoepli, Milano, 2006.
 - Garzia C. (a cura di), L'industria italiana dell'involucro edilizio, UNCSAAL, Aedilmedia, Milano, 2007.
 - Gropius W., Architettura integrata. il Saggiatore, Milano, 2010.
 - Grosso M., Il raffrescamento passivo degli edifici, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2011.
 - Guerri Sorbetti F., Barbari M., L'edilizia rurale tra sviluppo tecnologico e tutela del territorio, in Convegno della II Sezione AIIA, Firenze, 20-22 settembre 2012, Firenze University Press.
 - Imperadori M., Le procedure struttura/rivestimento per l'edilizia sostenibile, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 1999.
 - Lavagna M., Mondini D., Paleari M., Murature ad alte prestazioni. Valutazioni termiche, acustiche, ambientali ed economiche di soluzioni di involucro in laterizio, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2011.
 - Legambiente, rapporto dell'Osservatorio Recycle - Legambiente, 100 Materiali per una nuova edilizia, 2016.
 - Liangyong W., Architettura integrata. A General theory of architecture, Edizioni Nuova Cultura, Roma, 2013.
 - Lucchi E., Riqualificazione energetica dell'involucro edilizio. Diagnostica e interventi, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2014.
 - Lucchini A. (a cura di), Pareti ventilate ad alte prestazioni. Teoria e soluzioni, Rockwool Italia, Milano, 2013.
 - Lucchini A., Conoscere più in dettaglio le pareti ventilate, in Costruire in Laterizio, n.113/2006, Gruppo Editoriale Faenza Editrice, Faenza, 2006.
 - Lucchini A., Integrazione e automazione delle funzioni impiantistiche, Edizioni Il Sole 24 Ore - SAIE, Milano, 2001.
 - Lucchini A., Le coperture innovative, Il Sole 24 Ore, Milano, 2000.
 - Lucchini A., Mazzucchelli E.S., Stefanazzi A., Rivestimenti a cappotto ad alte prestazioni. Teoria e soluzioni, Rockwool, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (Milano), 2017.
 - Lucchini A., Mazzucchelli E.S., Stefanazzi A., Tattoni S., Aspetti strutturali dei rivestimenti di facciata, ARTEC Congress 2016, Matera, 2016.
 - Malighetti L., Recupero edilizio e sostenibilità, Il Sole 24 Ore, Milano, 2004.
 - Mazzucchelli E.S., Edifici ad energia quasi zero - Materiali, tecnologie e strategie progettuali per involucri e impianti innovativi ad alte prestazioni, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2013.
 - Mazzucchelli E.S., Edifici ad

- energia quasi zero. Materiali, tecnologie e strategie progettuali per involucri e impianti innovativi ad alte prestazioni, Maggioli, Santarcangelo di Romagna (Rimini), 2013.
- Mazzucchelli E.S., Facciate adattive, The Next Building Year II n. 2, DBInformation SpA, Milano, 2017.
 - Mazzucchelli E.S., L'involucro di edifici complessi: aspetti progettuali e costruttivi, Modulo, BE-MA Editrice, n. 415, Milano, 2018.
 - Mazzucchelli E.S., Lucchini A., Stefanazzi A., Energy refurbishment of building facades: strategies and examples of intervention, proceedings of the Congress Reuso, 2019, Matera.
 - Mazzucchelli E.S., Sistemi costruttivi in legno – Tecnologie, soluzioni e strategie progettuali verso edifici Zero Energy], Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2016.
 - Oberti I., Prodotti edilizi per edifici ecocompatibili, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2014.
 - Oxman N., Material Ecology, MoMA - Museum of Modern Art, New York, 2020.
 - Sala M. (a cura di), Recupero edilizio e bioclimatica, Sistemi Editoriali SE, Napoli, 2001.
 - Sala M. (a cura di), Tecnologie bioclimatiche in Europa, Alinea Editrice, Firenze, 1994.
 - Scalisi F., Nanotecnologie in edilizia, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2010.
 - Spagnolo M. (a cura di), Efficienza energetica nella progettazione, DEI, Roma, 2007.
 - Spiga M., Efficienza energetica e termofisica dell'edificio, Società Editrice Esculapio, Bologna, 2018.
 - Trevisi A.S., Perago A., Laforgia D., Ruggiero F., Efficienza energetica in edilizia, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2007.
 - Tucci F., Involucro ben temperato: efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici con 50 casi studio, Alinea, Firenze, 2006.
 - Zambelli E. (a cura di), Ristrutturazione e trasformazione del costruito, Il Sole 24 Ore, Milano, 2004.
 - Zambelli E., Imperadori M., Vannoncini P.A., Costruzione stratificata a secco: tecnologie innovative e metodi per la gestione del progetto Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 1998.
- Capitolo 5 - Applicazioni sperimentali della fibra a matrice biopolimerica a base di caseina per l'isolamento termico e acustico dell'involucro edilizio**
- Capitolo 6 - Brevettazione, prototipazione e strategie di integrazione della fibra biopolimerica di caseina nel mercato dei materiali a 'complessità controllata' e degli innovativi sistemi di involucro architettonico**
- Altamura P., Costruire a zero rifiuti. Strategie e strumenti per la prevenzione e l'upcycling dei materiali di scarto in edilizia, Franco Angeli, Milano, 2016.
 - Balloi A., Barbieri M., Colombo B., Pannofino D., Silipigni F., Proprietà intellettuale per Start-up. Come un brevetto, un marchio o un disegno industriale possono cambiare la vita della tua Start-up, Fondazione Politecnico di Milano, Politecnico di Milano (Ufficio Trasferimento Tecnologico), PoliHub, Milano, 2019.
 - Faresin A., Architettura in calcestruzzo. Soluzioni innovative e sostenibilità, Utet, Torino, 2012.
 - Manzini E., Artefatti. Verso una nuova ecologia dell'ambiente artificiale, Domus Academy, 1989.
 - Manzini E., La materia dell'invenzione, Arcadia, Milano, 1986, pag.24.
 - Melone L., Rossi B., Pastori N., Panzeri W., Mele A., Punta, C., TEMPO-Oxidized Cellulose Cross-Linked with Branched Polyethyleneimine: Nanostructured Adsorbent Sponges for Water Remediation, ChemPlusChem 2015.
 - Nardi G., Le nuove radici antiche.

- Saggio sulla questione delle tecniche esecutive in architettura, Franco Angeli, Milano, 1990.
- Osterwalder A., Pigneur Y., Business Model Generation. A Handbook for Visionaries, Game changer and Challengers, John Wiley & Sons, 2010.
 - Rubini L., Sangiorgio S., Le Noci C., Il nuovo edificio green. Soluzioni per il benessere abitativo e l'efficienza energetica, Hoepli, Milano, 2016
 - Smith R., Free M., The Great Disruption. Competing and Surviving in the Second Wave of the Industrial Revolution, St. Martin's Publishing Group, 2016.
 - Tentori F., De Simone R., Le Corbusier, Laterza, 1987.
 - Vitta M., La materia manipolata, Arca Edizioni, 1998.
 - Wackernagel M., Rees W.E., Testemale P., Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth, New Society Pub, 1995.



Ringraziamenti

Aver potuto realizzare questa ricerca è un obiettivo significativo e, al tempo stesso, un punto di partenza per il prosieguo di un percorso ancora in itinere. Di questo ringrazio il Professore Antonello Pagliuca che ha sempre rappresentato la mia motivazione culturale, scientifica e formativa. L'entusiasmo e l'impegno che ho mantenuto durante il mio lavoro di tesi trovano giustificazione nella sapiente direzione da egli profusa.

Ringrazio immensamente il Professore Angelo Lucchini e il Professore Enrico Sergio Mazzucchelli per avermi guidato con rigore scientifico e spirito critico nel mio percorso di ricerca con preziosi consigli e costruttivi confronti.

Un sentito ringraziamento è rivolto al Professore Mauro Fiorentino - Coordinatore del dottorato di ricerca - e a tutta la struttura organizzativa universitaria e di dipartimento, in modo particolare la Dott.ssa Loredana Bianco per la solerzia nell'organizzare e comunicare le attività di dottorato. Devo altresì ringraziare la Dott.ssa Maria Rosa Anna Piro (Unibas), la Dott.ssa Barbara Colombo (Polimi) e Fabien Bousicault (GLP) nell'averci guidato con professionalità nelle farragino-se attività di deposito del brevetto.

Un ringraziamento speciale è rivolto a Giuseppe Acito (già amministratore unico dell'azienda finanziatrice della borsa) per avermi dato supporto economico e morale nell'approfondire molteplici tematiche all'interno dell'azienda, nonché fare incetta delle sue sempre appropriate virtù. Vorrei, inoltre, esprimere la mia immensa gratitudine ai miei amici e colleghi Giuseppe D'Angiulli, Pier Pasquale Trausi, Vanessa Tancredi e Rosanna Piergianni che nel corso di questi tre anni non hanno mai smesso di incoraggiarmi, dimostratisi persone vere e sincere sia nei momenti felici che nelle difficoltà che ci hanno accomunati. Con immenso piacere, ricordo tutte le giornate ricche di sorrisi, gioie ed emozioni che abbiamo vissuto insieme.

Il ringraziamento più grande va sicuramente a Marica Acito, madre dei miei figli e meta inesauribile di incoraggiamento, conforto e confronto. Il valore del suo sentimento è la somma dei sacrifici da lei espletati quotidianamente come madre e amore per garantirmi il raggiungimento dei miei obiettivi. A lei e ai miei due splendidi figli, Edoardo e Vittoria dedico questa tesi, ai quali spero di trasmettere la mia curiosità e dedizione per le cose.

Alla fine di questa fase del mio percorso formativo così lungo e laborioso, esprimo la mia più sincera e affettuosa gratitudine a Pino, Angela e Cristina. A loro ed in modo particolare ad Angela devo il prezioso tempo e sostegno che mi ha permesso di raggiungere questo importante obiettivo.

Infine, non so se trovo le parole giuste per ringraziare i miei genitori e la mia famiglia, però vorrei che questo mio traguardo fosse un premio anche per loro e per i sacrifici che hanno fatto.

Inoltre vorrei esprimere la mia sincera gratitudine a Don Domenico Giacobelli, Enrica Maria Laveglia e a tutti coloro che hanno contribuito a rendere piacevole questo percorso di studi.



Il rapporto tra umanità e materia ha plasmato secoli di storia dell'architettura e dell'*ars costruendi*, mutevole in relazione al tipo di ambiente, della condizione geomorfologica e del *genius loci*.

Sin dalla preistoria l'umanità ha inventato - attraverso empirismi e nuove tecniche - materiali, strumenti e architetture sempre più sofisticati e rispondenti alle esigenze abitative. Nel paesaggio evocativo della «civiltà delle macchine» del XX secolo, avviene un profondo mutamento dell'abitare moderno che scardina e rinnova l'uso razionale e scientifico della materia. I nuovi materiali quali il vetro, i conglomerati cementizi e le leghe metalliche rivoluzioneranno il linguaggio architettonico, introducendo il «mito della leggerezza» e la scissione tra struttura e sistema involucro. Solo con le attuali conoscenze l'umanità è giunta a governare la materia nella sua struttura molecolare; un traguardo che determina la transizione da una «complessità controllata» - in cui l'obiettivo era quello di produrre materiali perfetti, privi di impurità e anisotropie - ad una «complessità gestita», nella quale anisotropie ed impurità vengono progettate appositamente per ottenere prestazioni molto precise che fanno sì che i materiali avanzati assomiglino ai materiali organici naturali per una perfetta sinergia tra organismo ecosostenibile e ambiente.

Tra le numerose istanze e campi di sviluppo, la ricerca approfondisce la tematica degli involucri innovativi - **Innovative Building Envelope** mediante l'applicazione di materiali biopolimerici alla scala edilizia per l'isolamento termico e acustico di organismi ecosostenibili.

Si indagano, quindi, le potenzialità di applicazione dei materiali biopolimerici nel settore delle costruzioni, in grado di garantire non solo un processo di dismissione biodegradabile, ma promuovere materiali prodotti da scarti che possano limitare l'utilizzo dei polimeri sintetico-artificiali o comunque, tutti quei materiali altamente inquinanti per l'ambiente e che richiedono un elevato apporto di materia ed energia nell'intero ciclo di vita.

L'intento è promuovere il concetto di **Material Ecology** attraverso la sinergia tra architettura e biologia sperimentando materiali eco-compatibili per il sistema involucro; materiali che all'attualità sono ancora allo stadio di prototipazione ma che costituiscono le fondamenta per una nuova pratica di progettazione integrata e sostenibile in architettura ed in innumerevoli settori penalizzati dall'impiego di risorse non rinnovabili e inquinanti e da processi produttivi e costruttivi obsoleti.

Università degli Studi della Basilicata

Dottorato di ricerca in:

Cities and Landscapes: Architecture, Archaeology,
Cultural Heritage, History and Resources - XXXIV Ciclo