UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA BASILICATA

SEDE DI MATERA

Dipartimento per l'Innovazione Umanistica, Scientifica e Sociale

Dottorato di Ricerca in:

"Cities and Landscapes: Architecture, Archaeology, Cultural Heritage, History and Resources "

STRUMENTI E METODI INNOVATIVI PER LA MANUTENZIONE PREVENTIVA E PROGRAMMATA PER LA CONSERVAZIONE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Settore Scientifico-Disciplinare

"CEAR-08/A - Architettura Tecnica"

Coordinatrice del Dottorato:

Prof.ssa Arch. Antonella Guida

Dottoranda:

Dott.ssa Cristina Rinaldi

Relatori:

Prof.ssa Arch. Antonella Guida

Prof.ssa Ing. Graziella Bernardo

CICLO XXXVIII

Alle scelte future,
fatte con il cuore!

ABSTRACT

La presente ricerca propone un approccio metodologico integrato per il risanamento del patrimonio architettonico affetto da umidità di risalita capillare, con lo scopo di fornire strumenti operativi per la manutenzione preventiva e programmata degli edifici.

Il lavoro è stato sviluppato nell'ambito di una borsa di dottorato industriale (D.M. 352/22, PNRR) in collaborazione con l'Università degli Studi della Basilicata e il Gruppo Leonardo Solutions s.r.l.-Domodry. La tecnologia CNT®-Domodry® è stata valutata criticamente all'interno di protocolli pilota con verifiche misurabili.

La metodologia combina una prima parte sul quadro teorico dei meccanismi di trasporto dell'acqua nei materiali da costruzione e delle tecniche di risanamento ed una seconda parte che traduce il quadro in sperimentazioni progettuali e verifiche operative su casi studio per la proposta di best practices per il risanamento del patrimonio architettonico, di una "Scheda Tipo" interoperabile e le specifiche per una Open Knowledge Platform Tool finalizzate alla standardizzazione dei metadati, alla comparabilità dei dataset e all'adozione di protocolli ripetibili.

Il principale contributo è la formalizzazione di una sequenza diagnostico-operativa e di strumenti digitali che facilitano il confronto tra casi; i limiti riguardano numero e variabilità dei casi e l'orizzonte temporale dei monitoraggi, per i quali si raccomandano ampliamenti sperimentali.

INDICE

INTRODUZIONE 001

PARTE I - QUADRO GENERALE E STATO DELL'ARTE

1 L'EDIFICIO COME ORGANISMO EDILIZIO 006

1.1 La scomposizione dell'organismo edilizio 010

1.2 La conservazione del patrimonio architettonico 014

1.3 Il progetto di restauro e risanamento 018

2 TIPOLOGIE DI UMIDITÀ NELLE COSTRUZIONI 022

2.1 Umidità da costruzione 026

2.2 Umidità meteorica o da infiltrazione 030

2.3 Umidità accidentale 032

2.4 Umidità da condensazione 034

2.5 Umidità da terrapieno 038

2.6 Umidità da risalita capillare 040

2.6.1 Cause della risalita capillare 042

2.6.1.1 Condizioni climatiche, ambientali e geologiche 043

2.6.1.2 Presenza di sali solubili 044

2.6.1.3 Caratteristiche dell'edificio e proprietà dei materiali da costruzione 045

2.6.2 Effetti della risalita capillare 046

2.6.2.1 Degrado fisico e chimico 047

2.6.2.2 Degrado biologico 055

2.6.2.3 Impatti igienico-sanitari 056

2.6.2.4 Impatti sul patrimonio culturale 056

3 MECCANISMI DI TRASPORTO DELL'ACQUA NEI MATERIALI DA COSTRUZIONE 058
3.1 Porosità 062
3.2 Trasporto dell'umidità: fondamenti fisici 068
3.2.1 Tensione superficiale, angolo di contatto e menisco 069
3.2.2 Adescamento 071
3.3 Meccanismi di assorbimento 074
3.3.1 Capillarità 075
3.3.1.1 Legge di Jurin 077
3.3.1.2 Modello di Hall-Hoff 079
3.3.1.3 Modelli chimico-fisici: doppio strato elettrico 081
3.3.2 Igroscopicità 082
3.4 Modelli di flusso nei mezzi porosi 086
3.4.1 Flusso saturo 087
3.4.2 Flusso insaturo 088
4 TECNICHE CONTRO LA RISALITA CAPILLARE 092
4.1 Scelta e progettazione degli interventi 094
4.1.1 Criticità metodologiche 095
4.1.2 Classificazione delle tecniche d'intervento 098
4.2 Strategie storiche contro l'umidità da risalita capillare 102
4.3 Interventi che limitano o bloccano il flusso d'acqua in ingresso 106
4.3.1 Interventi meccanici 107
4.3.1.1 Cuci-scuci 107
4.3.1.2 Metodo di Koch 110
4.3.1.3 Impermeabilizzazione delle strutture controterra 112

4.4.1.4 Taglio meccanico 114
4.3.2 Interventi chimici 122
4.3.2.1 Metodo di applicazione 123
4.3.2.2 Vantaggi 129
4.3.2.3 Limiti e criticità 130
4.4 Interventi evaporativi 132
4.4.1 Interventi di drenaggio 133
4.4.1.1 Drenaggio perimetrale e sistemi di captazione esterni 133
4.4.1.2 Vespaio aerato e soluzioni orizzontali di drenaggio 136
4.4.2 Sifoni atmosferici 138
4.4.2.1 Metodo di applicazione 139
4.4.2.2 Vantaggi 139
4.4.2.3 Limiti e criticità 139
4.4.2.4 Varianti 140
4.4.3 Ventilazione 141
4.4.3.1 Intercapedini ventilate 141
4.4.4 Intonaci risananti 143
4.4.4.1 Tipologie 144
4.4.4.2 Metodo di applicazione 147
4.4.4.3 Vantaggi 148
4.4.4.4 Limiti e criticità 148
4.5 Interventi elettrofisici 150
4.5.1 Metodi elettrocinetici 152
4.5.1.1 Elettrosmosi attiva 154
4.5.1.2 Deumidificazione elettrochimica 158
4.5.1.3 Elettrosmosi foresi 159
4.5.2 Metodi elettromagnetici 161

4.5.3 Metodi geomagnetici 165
4.5.4 Metodi a energia potenziale naturale (o elettrostatici) 166
4.6 Interventi palliativi di mitigazione 170

PARTE II - SPERIMENTAZIONI PROGETTUALI E VERIFICHE OPERATIVE

5 ANALISI DEI CASI STUDIO 176
5.1 Castello di San Basilio, Pisticci (MT) 180
5.1.1 Analisi del contesto 182
5.1.1.1 Contesto territoriale 182
5.1.1.2 Evoluzione storica e architettonica 183
5.1.2 Diagnosi preliminare 185
5.1.2.1 Metodologia diagnostica 185
5.1.2.1 Stato di conservazione 187
5.1.3 Il progetto di risanamento 190
5.1.4 Risultati 190
5.1.4.1 Monitoraggio post-intervento 190
5.1.4.2 Considerazioni finali 192
5.2 Chiesa di San Pietro Barisano, Matera (MT) 194
5.2.1 Analisi del contesto 196
5.2.1.1 Contesto territoriale 196
5.2.1.2 Evoluzione storica e architettonica 199
5.2.2 Diagnosi preliminare 201
5.2.2.1 Metodologia diagnostica 201
5.2.2.1 Stato di conservazione 203

5.2.3 Il progetto di risanamento 205
5.2.4 Risultati 209
5.2.4.1 Monitoraggio post-intervento 209
5.2.4.2 Considerazioni finali 211
5.3 Chiesa di San Francesco D'Assisi, Matera (MT) 214
5.3.1 Analisi del contesto 216
5.3.1.1 Contesto territoriale 216
5.3.1.2 Evoluzione storica e architettonica 216
5.3.2 Diagnosi preliminare 218
5.3.2.1 Metodologia diagnostica 218
5.3.2.1 Stato di conservazione 219
5.3.3 Il progetto di risanamento 220
5.3.4 Risultati 223
5.3.4.1 Monitoraggio post-intervento 223
5.3.4.2 Considerazioni finali 224
5.4 Castello dei Conti Carafa, Colobraro (MT) 226
5.4.1 Analisi del contesto 228
5.4.1.1 Contesto territoriale 228
5.4.1.2 Evoluzione storica e architettonica 229
5.4.2 Diagnosi preliminare 233
5.4.2.1 Metodologia diagnostica 233
5.4.2.1 Stato di conservazione 236
5.4.3 Il progetto di risanamento 240
5.4.4 Risultati 252
5.4.4.1 Considerazioni finali 252
5.5 Chiesa di Santa Maria Assunta in Cielo, Lamadacqua (BA) 254
5.5.1 Analisi del contesto 256

5.5.1.1 Contesto territoriale 256
5.5.1.2 Evoluzione storica e architettonica 258
5.5.2 Diagnosi preliminare 261
5.5.2.1 Metodologia diagnostica 261
5.5.2.1 Stato di conservazione 264
5.5.3 Il progetto di risanamento 266
5.5.4 Risultati 270
5.5.4.1 Monitoraggio post-intervento 270
5.5.4.2 Considerazioni finali 271
5.6 Chiesa di San Giuseppe, Rosate (MI) 274
5.6.1 Analisi del contesto 276
5.6.1.1 Contesto territoriale 276
5.6.1.2 Evoluzione storica e architettonica 276
5.6.2 Diagnosi preliminare 277
5.6.2.1 Metodologia diagnostica 277
5.6.2.1 Stato di conservazione 278
5.6.3 Il progetto di risanamento 279
5.6.4 Risultati 280
5.6.4.1 Monitoraggio post-intervento 280
5.6.4.2 Considerazioni finali 280
5.7 Antica Pieve di San Gennaro, Capannori (LU) 284
5.7.1 Analisi del contesto 286
5.7.1.1 Contesto territoriale 286
5.7.1.2 Evoluzione storica e architettonica 286
5.7.2 Diagnosi preliminare 288
5.7.2.1 Metodologia diagnostica 288
5.7.2.1 Stato di conservazione 289

5.7.3 Il progetto di risanamento 290
5.7.4 Risultati 290
5.7.4.1 Monitoraggio post-intervento 290
5.7.4.2 Considerazioni finali 291
5.8 Alqueria "4 Camins", Alboraya (Valencia, Spagna) 294
5.8.1 Analisi del contesto 296
5.8.1.1 Contesto territoriale 296
5.8.1.2 Evoluzione storica e architettonica 301
5.8.2 Diagnosi preliminare 303
5.8.2.1 Metodologia diagnostica 303
5.8.2.1 Stato di conservazione 304
5.8.3 Il progetto di risanamento 307
5.8.4 Risultati 311
5.8.4.1 Monitoraggio post-intervento 311
5.8.4.2 Considerazioni finali 312
5.9 Alqueria "El Trull", Alboraya (Valencia, Spagna) 316
5.9.1 Analisi del contesto 318
5.9.1.1 Contesto territoriale 318
5.9.1.2 Evoluzione storica e architettonica 318
5.9.2 Diagnosi preliminare 321
5.9.2.1 Metodologia diagnostica 321
5.9.2.1 Stato di conservazione 321
5.9.3 Il progetto di risanamento 323
5.9.4 Risultati 328
5.9.4.1 Monitoraggio post-intervento 328
5.9.4.2 Considerazioni finali 329

6 STRUMENTI E METODI INNOVATIVI PER IL RISANAMENTO DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO 332

6.1 Best Practices 338

6.1.1 Principi guida per le Best Practices 339

6.1.2 Best Practices 340

6.1.2.1 Fase 1 - Inquadramento territoriale 340

6.1.2.2 Fase 2 - Conoscenza storico-evolutiva 341

6.1.2.3 Fase 3 - Diagnosi preliminare 343

6.1.2.4 Fase 4 - Progettazione ed esecuzione degli interventi 345

6.1.2.5 Fase 5 - Monitoraggio continuo e PPM 348

6.2 Open Knowledge Platform Tool 350

6.2.1 Raccomandazioni per la standardizzazione, ricerca e policy 351

6.2.2 Verso l'Open Knowledge Platform Tool 353

6.2.2.1 La Scheda Tipo 354

6.2.3 Prospettive di integrazione nel modello digitale 357

CONCLUSIONI 361

APPENDICE A - Normativa nazionale italiana 365

APPENDICE B - Normativa tecnica e diagnostica 370

APPENDICE C - Normativa nazionale spagnola 375

BIBLIOGRAFIA 381

RINGRAZIAMENTI 403

INTRODUZIONE

La conservazione del patrimonio architettonico rappresenta oggi una delle sfide più complesse e strategiche per la disciplina del restauro e la tecnologia dell'architettura. Alla crescente consapevolezza del valore culturale, identitario e sociale degli edifici storici si affianca la necessità di affrontare fenomeni di degrado sempre più diffusi, spesso aggravati dai cambiamenti climatici, dall'obsolescenza fisiologica degli edifici e da una gestione manutentiva discontinua o inadeguata.

In questo contesto l'umidità, e in particolare l'umidità da risalita capillare, si configura come una delle principali cause di degrado fisico, chimico e biologico del patrimonio architettonico, incidendo non solo sulla durabilità dei materiali costruttivi, ma anche sulla salubrità degli ambienti e sulla fruibilità degli spazi.

Nonostante l'ampia letteratura scientifica e la varietà di soluzioni tecniche proposte nel tempo, il trattamento dell'umidità da risalita capillare continua a presentare criticità operative rilevanti. Interventi emergenziali "*single issue*", orientati alla mitigazione degli effetti superficiali del degrado rischiano di produrre risultati temporanei, con costi elevati nel medio-lungo periodo e con un impatto non sempre compatibile con i principi fondamentali del restauro.

Pertanto, si rende necessario e urgente un approccio metodologico che privilegi la comprensione delle cause profonde del fenomeno, la verifica delle prestazioni delle tecnologie e dei materiali impiegati e l'integrazione dei singoli interventi all'interno di strategie di manutenzione preventiva e programmata.

È all'interno di questo quadro teorico e operativo che si colloca il presente lavoro di tesi, sviluppato nell'ambito di una borsa di dottorato prevista dal D.M. 252/2022 del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) per l'"*introduzione di dottorati innovativi che rispondono ai fabbisogni di innovazione delle imprese*" [MIUR (2022)]. In questa cornice, l'Università degli Studi della Basilicata ha attivato un programma di ricerca in collaborazione con il Gruppo Leonardo Solutions s.r.l.-Domodry, azienda leader nel settore del risanamento edilizio e della deumidificazione, che dal 2009 commercializza il dispositivo a neutralizzazione di carica CNT®-Domodry®.

La collaborazione tra ambito accademico e industriale non è stata concepita come un semplice trasferimento tecnologico, ma come un'occasione di ricerca critica e sperimentale finalizzata alla valutazione dell'efficacia delle tecnologie disponibili e alla loro integrazione in protocolli operativi scientificamente fondati. Il lavoro di tesi non assume dunque la tecnologia CNT®-Domodry® come soluzione aprioristicamente risolutiva, ma ne analizza l'applicazione all'interno di un processo

strutturato che comprende la diagnosi, l'intervento e il monitoraggio nel tempo, in coerenza con un approccio prestazionale e basato su evidenze misurabili.

Obiettivo centrale della ricerca è la definizione di protocolli operativi per la conservazione e il risanamento del patrimonio architettonico affetto dal fenomeno della risalita capillare, fondati sulle migliori tecnologie attualmente disponibili e sui principi della sostenibilità ambientale, economica e sociale. Tali protocolli sono concepiti come strumenti replicabili e adattabili, capaci di guidare il processo decisionale dalla fase conoscitiva fino alla manutenzione programmata, riducendo l'incertezza operativa e il rischio di interventi inefficaci o invasivi.

Parallelamente, la tesi sviluppa una piattaforma digitale configurata come *open knowledge tool*, pensata per supportare la progettazione integrata e la gestione del patrimonio edilizio nel tempo. La piattaforma ha lo scopo di raccogliere e rendere accessibili dati diagnostici, procedure operative, criteri di valutazione e risultati di monitoraggio, consentendo il coinvolgimento attivo dei diversi *stakeholder* del processo di conservazione (progettisti, imprese, enti pubblici, proprietari e comunità locali. In questo senso, la dimensione digitale non è intesa come mero supporto informativo, ma come infrastruttura conoscitiva in grado di favorire pratiche di manutenzione preventiva e programmata, superando la logica dell'intervento emergenziale.

Il lavoro si inserisce inoltre nel dibattito contemporaneo sul rapporto tra restauro e innovazione tecnologica, interrogandosi criticamente sulla compatibilità tra dispositivi elettrofisici di nuova generazione e i valori della conservazione del costruito storico. La ricerca assume come riferimento un approccio interdisciplinare, che integra competenze di tecnologia dell'architettura, fisica tecnica, scienza dei materiali e gestione del processo edilizio, con l'obiettivo di costruire un quadro metodologico solido e trasferibile alla pratica professionale.

La tesi è articolata in due parti principali, la cui organizzazione rispecchia la sequenza di analisi e di ricerca adottata nel presente studio, muovendo da un inquadramento teorico-conoscitivo del fenomeno fino alla definizione di strumenti operativi e linee guida applicative.

La "***Parte I – Quadro generale e stato dell'arte***" è dedicata alla costruzione del quadro teorico, metodologico e tecnico di riferimento. Essa si apre con un'interpretazione dell'edificio come organismo edilizio, inteso come sistema complesso nel quale materiali, componenti e condizioni ambientali interagiscono nel tempo, rendendo necessaria una lettura integrata dei fenomeni di degrado. Su questa base, il secondo capitolo affronta in modo sistematico le tipologie di umidità

nelle costruzioni, con particolare attenzione alle condizioni di compresenza e sovrapposizione dei fenomeni, spesso causa di diagnosi errate e interventi inefficaci. Il terzo capitolo approfondisce i meccanismi di trasporto dell'acqua nei materiali da costruzione, analizzando i processi fisici e chimici che governano la risalita capillare e le sue manifestazioni macroscopiche. Il quadro teorico si completa con una disamina critica delle tecniche di intervento contro la risalita capillare, esaminate non solo in termini di principio di funzionamento, ma anche rispetto ai loro limiti applicativi, al grado di invasività e alla compatibilità con i principi della conservazione del patrimonio architettonico.

La "*Parte II – Sperimentazioni progettuali e verifiche operative*" traduce il quadro teorico in un percorso sperimentale e operativo. Il primo capitolo di questa sezione è dedicato all'analisi dei casi studio, selezionati come campo di verifica delle ipotesi di ricerca e dei protocolli diagnostici e di intervento. I casi sono indagati attraverso un approccio metodologico strutturato che integra rilievo, diagnosi, applicazione della tecnologia e monitoraggio nel tempo. L'ultimo capitolo sviluppa gli strumenti e i metodi innovativi per il risanamento del patrimonio architettonico, con particolare riferimento alla definizione di protocolli operativi, all'integrazione della tecnologia a neutralizzazione di carica all'interno di strategie di manutenzione preventiva e programmata e allo sviluppo di una piattaforma digitale concepita come strumento di supporto alla progettazione integrata e alla gestione informata degli interventi.

In questa articolazione, la struttura della tesi non assolve a una funzione meramente espositiva, ma diventa parte integrante del metodo di ricerca, accompagnando il passaggio dalla conoscenza del fenomeno alla sperimentazione sul campo e alla restituzione di indicazioni operative trasferibili alla pratica professionale e ai processi decisionali nel campo della conservazione.

PARTE I

QUADRO GENERALE E STATO DELL'ARTE

L’EDIFICIO COME ORGANISMO EDILIZIO

1

1.1 La scomposizione dell'organismo edilizio

1.2 La conservazione del patrimonio architettonico

1.3 Il progetto di restauro/ risanamento

01 L'EDIFICIO COME "ORGANISMO EDILIZIO"

Negli ultimi anni il contesto disciplinare e operativo dell'architettura e del restauro è stato investito da un doppio cambiamento: da un lato, l'irruzione dei requisiti di sostenibilità (ambientale, economica e sociale) ha ripensato le finalità e i criteri della progettazione; dall'altro, la diffusione delle tecnologie informatiche ha reso possibile una gestione continuativa e integrata delle informazioni sull'edificio.

Queste due trasformazioni convergono nella nuova visione nota come *continuum building design*, che riconcepisce l'edificio non come oggetto concluso ma come processo esteso nel tempo: progettazione, costruzione, esercizio, manutenzione, trasformazione e infine dismissione devono essere considerati come fasi interdipendenti di un unico ciclo di vita.

Il continuum design assume pertanto la durata e la gestione permanente come obiettivi progettuali, promuovendo la manutenzione preventiva e programmata (PPM) e l'adozione di pratiche circolari per il recupero e il riciclo dei materiali, in contrapposizione all'approccio reattivo e palliativo che interviene esclusivamente sulle manifestazioni del degrado [Hong et al. (2020); Jin et al. (2019)].

La sostenibilità, nel quadro di questa prospettiva, va intesa in senso tridimensionale. La dimensione ambientale richiama l'urgenza di ridurre consumi di risorse, impatti energetici ed emissioni associate al patrimonio costruito: il settore delle costruzioni è responsabile di una quota significativa del prelievo di materie, del consumo energetico e delle emissioni climalteranti a scala globale, e pertanto costituisce un campo prioritario di intervento per la transizione verso modelli circolari [Liao (2023); Passoni (2022)].

La dimensione economica mette in evidenza come il costo reale di un edificio si manifesti soprattutto nelle fasi di esercizio e manutenzione che assorbono la quota prevalente delle risorse nel ciclo di vita (stime recenti collocano tale incidenza attorno al 75–80%) rendendo la PPM una leva strategica per l'efficienza economica e la conservazione del valore [Hauashdh et al. (2022)].

La dimensione sociale e culturale, infine, sottolinea il ruolo del patrimonio come "*archive of human experience*": i beni costruiti non sono meri involucri tecnici ma depositi dinamici di conoscenze, pratiche e valori che contribuiscono alla memoria collettiva e alla capacità delle comunità di affrontare sfide contemporanee, inclusa la resilienza al cambiamento climatico [Shepherd (2022)].

L'approccio basato sul ciclo di vita (*Life Cycle Thinking*, LCT) e le metodologie normative, come la UNI EN 15978:2011 (Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici - Metodo di calcolo), forniscono un quadro analitico per valutare la

prestazione ambientale, economica e sociale degli interventi in tutte le fasi del ciclo di vita (produzione, costruzione, uso, fine vita).

Tuttavia, applicare l'LCT al patrimonio storico richiede cautela: l'ottimizzazione degli impatti ambientali non è automaticamente congruente con la tutela dell'autenticità e della leggibilità storica; per questo le scelte progettuali devono sempre essere il risultato di valutazioni interdisciplinari che pesino benefici ambientali, perdite di valore culturale e durabilità tecnica [Passoni (2021); Caruso (2024); Rahimi (2022)].

La digitalizzazione rappresenta l'elemento abilitante di questa transizione metodologica. Strumenti come l'H-BIM, i *digital twin* e le piattaforme di *asset management* consentono di storicizzare rilievi, analisi materialogiche, monitoraggi e interventi, trasformando la conoscenza sparsa in un patrimonio informativo interrogabile e programmabile.

L'uso di questi strumenti rende praticabile la manutenzione preventiva e programmata basata su soglie reali e supporta strategie di riuso e disassemblabilità coerenti con i principi di circolarità [Hong et al. (2020); Jin et al. (2019)]. È tuttavia necessario sottolineare che la tecnologia da sola non garantisce risultati: senza una governance adeguata e clausole contrattuali che prevedano responsabilità a medio-lungo termine (fenomeno ancora poco diffuso in molti contesti, Italia inclusa) la raccolta di dati può rimanere isolata e priva di effetto sulle pratiche operative [AA.VV. (2013)].

Questo capitolo intende dunque esplicitare l'importanza di considerare l'edificio come "organismo edilizio", ossia come sistema complesso fatto di elementi interdipendenti le cui relazioni determinano comportamenti termo-igrometrici, idrici e meccanici diversi.

Questa metafora, oltre a offrire un potente dispositivo euristico, deve essere tradotta in procedure concrete: lettura stratigrafica e palinsesto costruttivo, classificazione in unità tecnologiche (es. UNI 8290), diagnostica integrata, digitalizzazione delle informazioni (H-BIM/*digital twin*) e definizione di protocolli per la PPM. Solo attraverso questa catena normativa-metodologica-informativa la metafora organica diventa strumento operativo per la conservazione sostenibile.

Il patrimonio architettonico, in quanto "*archive of human experience*", non è un residuo da preservare in isolamento ma una risorsa dinamica per la riflessione collettiva e l'azione culturale; gestirlo secondo logiche di continuità, trasparenza informativa e responsabilità programmate è la condizione per coniugare tutela e sostenibilità nel lungo periodo.

1.1

LA SCOMPOSIZIONE DELL'ORGANISMO EDILIZIO

1.1 La scomposizione dell'organismo edilizio

Per intervenire con rigore su un edificio storico o su un patrimonio edilizio esistente è indispensabile abbandonare la rappresentazione dell'opera come insieme di parti isolate e adottare invece una prospettiva sistemica. L'edificio funziona infatti come un sistema complesso: componenti differenti (fondazioni, strutture, involucro, orizzontamenti, impianti, finiture) dialogano fra loro attraverso flussi (acqua, calore, vapore, sali) e vincoli meccanici; è la rete di queste relazioni, non il singolo elemento, a determinare il comportamento complessivo e la risposta ai fattori di degrado nel tempo.

La scomposizione metodologica dell'organismo edilizio assume quindi rilevanza operativa: leggere significa riconoscere oggetti, funzioni e percorsi degli agenti di degrado per trasformare osservazione e misure in decisioni progettuali coerenti e misurabili.

Un punto di partenza imprescindibile per questa traduzione metodologica è la norma tecnica UNI 8290 (Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia) [UNI 8290]. La UNI 8290 definisce e gerarchizza il sistema tecnologico in più livelli (classi di unità, unità tecnologiche ed elementi tecnici) fornendo una terminologia standardizzata per descrivere gli elementi costruttivi e funzionali dell'edificio.

L'utilità pratica di questa tassonomia non è puramente lessicale in quanto assegnare a ciascun oggetto costruttivo una collocazione secondo UNI 8290 consente di ottenere schede informative omogenee, facilitare la comunicazione interdisciplinare fra rilievo, diagnostica e progetto e predisporre *deliverable* coerenti per la gestione e la manutenzione. In altre parole, la norma fornisce la grammatica base necessaria per trasformare osservazioni puntuali in dati strutturati e interoperabili.

La lettura stratigrafica costituisce l'altro pilastro metodologico. Intesa come esame cronologico e materiale delle sovrapposizioni costruttive, la stratigrafia ricostruisce i palinsesti (fasi costruttive, interventi successivi, ripristini) e individua gli strati che svolgono funzioni di barriera, accumulo o scambio (intonaci, supporti, finiture).

Questa pratica, consolidata nelle metodologie diagnostiche del restauro, permette di separare le alterazioni "ereditate" (legate alla storia costruttiva dell'edificio) dalla presenza di fenomeni attivi che richiedono azioni prioritarie. L'efficacia della stratigrafia aumenta nettamente quando i rilievi sono integrati con indagini specifiche di laboratorio (analisi petrografiche, caratterizzazione delle malte, mappatura salina, prove gravimetriche) e con indagini non distruttive (termografia, indagini endoscopiche, misure igrometriche e monitoraggi temporali). L'accoppiamento stratigrafia–analisi strumentale è ciò che trasforma una descrizione storica in una base per decisioni progettuali verificabili.

Perché questa scomposizione sia operativa è necessario inoltre trasferire l'informazione in un modello informativo strutturato. L'H-BIM (*Historic Building Information Modeling*) rappresenta oggi lo strumento più efficace per collegare geometria, stratigrafia e dati diagnostici: integrando le unità tecnologiche definite e codificate secondo la UNI 8290 con i risultati delle analisi e con i monitoraggi, l'H-BIM diventa un archivio interrogabile che supporta la pianificazione della manutenzione, la simulazione di scenari e la tracciabilità degli interventi.

La norma UNI 8290 è pertanto importante per almeno tre ragioni concrete. Primo, essa offre un linguaggio comune che riduce le ambiguità nella descrizione degli oggetti edilizi, facilitando il confronto tra operatori (diagnostici, progettisti, imprese e committenti) e la comparazione di dati in contesti diversi.

Secondo, la struttura gerarchica della norma

consente di costruire schede modulari che possono essere facilmente integrate in database o in modelli H-BIM, rendendo i dati riutilizzabili per analisi successive e per la pianificazione della PPM.

Terzo, la norma orienta la definizione dei requisiti tecnici e di gestione (es.: criteri di sicurezza, fruibilità, integrazione impiantistica) che devono essere considerati non solo in fase di progetto ma anche in ottica di esercizio e manutenzione. Tali funzioni fanno della UNI 8290 una base operativa per connettere la diagnosi stratigrafica con la gestione informativa del patrimonio.

Un'applicazione pratica di questa impostazione è la costruzione di schede di caratterizzazione per singole componenti dell'edificio. Ne è un esempio la scheda muratura (Fig. 1) predisposta nell'ambito dell'attività didattica e sperimentale svolta con l'*open living lab* presso il Palazzo Labriola (Rabatana di Tursi), realizzata con il coinvolgimento degli studenti del IV anno del corso di "Materiali per l'Architettura" (A.A. 2023/2024) del CdS in Architettura dell'Università degli Studi della Basilicata. La scheda non è un semplice formulario: è uno strumento progettato per raccogliere in modo sistematico e confrontabile informazioni geometriche, materiche e diagnostiche necessarie a trasformare osservazioni sul campo in dati utilizzabili ai fini progettuali e gestionali.

La struttura della scheda comprende campi chiave che coprono livelli diversi di approfondimento: identificazione e localizzazione planimetrica

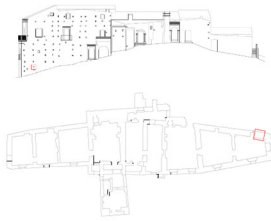
Fig. 1 | Esempio della "Scheda Muratura" compilata dagli studenti del corso di "Materiali per l'Architettura" (A.A. 2023/2024) del CdS in Architettura dell'Università degli Studi della Basilicata

SCHEDA MURATURA — CODICE MURATURA (es. M10)

QR CODE SCHEDE MURARIE:

LOCALIZZAZIONE

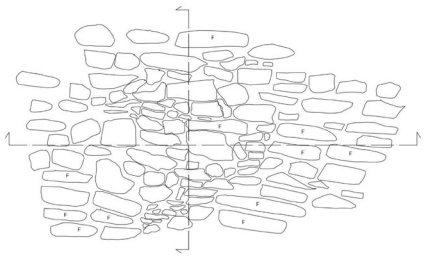
La parete M10 è collocata sul prospetto nord- ovest in prossimità del primo blocco.



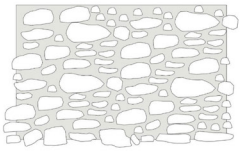
PIANTA, PROSPETTI E SEZIONI

elaborati grafici della muratura analizzata (scala 1:10):

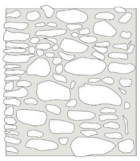
PROSPETTO ESTERNO



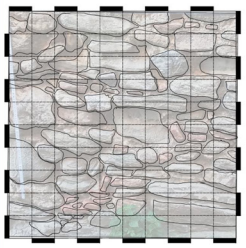
SEZIONE TRASVERSALE

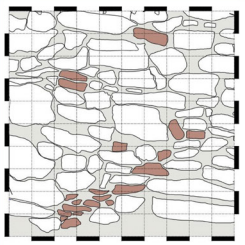


SEZIONE LONGITUDINALE



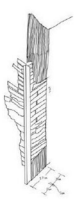
CAMPIONE MURARIO 1X1 m (scala 1:10)





Composizione percentuale	40 % elementi lapidei 50 % malta 0 % vuoti 10 % altro





TESSITURA MURARIA

Apparecchiatura	disordinata
Posa degli elementi	di fascia
Tipologia di paramento murario	Opus incertum
Ricorsi o listatura	laterizio
	Distanza dei ricorsi/listatura: variabile
Ulteriori elementi di rilievo	Sfalsamento dei giunti: variabile
	Zeppe: in pietra e laterizio
	Finiture superficiali: sbozzatura
	Altro

ELEMENTI COSTITUTIVI

	Materiali	Caratteristiche	Dimensioni
Materiali lapidei (naturali e artificiali)	Rocce sedimentarie	Lavorazione superficiale e forma: sbozzatura, rettangolari	variabile
		Colore: grigio / rosso	
		Provenienza: locale	
		Stato di conservazione: sufficiente	
Giunti	Malta di calce	Morfologia e finitura superficiale: rientrante	variabile
		Colore: grigiastro	
		Inerti: variabile	
		Consistenza e stato di conservazione: decoesa	

SEZIONE TRASVERSALE

Dimensioni	Spessore murario: 110 cm.
Tipologia	Paramento unico
Ingranamento	Elementi di punta, legature trasversali (diatoni)...
	ingranamento sufficiente

(codice muratura, mosca in pianta e prospetto); rilievi grafici in pianta, prospetto e sezioni alla scala 1:10; descrizione della tessitura muraria (apparecchiatura, posa, tipologia di paramento, ricorsi); caratterizzazione degli elementi costitutivi (materiali lapidei, giunti, malte), con indicazione delle caratteristiche, dimensioni e stato di conservazione; sezione trasversale con tipi di parete (monostrato, pareti a nucleo, intercapedini) e parametri dimensionale-funzionali; campione murario 1×1 m con elaborati grafici e composizione percentuale (conci, malta, vuoti); documentazione fotografica e particolari esecutivi in scala. Questi campi sono stati pensati per rispondere alle esigenze pratiche della diagnostica ma anche per essere mappati direttamente su unità tecnologiche codificate secondo la UNI 8290 e, conseguentemente, importati in un modello H-BIM.

L'utilità operativa della scheda risiede in tre funzioni principali. Prima, standardizza la raccolta dati: campi omogenei e procedure di rilievo replicabili riducono le ambiguità e rendono confrontabili porzioni di muratura analizzate in occasioni diverse. Seconda, abilita l'integrazione informativa: i campi della scheda corrispondono a attributi che possono essere collegati ad oggetti H-BIM (identificativo, stratigrafia, risultati di prova, stato di degrado), permettendo di costruire database interrogabili per analisi spaziali e temporali. Terza, facilita la transizione dalla diagnosi all'azione: raccogliere dati omogenei su tessitura, composizione e danno consente di definire priorità d'intervento basate su evidenze e di generare metriche utili alla manutenzione programmata (PPM), senza trasformare la scheda in un semplice archivio descrittivo.

È importante precisare che l'adozione di schede come questa ha valore metodologico e operativo indipendentemente dai risultati raccolti: lo scopo è standardizzare e rendere tracciabile la conoscenza, non anticipare conclusioni analitiche. La stessa scheda si presta inoltre ad attività formative e partecipative (come dimostra l'esperienza dell'*open living lab*) poiché offre un linguaggio condiviso per studenti, tecnici e cittadini coinvolti nella rilevazione, riducendo l'eterogeneità dei dati raccolti sul campo.

Resta ferma, infine, la necessità di collocare sempre la raccolta dati all'interno di una gerarchia causale dell'indagine. La scheda è uno strumento che agevola la descrizione e la quantificazione, ma non sostituisce la fase interpretativa: la scomposizione in unità tecnologiche e la ricchezza informativa che ne deriva devono essere utilizzate per individuare cause profonde (regimazione delle acque, filtro della falda, criticità impiantistiche, ecc.) e per orientare interventi che privilegino la rimozione o il controllo delle cause prima del ripristino delle superfici. Solo così la scheda diventa parte di una procedura diagnostico-progettuale coerente ed efficace, e non un mero repertorio documentale.

1.2

LA CONSERVAZIONE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

1.2 La conservazione del patrimonio architettonico

La conservazione del patrimonio architettonico non è riducibile a un insieme di interventi materiali: essa implica la salvaguardia del valore storico, estetico, funzionale e sociale degli edifici, la tutela della loro capacità di trasmettere memoria e pratiche, nonché la capacità di preservare le condizioni che ne consentono l'uso e la fruizione.

In questo senso la conservazione va intesa come un processo continuo e politicamente mediato, che mette in relazione decisioni progettuali, scelte tecnologiche, piani di manutenzione, strumenti giuridici e modalità di governance.

Posto questo orizzonte, l'azione conservativa contemporanea deve confrontarsi con i vincoli del patrimonio architettonico e al tempo stesso con le esigenze di sostenibilità ambientale, economica e sociale: tre dimensioni che non solo coesistono, ma si condizionano reciprocamente.

I principi del restauro (minimo intervento, compatibilità materica, riconoscibilità e reversibilità) restano imprescindibili come linee guida etiche e tecniche, ma richiedono una loro attualizzazione alla luce delle nuove sfide.

Il principio del "minimo intervento" non significa inerzia, bensì priorità alle azioni che risolvono le cause del degrado con la minor alterazione possibile dei caratteri originali; la "compatibilità" non è una preferenza estetica, ma un criterio tecnico che impone la scelta di materiali e tecnologie coerenti con i substrati e con i meccanismi fisico-chimici esistenti; la "riconoscibilità" e la "reversibilità" rimangono strumenti per tutelare la leggibilità storica e consentire future correzioni.

Tuttavia, l'applicazione di questi principi non deve essere automatica, ma occorre bilanciarli criticamente con esigenze di sicurezza, esigenze contemporanee e sostenibilità, evitando interpretazioni dogmatiche che possano ostacolare interventi necessari o, al contrario, giustificare soluzioni apparentemente "compatibili" ma prive di adeguata validazione tecnico-scientifica [Franzoni (2014); Rossi (1982)].

Passare ad una pratica operativa di prevenzione e programmazione è una delle trasformazioni più urgenti. La manutenzione preventiva e programmata (PPM) introduce una logica temporale diversa: non più restauri episodici e costosi quando il danno è avanzato, ma interventi calibrati e cadenzati che riducono il rischio di perdita di materiale e di valore. Questa impostazione richiama la nota osservazione di Giovanni Urbani sul fatto che il vero obiettivo del restauro dovrebbe essere fare in modo che le opere abbiano sempre meno bisogno di restauri [Boschi (2014)].

La PPM richiede però strumenti operativi ben definiti (protocolli di monitoraggio, soglie decisionali, contratti che prevedano responsabilità pluriennali e pianificazioni finanziarie credibili) senza i quali la buona volontà progettuale rischia di restare inefficace.

Il *Life Cycle Thinking* (LCT) e le norme correlate, in particolare la UNI EN 15978:2011 (Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici - Metodo di calcolo), offrono un quadro metodologico per valutare impatti ambientali, economici e sociali lungo le diverse fasi del ciclo di vita di un edificio (produzione dei materiali, costruzione, uso, fine vita).

Applicare l'LCT al patrimonio consente di misurare e confrontare alternative progettuali non solo in termini di impatto immediato, ma anche di costi e benefici cumulati nel tempo, favorendo scelte che riducano consumi e emissioni e che promuovano il riuso e la disassemblabilità. Tuttavia, l'LCT incontra limiti specifici nel campo del patrimonio: la valutazione "*cradle-to-cradle*" può trascurare valori non quantificabili (autenticità, stratificazione storica, significato

culturale) o condurre a *trade-off* complessi, per esempio quando la sostituzione di un elemento degradato con un materiale "più efficiente" comporti perdita di valore storico.

Per questa ragione, l'LCT nel contesto storico deve essere integrato con criteri di tutela culturale e con valutazioni qualitative che traducano la culturalità in parametri decisionali accettabili [Passoni (2021); Caruso (2024); Rahimi (2022)].

I principi della cosiddetta economia circolare (le 6R: *Reduce*, *Reuse*, *Recycle*, *Recover*, *Redesign*, *Refuse*) sono rilevanti per il settore costruzioni e offrono strumenti per ridurre l'impatto complessivo del patrimonio.

Tuttavia, l'applicazione delle 6R a edifici storici non può essere meccanica. Il riuso, il riciclo e la rifunzionalizzazione di un edificio devono rispettare la compatibilità materica e la leggibilità storica e la riduzione di impatto ambientale non deve tradursi in perdita di autenticità.

Il riuso adattivo (*adaptive reuse*) emerge come strategia che concilia conservazione e trasformazione: convertire edifici storici a nuovi usi può generare valore economico, attivare rigenerazione sociale e promuovere la partecipazione pubblica, se il progetto è guidato da principi di accessibilità, inclusione e rispetto per il carattere storico [Rong (2023); Sahu (2024)]. Qui, il *design thinking* e il pensiero sistemico incentrato sull'uomo (*human-centered design*) giocano un ruolo chiave nel rendere gli spazi flessibili, modulabili e rispondenti ai bisogni reali degli utenti, evitando soluzioni imposte e non sostenibili [Avsec (2024)].

La conservazione coinvolge inoltre un complesso quadro normativo e amministrativo, particolarmente rilevante in Italia.

Il Codice dei beni culturali e del paesaggio [D.Lgs. 42/2004], integrato da normative regionali e da regolamenti ministeriali, disciplina vincoli, procedure autorizzative e responsabilità, ponendo un sistema multilivello di governance in cui Stato, enti locali e soggetti privati interagiscono.

Tale assetto, nonostante possa favorire approcci di tipo integrato, introduce complessità procedurali che richiedono competenze specialistiche e coordinamento tra *stakeholders* [Catani (2016); Altamura (2013)].

L'inventariazione, la catalogazione e la digitalizzazione dei dati (supportate da banche dati e piattaforme) sono strumenti essenziali per la tutela: permettono identificazione, monitoraggio e pianificazione degli interventi e costituiscono una base imprescindibile per politiche di lungo periodo [Dubini (2011); Alessandrini (2011)].

Nonostante i quadri normativi e metodologici disponibili, permangono criticità operative rilevanti. In primo luogo, la prevalenza di un approccio emergenziale e reattivo produce interventi spesso frettolosi e inefficaci nel lungo periodo.

In secondo luogo, la crescente disponibilità commerciale di materiali e tecnologie per la conservazione presenta il rischio di ricorso a prodotti non adeguatamente documentati o sperimentati, con conseguenti incompatibilità o effetti secondari imprevisti.

In terzo luogo, la carenza di sistemi di verifica a medio-lungo termine (per esempio contratti che includano monitoraggio post-intervento o garanzie di performance) impedisce di valutare l'efficacia delle scelte e di correggerle in corso d'opera [Hines (2023)]. Queste criticità sottolineano la necessità di integrare i percorsi tecnici con misure contrattuali, piani finanziari e strategie di *capacity building*.

Infine, la conservazione del patrimonio deve essere considerata come una vera e propria leva di trasformazione culturale ed economica, capace di influenzare valori collettivi, attivare azioni comunitarie e stimolare creatività e narrazione [Shepherd (2022)]. La sua gestione, pertanto, deve coniugare tutela, fruizione e valorizzazione, promuovendo processi partecipativi che coinvolgano comunità locali, professionisti e istituzioni.

In questo quadro, l'allineamento con gli obiettivi dell'Agenda 2030 (sviluppo urbano inclusivo, resiliente e sostenibile) fornisce una bussola politica per giustificare investimenti di lungo periodo e per orientare scelte che connettano

conservazione e rigenerazione socio-economica.

In sintesi, la conservazione contemporanea richiede un’ampia capacità di integrazione: aggiornare i principi del restauro con strumenti di LCT e circolarità, adottare pratiche di manutenzione programmata e monitoraggio, governare dati e contratti in modo che la conoscenza diagnostica si traduca in azioni sostenibili e verificabili, e inserire il patrimonio in processi partecipativi e di sviluppo locale. Solo una strategia che metta insieme competenze tecniche, strumenti normativi e capacità di governance può trasformare la conservazione da pratica tecnico-operativa a leva di sostenibilità culturale, sociale ed economica.

1.3

IL PROGETTO DI RESTAURO E RISANAMENTO

1.3 Il progetto di restauro e risanamento

Il progetto di restauro e risanamento va inteso come un processo organico e continuo che connette conoscenza, decisione tecnica, attuazione e gestione nel tempo: non un'operazione episodica, ma una catena di attività successivamente riattivabile e misurabile.

Questa prospettiva implica che il progetto nasca dalla diagnosi e contemporaneamente alimenti la banca dati, i protocolli e le procedure che regoleranno le fasi successive (dall'esperimento controllato in sito, al risanamento con materiali e tecniche validate, fino alla manutenzione e al monitoraggio a medio-lungo termine) in una logica di retroazione costante tra pratica e conoscenza [Boschi (2014); Hines (2023)].

Lo stato dell'arte mostra oggi due tendenze parallele e talvolta contraddittorie.

Da una parte si osserva una progressiva maturazione metodologica: la diagnosi multidisciplinare (rilievo stratigrafico, analisi materialogiche, analisi dei sali, indagini geotecniche, monitoraggi termo-igrometrici e piezometrici) è riconosciuta come prerequisito imprescindibile; strumenti informativi come H-BIM e *digital twin*, insieme all'adozione del *Life Cycle Thinking* (UNI EN 15978) e alla logica delle 6R, forniscono cornici teoriche e operative per valutare impatti ambientali, economici e sociali lungo il ciclo di vita.

Dall'altra permangono pratiche consolidate di intervento reattivo, offerte commerciali non sempre adeguatamente validate e un deficit strutturale di governance, risorse e competenze che riducono la capacità di tradurre la conoscenza diagnostica in interventi efficaci e duraturi [Hong et al. (2020); Jin et al. (2019); Passoni (2021)].

Di fatto, la conservazione sostenibile richiede che il progetto prioritizzi la risoluzione delle cause di degrado e che le scelte tecniche siano accompagnate da procedure di verifica dell'efficacia nel medio-lungo periodo.

La letteratura recente sottolinea la necessità di protocollo e standard operativi: piani di prova in sito, soglie di intervento definite a priori, indicatori misurabili e capitolati che impongano prove di compatibilità [Hines (2023); AA.VV. (2013)]. Giovanni Urbani, richiamato nella letteratura specialistica, sintetizza il punto centrale: "*il vero problema del restauro non è eseguire restauri sempre migliori, ma fare in modo che le opere abbiano sempre meno bisogno di restauri*" [Boschi (2014)].

Nella prassi corrente emergono però ostacoli concreti.

La prima criticità è l'approccio emergenziale: molte amministrazioni e committenze intervengono quando il danno è avanzato, spesso privilegiando il ripristino estetico immediato a scapito della risoluzione delle cause.

La seconda criticità riguarda il mercato dei materiali e delle tecnologie: l'ampia disponibilità commerciale include prodotti privi di adeguata documentazione tecnico-scientifica, il cui impiego può generare incompatibilità e recidive di danno.

La terza criticità è di natura istituzionale e formativa: il quadro normativo nazionale (D.Lgs. 42/2004 e normativa regionale) assicura tutela ma produce anche complessità e sovrapposizioni, mentre la collaborazione tra sistema accademico e sistema produttivo, nonché la formazione di figure professionali interdisciplinari (ICT per beni culturali, manager culturali, tecnici specializzati), risultano spesso insufficienti [AA.VV. (2013); Catani (2016); Alessandrini (2011); Areddu (2018); Altamura (2013)].

Nonostante questi limiti, la letteratura evidenzia percorsi virtuosi e sperimentazioni concrete che

ridefiniscono il progetto.

In ambito diagnostico, la produzione di schede omogenee (collegate a classificazioni come la UNI 8290) e l'integrazione in H-BIM rendono possibile la tracciabilità e la comparabilità dei dati; in ambito contrattuale, nei paesi anglosassoni si sperimentano contratti pluriennali che affidano anche la gestione e il monitoraggio alle imprese appaltatrici, favorendo una manutenzione programmata effettiva [AA.VV. (2013)].

La prospettiva LCT e la logica circolare (6R) offrono criteri per valutare *trade-off* tra conservazione dell'autenticità e riduzione dell'impatto ambientale, mentre il riuso adattivo, se condotto con processi partecipativi e criteri di flessibilità e accessibilità, si presenta come strategia di rigenerazione economica e sociale coerente con l'Agenda 2030 [Rong (2023); Sahu (2024); Avsec (2024)].

Per favorire la transizione dall'oggi al modello auspicato lo stato dell'arte individua linee d'azione ricorrenti e già sperimentate: standardizzare la diagnosi (schede, formati interoperabili, protocolli di prova), privilegiare misure che rimuovano o controllino le cause prima di operare sulle superfici, richiedere prove pre- e post-intervento nel capitolato e definire criteri di accettazione misurabili, predisporre piani di monitoraggio con indicatori e soglie decisionali e adottare modelli contrattuali che vincolino la performance e la manutenzione nel tempo [Hines (2023); Hong et al. (2020); Jin et al. (2019)].

Tuttavia, la diffusione di queste pratiche resta parziale, e la loro efficacia dipende da condizioni più ampie: disponibilità di risorse pluriennali, capacità manageriali, formazione specialistica e cooperazione multilivello tra Stato, Regioni, enti locali e soggetti privati [Dubini (2011); Altamura (2013)].

Un ulteriore insegnamento dello stato dell'arte riguarda la relazione tra soluzioni tecniche e trasformazioni culturali. Il *White Paper* richiamato distingue tra "*small-s solutions*" (interventi tecnici e ingegneristici) e "*Big-S Solutions*" (cambiamenti nei valori, nelle pratiche sociali e nei sistemi di governance): senza le seconde le prime rischiano di restare risposte frammentarie e insufficienti nel lungo periodo. In tal senso il patrimonio può fungere da "*bridging concept*", facilitando dialogo interdisciplinare e partecipazione multilivello, ma solo se il progetto si inscrive in politiche pubbliche e percorsi partecipativi che ne sostengano la sostenibilità sociale oltre che tecnica [Shepherd (2022)].

Infine, lo stato dell'arte sottolinea che la gestione dei beni culturali non è limitata alla tutela: include valorizzazione, promozione e fruizione sostenibile. Strumenti come partenariati pubblico-privati, digitalizzazione degli archivi, fruizione virtuale e programmi di educazione e partecipazione sono parte integrante del sistema di progetto moderno, a condizione che siano governati da criteri trasparenti e orientati alla sostenibilità complessiva (Centro ASK Bocconi, 2011; Catani, 2016).

In sintesi, lo stato dell'arte registra un avanzamento concettuale e tecnico che rende il progetto di restauro maggiormente idoneo a perseguire obiettivi di durabilità e sostenibilità; tuttavia, persistono gap significativi (tecnici, contrattuali, formativi e istituzionali) che ne limitano l'efficacia operativa.

La lettura critica dello stato dell'arte e la definizione chiara delle fasi tradizionali del processo (conoscenza e diagnosi; controllo/eliminazione delle cause; risanamento e reintegrazione; manutenzione programmata e monitoraggio) costituiscono il quadro di riferimento che la tesi adotterà per analizzare, nei capitoli successivi, le singole patologie e i criteri diagnostico-progettuali necessari a superare le criticità oggi prevalenti.

TIPOLOGIE DI UMIDITÀ NELLE COSTRUZIONI

2

2.1 Umidità da costruzione

2.2 Umidità meteorica o da infiltrazione

2.3 Umidità accidentale

2.4 Umidità da condensazione

2.5 Umidità da terrapieno

2.6 Umidità da risalita capillare

2 TIPOLOGIE DI UMIDITÀ NELLE COSTRUZIONI

L'umidità rappresenta uno dei principali fattori di degrado nelle costruzioni poiché compromette non solo la durabilità dei materiali, ma anche l'efficienza funzionale e il comfort abitativo degli ambienti. La presenza di acqua all'interno dei materiali da costruzione altera le proprietà fisiche e meccaniche delle strutture, accelera i processi di degrado chimico, favorisce i meccanismi di colonizzazione biologica e peggiora le condizioni igienico-sanitarie degli ambienti interni. [Delgado (2016); Lombardi (2005); Proietti (2021); Sesana (2021); Torres (2018)]

L'acqua può penetrare nei materiali porosi sia in forma liquida che gassosa, attraverso modalità differenti e in condizioni ambientali variabili [Lombardi (2005)]. L'eterogeneità dei meccanismi di ingresso, unita alla complessità del comportamento dei materiali, rende difficile stabilire una correlazione univoca tra le cause dell'umidità e le manifestazioni visibili del degrado [Guimaraes (2016); Torres (2018)]. Infatti, una stessa causa può generare effetti differenti con manifestazioni localizzate o diffuse legate a molteplici fattori. [Delgado (2016)]

Per questa ragione, la diagnosi delle patologie da umidità richiede un approccio multidisciplinare, che tenga conto dell'analisi delle condizioni ambientali, delle caratteristiche costruttive dell'edificio e della natura dei materiali coinvolti.

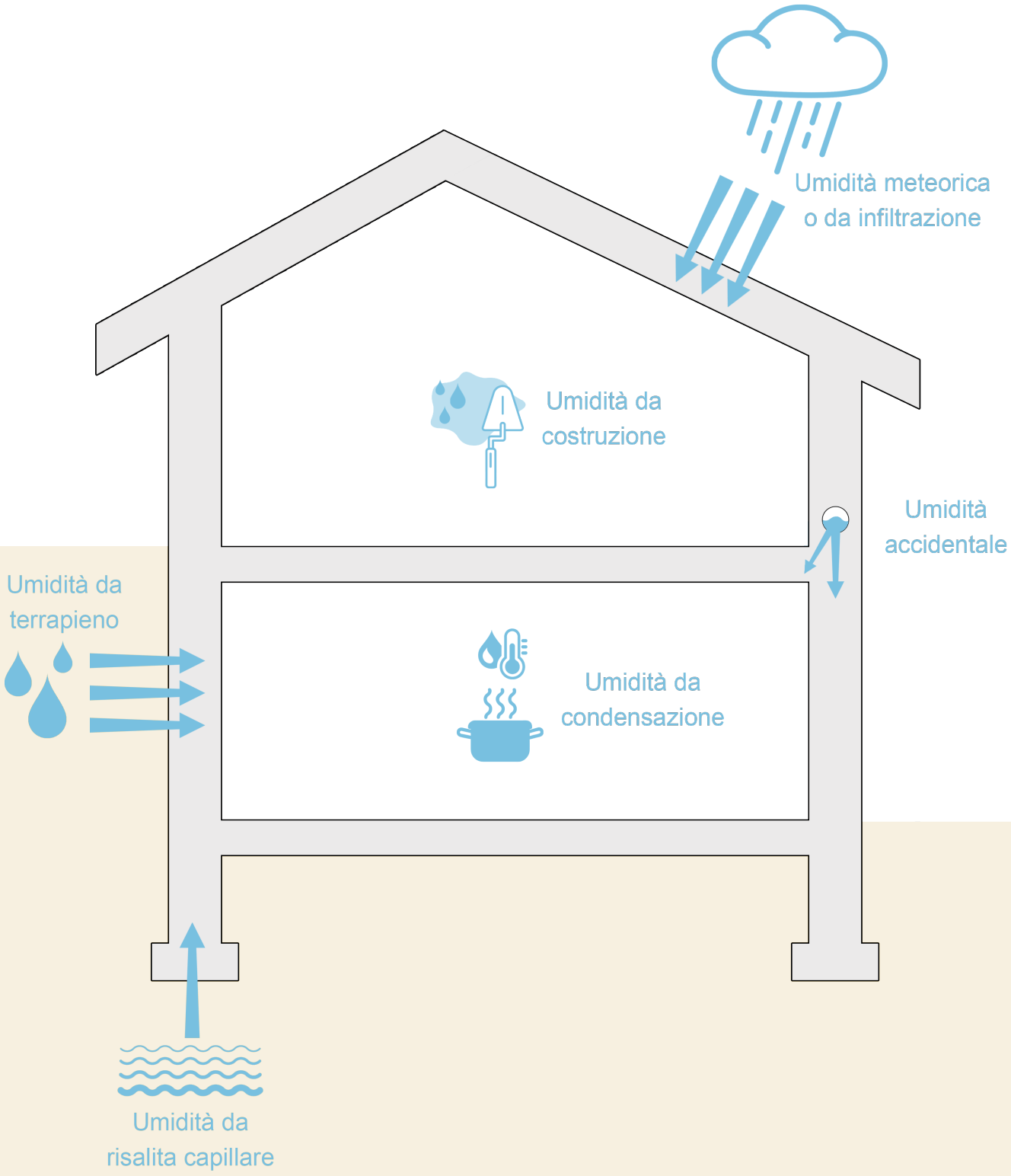
Nel caso del patrimonio architettonico, è possibile classificare l'umidità in base alla sua origine, distinguendo tre categorie principali [Delgado (2016); Lombardi (2005); Premoli (2015); Proietti (2021); Sesana (2021); Torres (2018)]:

- **Umidità atmosferica:** derivante da precipitazioni atmosferiche, condensazione, umidità relativa
- **Umidità interna all'edificio:** correlata all'uso degli ambienti interni, alle attività umane, all'assenza di ventilazione adeguata
- **Umidità proveniente dal suolo e dalle acque sotterranee:** causata da infiltrazioni, risalita capillare, percolazioni

La corretta identificazione della tipologia e dell'origine dell'umidità rappresenta un passaggio fondamentale per la definizione delle strategie di risanamento più efficaci [Lombardi (2005); Premoli (2015)]. Questo aspetto è particolarmente critico negli edifici storici, dove l'umidità tende ad assumere un carattere cronico e progressivo, a causa della naturale vulnerabilità delle strutture antiche e dell'assenza di adeguate barriere protettive.

Il presente capitolo si propone di fornire una panoramica sistematica delle principali forme di umidità che interessano il patrimonio architettonico (Fig. 2), approfondendone cause, effetti e strategie di risanamento. Particolare attenzione sarà dedicata al fenomeno dell'umidità da risalita capillare, tra i più diffusi e complessi nel campo della conservazione del patrimonio architettonico.

Fig. 2 | Tipologie di umidità nelle costruzioni



2.1

UMIDITÀ DA COSTRUZIONE

2.1 Umidità da costruzione

L'umidità da costruzione rappresenta la principale forma di umidità negli edifici di nuova costruzione o recentemente ristrutturati [Guolo (2024); Lombardi (2005)] in quanto è dovuta alla presenza residua di acqua nei materiali impiegati durante il processo edilizio, come malte, intonaci o calcestruzzo, che non hanno ancora completato il loro naturale processo di asciugatura.

Durante la realizzazione di un edificio, infatti, una quantità significativa di acqua viene incorporata nei materiali per garantire, ad esempio, le reazioni di idratazione nei cementi o per assicurare la corretta lavorabilità delle malte. Una parte di quest'acqua resta intrappolata anche dopo la posa in opera e può impiegare mesi o anni per essere completamente eliminata.

Il tempo necessario alla completa asciugatura dipende principalmente dal tipo di materiale e dal suo spessore, ed è descritto empiricamente attraverso il cosiddetto ***coefficiente di prosciugamento (p)*** [Lombardi (2005)]. Questo coefficiente, specifico per ciascun materiale, permette di stimare il tempo di asciugatura secondo la formula:

$$t = p \cdot s^2$$

Dove:

- ***t*** è il tempo in giorni
- ***p*** è il coefficiente di prosciugamento
- ***s*** è lo spessore della muratura [cm]

L'introduzione di questa formula consente una valutazione predittiva delle tempistiche di asciugatura in funzione della composizione stratigrafica degli elementi costruttivi.

Il fenomeno dell'umidità da costruzione tende a manifestarsi entro i primi 6-12 mesi dal termine dei lavori. Si riconosce attraverso macchie irregolari e localizzate che, in condizioni favorevoli, si riducono spontaneamente nel tempo. Qualora il processo di evaporazione venga ostacolato da rivestimenti poco traspiranti, assenza di ventilazione o condizioni microclimatiche sfavorevoli, l'umidità residua può migrare verso la superficie provocando rigonfiamenti, distacchi dell'intonaco, efflorescenze saline e alterazioni cromatiche. In questi casi la sua diagnosi può risultare complessa e talvolta confusa con altre forme di umidità. [Lombardi (2005)]

Le cause principali dell'umidità da costruzione si riconducono a tre categorie [Vitiello, Castelluccio (2019)]:

- **Fattori costruttivi:** applicazione prematura di intonaci o rivestimenti non traspiranti su sottofondi ancora umidi; uso eccessivo di acqua negli impasti o nella bagnatura dei materiali; cattiva gestione delle acque in cantiere
- **Fattori ambientali:** esposizione prolungata alla pioggia durante i lavori; condizioni ambientali sfavorevoli come elevata umidità relativa, basse temperature, scarsa ventilazione e ridotto soleggiamento
- **Fattori d'uso:** messa in esercizio precoce degli ambienti che limita l'aerazione naturale e rallenta l'evaporazione del contenuto umido delle strutture

Per prevenire questo fenomeno è fondamentale adottare accorgimenti in fase di cantiere e nella successiva gestione dell'edificio. Tra le strategie più efficaci si annoverano l'impiego di materiali a basso contenuto d'acqua, il rispetto dei tempi tecnici di asciugatura, la corretta ventilazione (naturale o forzata) e l'uso di rivestimenti traspiranti [Guolo (2024) ; Lombardi (2005);

Vitiello, Castelluccio (2019)].

Qualora la riduzione spontanea del contenuto umido non avvenga entro tempi tecnicamente accettabili, si può ricorrere a tecniche di asciugatura attiva, come l'impiego controllato di deumidificatori, sistemi di riscaldamento a bassa temperatura e ventilazione forzata.

Particolare attenzione va, infine, riservata agli interventi di restauro sul patrimonio architettonico esistente. L'applicazione di nuovi materiali, soprattutto se contenenti elevate quantità d'acqua, a diretto contatto con i substrati originari può generare incompatibilità chimico-fisiche e meccaniche. Il trasferimento di umidità dai nuovi materiali a quelli preesistenti rischia di innescare fenomeni di degrado superficiale, alterazioni cromatiche, efflorescenze saline e perdita di coesione materica. Per tale motivo, la scelta dei materiali da impiegare nel restauro deve sempre tener conto della compatibilità igrometrica e materica con i substrati originari dell'organismo edilizio.

2.2

UMIDITÀ METEORICA O DA INFILTRAZIONE

2.2 Umidità meteorica o da infiltrazione

L'umidità meteorica, o da infiltrazione, è causata dall'ingresso di acqua piovana o di falda all'interno delle strutture edilizie attraverso elementi costruttivi non adeguatamente impermeabilizzati o danneggiati. Si tratta di una delle forme più comuni di degrado edilizio, particolarmente frequente negli edifici esistenti o situati in aree caratterizzate da condizioni climatiche particolarmente avverse. [Lombardi (2005); Vitiello, Castelluccio (2019)]

Le infiltrazioni si distinguono in due tipologie principali [Guolo (2024); Vitiello, Castelluccio (2019)]:

- **Accidentali:** dovute a difetti tecnologico-costruttivi o al malfunzionamento dei sistemi di raccolta e smaltimento delle acque meteoriche
- **Da acqua piovana:** originate dal deterioramento o dalla scarsa manutenzione degli strati protettivi (intonaci, impermeabilizzazioni, rivestimenti), che consentono alla pioggia battente di penetrare nei materiali da costruzione

Le parti maggiormente esposte dell'edificio sono quelle esposte ai venti dominanti, con limitata ventilazione e scarso soleggiamento, nonchè i punti deboli dell'involucro edilizio: fessurazioni e crepe nelle murature o negli strati di finitura, coperture con manti compromessi, giunti non sigillati, raccordi con elementi metallici.

Gli effetti dell'umidità da infiltrazione si manifestano con alterazioni cromatiche (macchie umide e scure) sulle superfici, distacchi e rigonfiamento dei rivestimenti, efflorescenze saline, corrosione degli elementi metallici e proliferazione di muffe e funghi. Questi fenomeni compromettono non solo l'estetica dell'edificio, ma anche la durabilità delle strutture e la salubrità degli ambienti interni. [Vitiello, Castelluccio (2019)]

Tra i meccanismi di penetrazione, un caso particolare è rappresentato dalla pioggia a vento, in cui la combinazione tra pressione esercitata dal vento e capillarità dei materiali favorisce l'ingresso dell'acqua nelle murature [Gholamalipour (2022); Premoli (2015)]. Sebbene solitamente episodico e circoscritto, questo fenomeno può assumere un carattere rilevante in presenza di eventi meteorologici intensi e ripetuti, quando i tempi di evaporazione non sono sufficienti. In tali circostanze, l'acqua tende ad accumularsi sulla superficie interna della muratura, con una distribuzione decrescente verso il centro. Questo accumulo genera un raffreddamento dell'intero spessore murario, che può favorire la condensazione del vapore acqueo interno, soprattutto in condizioni di elevata umidità relativa.

La diagnosi di questa tipologia di umidità si esegue attraverso indagini visive e strumentazioni non invasive, in grado di individuare anomalie termiche e alterazioni superficiali (fessurazioni, rigonfiamenti, cavillature). Nei casi in cui l'acqua migri all'interno della muratura prima di manifestarsi in superficie, possono rendersi necessari saggi localizzati, misurazioni igrometriche e indagini termografiche approfondite.

Per la prevenzione e il risanamento dell'umidità meteorica è fondamentale intervenire sulle cause mediante la realizzazione o il ripristino degli strati impermeabili, la sigillatura di fessure e giunti, la manutenzione e il corretto funzionamento dei sistemi di smaltimento delle acque meteoriche.

Una volta eliminata la causa dell'infiltrazione, il risanamento delle murature avviene, generalmente, per evaporazione naturale e pertanto è importante che i materiali di finitura siano traspiranti per favorire l'evaporazione dell'umidità residua.

2.3

UMIDITÀ ACCIDENTALE

2.3 Umidità accidentale

L'umidità accidentale si verifica quando l'acqua penetra in modo improvviso e non controllato nelle strutture edilizie a seguito di guasti, malfunzionamenti o errori costruttivi [Lombardi (2005)].

Le cause più frequenti includono la rottura delle tubazioni di impianti idrici, di riscaldamento o di scarico (spesso incassate nelle murature o sotto i pavimenti), la fuoriuscita accidentale di acqua da sanitari, lavatrici o caldaie, e interventi edilizi mal eseguiti come forature involontarie o il mancato ripristino dell'impermeabilizzazione dopo lavori di manutenzione.

La gestione di questo fenomeno risulta particolarmente complessa negli edifici storici, dove gli impianti sono spesso stati inseriti o modificati in epoche successive seguendo percorsi irregolari e privi di adeguata protezione. Ciò favorisce la corrosione delle condutture e complica la localizzazione delle perdite. Infatti una volta che l'acqua penetra all'interno di un organismo edilizio, può diffondersi all'interno delle strutture per capillarità e per effetto della gravità, raggiungendo punti anche molto lontani dalla perdita originaria.

Pur essendo generalmente episodica, l'umidità accidentale può causare danni estesi e persistenti se non individuati e risolta tempestivamente.

I danni tipici sono, in genere, localizzati e si manifestano con macchie, rigonfiamenti e distacchi dell'intonaco, percolazioni visibili su pareti e soffitti. Se trascurata, favorisce la formazione di muffe, la comparsa di efflorescenze saline e un progressivo deterioramento delle parti coinvolte.

La diagnosi deve considerare che la traccia visibile raramente coincide con l'origine della perdita. Per questo motivo l'indagine combina ispezione fisica e strumenti non invasivi (termocamera a infrarossi, igrometri a contatto o a microonde) integrati, ove necessario, da saggi localizzati. Questi metodi consentono di mappare l'umidità, rilevare anomalie termiche e misurare il contenuto d'acqua nei materiali, facilitando l'identificazione precisa della sorgente.

Il risanamento implica, innanzitutto, l'eliminazione della causa, mediante la riparazione dell'impianto o del componente danneggiato. Successivamente si procede all'asciugatura delle strutture interessate. Nei casi di edifici storici o di finiture particolarmente delicate, le tecniche di asciugatura devono essere selezionate in base alla compatibilità con i materiali e con i criteri conservativi. Una volta ristabilite le condizioni igrometriche ottimali, si procede al ripristino delle finiture.

2.4

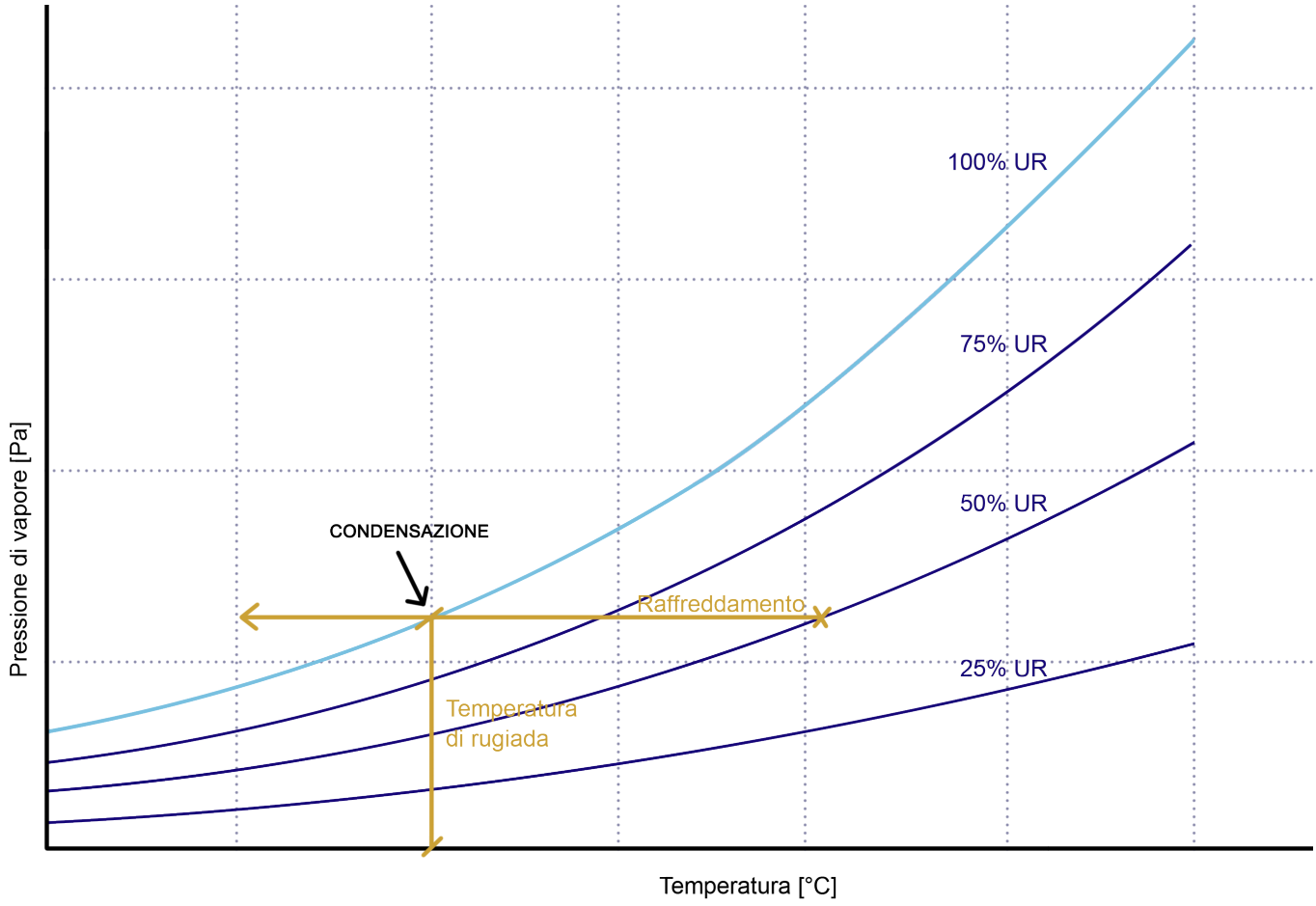
UMIDITÀ DA CONDENSAZIONE

2.4 Umidità da condensazione

L'umidità da condensazione si manifesta quando il vapore acqueo presente nell'aria si trasforma in acqua allo stato liquido entrando in contatto con superfici la cui temperatura è pari o inferiore al punto di rugiada [Chen (2024); Vitiello, Castelluccio (2019)]. Questo fenomeno avviene quando l'aria, a una data temperatura e umidità relativa, raggiunge la saturazione igrometrica, ovvero il limite oltre il quale non può più contenere ulteriori quantità di vapore in sospensione. In questo stato, l'eccesso di vapore condensa, dando origine a micro-gocce d'acqua sulle superfici.

La capacità dell'aria di trattenere vapore è funzione diretta della temperatura (Fig. 3): al diminuire della temperatura diminuisce anche la capacità di contenimento del vapore, abbassando la soglia di saturazione e favorendo l'innesco del fenomeno [Lombardi (2005); Metals (2024)]. L'***umidità relativa*** (***UR***), definita come il rapporto tra la quantità di vapore effettivamente presente nell'aria e

Fig. 3 | Variazione del punto di rugiada in funzione della temperatura e dell'umidità relativa



quella massima teoricamente contenibile alla stessa temperatura, costituisce un parametro diagnostico essenziale nella valutazione del rischio di condensazione. L'analisi di tale grandezza mediante il diagramma psicrometrico di Mollier [Lešinskis (2024); Pizzetti (1989)], che mette in relazione temperatura, UR e contenuto assoluto di vapore, consente di evidenziare come, in presenza di basse temperature superficiali o di scarsa ventilazione, anche valori moderati di umidità relativa possano risultare critici.

Il fenomeno è fortemente influenzato dalle condizioni termo-igrometriche degli ambienti e dalla loro interazione con l'involucro edilizio [Lombardi (2005); Metals (2024); Premoli (2015); Vitiello, Castelluccio (2019)]. Le principali cause che favoriscono o aggravano la condensazione si possono ricondurre a due ambiti principali:

- **Errori progettuali:** inadeguato isolamento dei ponti termici; errata stima della conducibilità termica dei materiali in condizioni reali di esercizio; spessori murari insufficienti e inerzia termica inadeguata; mancata previsione di sistemi di controllo dell'umidità interna; installazione di infissi ad alta tenuta all'aria senza adeguati sistemi di ventilazione; posa non conforme dei materiali isolanti; impiego di finiture superficiali impermeabili
- **Errori gestionali e impiantistici:** conduzione intermittente del riscaldamento; assenza di sistemi di aspirazione in ambienti ad alta produzione di vapore; ventilazione insufficiente

Dal punto di vista fenomenologico, si distinguono due principali modalità di condensazione: superficiale e interstiziale [Lombardi (2005); Vitiello, Castelluccio (2019)].

La ***condensazione superficiale***, immediatamente percepibile, si verifica sulla superficie degli elementi edilizi in corrispondenza di zone con temperature inferiori al punto di rugiada. Questa situazione è spesso favorita dalla presenza di ponti termici che fungono da vie preferenziali per le dispersioni termiche, determinando localizzate riduzioni della temperatura superficiale. Su superfici impermeabili, la condensa si manifesta come formazione di goccioline d'acqua; su superfici porose, invece, il vapore penetra nel materiale, condensando al suo interno e causando macchie, alterazioni cromatiche, efflorescenze saline, distacchi e rigonfiamenti. Le aree maggiormente colpite sono tipicamente quelle orientate a nord o scarsamente irradiate, specialmente in ambienti poco ventilati e con forte produzione interna di umidità.

La ***condensazione interstiziale***, più insidiosa e meno evidente, si verifica all'interno della stratigrafia muraria quando il vapore migra verso strati costruttivi caratterizzati da temperature inferiori al punto di rugiada. La presenza di materiali non traspiranti, una distribuzione incoerente delle resistenze al passaggio del vapore o una sequenza errata dei materiali (es. la collocazione di una barriera al vapore sul lato interno della parete) può favorire questo fenomeno. L'umidità interstiziale compromette progressivamente le proprietà termoigrometriche dei materiali isolanti, riducendo l'efficienza energetica dell'involucro e, nei casi più gravi, provocando fenomeni di corrosione nei componenti metallici, come le armature del calcestruzzo armato.

La diagnosi, in questo caso, non può limitarsi all'osservazione delle manifestazioni visibili, ma richiede indagini strumentali e analisi dei parametri ambientali. È necessario procedere con misurazioni delle temperature superficiali delle pareti, monitorare i parametri termo-igrometrici interni, verificare l'efficienza della ventilazione naturale o meccanica e, ove necessario, valutare le prestazioni termoigrometriche dell'involucro edilizio, attraverso il calcolo della trasmittanza termica e la verifica dei ponti termici. Tecniche di rilievo termografico, igrometrico e simulazioni dinamiche consentono di modellare i flussi di vapore e le condizioni di condensazione potenziale.

Le strategie di prevenzione e mitigazione devono agire sia sul fronte termico che su quello igrometrico [Chen (2024); Guolo (2024); Premoli (2015)]: corretta progettazione

dell'involucro edilizio (isolamento adeguato, continuità dello strato isolante, eliminazione dei ponti termici), uso di materiali traspiranti e di adeguati spessori e posa degli isolanti, corretta sequenza della stratigrafia muraria. È essenziale garantire, inoltre, un ricambio d'aria sufficiente (almeno 0,5 V/h) attraverso sistemi di ventilazione naturale o meccanica controllata e, se necessario, integrare con sistemi di deumidificazione.

In ambienti con condizioni ambientali particolarmente critiche, come seminterrati o locali poco riscaldati e soggetti a forti escursioni termiche, sono raccomandati interventi specifici quali l'adozione di vespai aerati, pareti ventilate e sistemi passivi di regolazione igroscopica per evitare l'accumulo di umidità.

Dal punto di vista gestionale, una conduzione termica stabile (evitando sbalzi termici all'interno degli edifici) riduce sensibilmente il rischio di condensazione.

2.5

UMIDITÀ DA TERRAPIENO

2.5 Umidità da terrapieno

L'umidità da terrapieno è una manifestazione complessa e spesso persistente dell'umidità da contatto, tipica delle strutture a diretto contatto con il terreno (pareti perimetrali di seminterrati, interrati e muri di contenimento) [Lombardi (2005); Tulakov (2024); Vitiello, Castelluccio (2019)] e caratterizzata da una dinamica laterale di migrazione dell'acqua, diversa dalla risalita capillare con dinamica ascensionale. Tale fenomeno è dovuto alla pressione esercitata dalle masse d'acqua presenti nel terreno circostante la struttura, dovuta alla saturazione del suolo, alla risalita del livello freatico o a inefficiente smaltimento delle acque meteoriche, con conseguente spinta idrostatica verso l'interno degli ambienti confinati.

Il meccanismo alla base dell'umidità da terrapieno è riconducibile principalmente alla percolazione dell'acqua attraverso il terreno. Tale processo risulta particolarmente intenso in presenza di terreni con scarse capacità drenanti, come argille o limi, e in condizioni di assente o inefficiente gestione delle acque di superficie. A questo fenomeno si somma la diffusione di vapore acqueo dai terreni umidi verso le pareti fredde, che può portare alla condensazione interstiziale laddove si raggiunga il punto di rugiada.

È utile distinguere la semplice ***umidità da terrapieno*** da quella indotta dalla ***controspinta idrostatica***: nella prima l'acqua si accumula e migra lateralmente per semplice contatto nella muratura, mentre nella seconda c'è una vera e propria pressione idrostatica tale da attraversare l'intero spessore murario fino a manifestarsi sulla superficie interna della muratura.

Manifestazioni tipiche di questa tipologia di umidità sono la presenza stagionale di aree umide persistenti, efflorescenze saline, rigonfiamenti e distacchi degli strati superficiali della muratura, fessurazioni e colonizzazioni biologiche con impatti sul comfort e la salubrità ambientale [Vitiello, Castelluccio (2019)]. Nei casi più gravi il quadro patologico può avere anche rilevanza strutturale.

La diagnosi richiede una lettura critica delle condizioni morfologiche del sito, un'analisi geotecnica dei terreni circostanti e una valutazione delle stratigrafie edilizie interessate. Spesso è necessario affiancare indagini non distruttive, come termografie o misurazioni di umidità mediante igrometri, ad analisi più approfondite *in situ*, soprattutto per verificare lo stato delle impermeabilizzazioni o l'eventuale presenza di vie preferenziali per la migrazione dell'umidità.

Il controllo e il risanamento degli edifici affetti da umidità da terrapieno richiedono un approccio multilivello. Innanzitutto l'eliminazione delle cause idriche (drenaggio efficiente del terreno circostante, abbassamento della falda ove possibile, gestione delle acque superficiali) e la creazione di barriere impermeabilizzanti continue [Vitiello, Castelluccio (2019)]. Ogni intervento deve essere, infatti, preceduto e accompagnato dal controllo attivo del bilancio idrico nel terreno circostante: solo interrompendo o allontanando i flussi idrici attivi è possibile ottenere un'effettiva riduzione del contenuto d'acqua e prevenire recidive nel tempo.

In fase di intervento si adottano tecniche quali trincee drenanti o aerate, contropareti ventilate, vespai aerati, intonaci risananti e sistemi di ventilazione (naturale o meccanica) per favorire l'evaporazione controllata dell'umidità dalle murature.

Negli edifici esistenti, e in particolare nel patrimonio storico, le soluzioni devono essere compatibili con i materiali originari e rispettare i principi di reversibilità e compatibilità igrometrica.

2.6

UMIDITÀ DA RISALITA CAPILLARE

2.6 Umidità da risalita capillare

Negli ultimi decenni il cambiamento climatico ha modificato in modo significativo regimi pluviometrici, temperature medie stagionali e distribuzione dell'umidità atmosferica, alterando il comportamento igrometrico degli edifici e introducendo criticità che spesso vengono sottovalutate nelle pratiche di diagnosi e risanamento [Cacciotti (2021); Fragata (2021); Kilian (2023); Koka (2024); Lubelli (2018); Sesana (2021)].

Un effetto immediato riguarda l'aumento della frequenza e dell'intensità delle precipitazioni, concentrate in eventi meteorici estremi in brevi finestre temporali. In assenza di sistemi di drenaggio efficaci, questi eventi determinano ristagni che saturano i terreni attigui alle fondazioni, innalzando la falda e ampliando la zona di contatto tra acqua e muratura. Anche variazioni dell'ordine di centimetri della francia capillare possono aumentare la pressione idrostatica e favorire l'attivazione o l'intensificazione della risalita capillare, con ricadute dirette sulla frequenza e sulla severità del danno. Le evidenze empiriche indicano come questi effetti siano già osservabili in contesti climatici diversi. [Janssens (2023); Janssens (2024); Lubelli (2018); Sardella (2018); Sesana (2021)].

Parallelamente, l'aumento delle temperature medie stagionali produce due effetti concomitanti e apparentemente contrapposti: accelera l'evaporazione in periodi caldi e secchi, aumentando la variabilità stagionale del bilancio idrico murario, e contemporaneamente accentua i cicli termo-igrometrici (imbibizione/asciugatura) che sollecitano i materiali e ne riducono la resilienza nel tempo. Materiali ad alta igroscopicità risultano così più vulnerabili a degrado fisico, alterazioni chimiche e attacchi biologici dovuti ai ripetuti cicli di imbibizione-asciugatura.

Un ulteriore fattore aggravante è l'innalzamento medio delle falde, favorito dall'impermeabilizzazione diffusa delle superfici urbane e dalle modifiche del ciclo idrologico: fenomeni che trasformano eventi episodici in condizioni più persistenti di contatto acqua-organismo edilizio. L'alternanza tra eventi estremi e periodi di siccità aumenta inoltre l'accumulo di sali solubili nel terreno, con conseguente incremento dell'igroscopicità dei materiali e ostacolo ai processi evaporativi, e favorisce cicli di degrado accelerato quali le sub-efflorescenze saline.

Per questi motivi il cambiamento climatico non è un elemento marginale, ma agisce da driver amplificatore delle vulnerabilità igrometriche preesistenti, specialmente nel patrimonio storico dove l'assenza di barriere continue e la fragilità dei materiali incrementano il rischio di danni irreversibili [Janssens (2023); Koka (2024)].

Tale minaccia si estende anche all'innalzamento del livello del mare e all'intensificazione delle mareggiate, che provocano erosione costiera, inondazioni e sommersioni, oltre a modifiche delle dinamiche fluviali interne [Falchi (2024); Sardella (2018); Sesana (2021)]. Inoltre, l'interazione tra cambiamenti climatici e altri fattori ambientali, come l'inquinamento atmosferico, rappresenta un ulteriore rischio da considerare nella pianificazione di strategie di conservazione efficaci.

Tra i fenomeni maggiormente influenzati da queste alterazioni, l'umidità da risalita capillare si configura come una delle problematiche più diffuse e complesse da affrontare [Cacciotti (2021); Guimaraes (2016); Koka (2024); Lombardi (2005); Sardella (2018)]. Comprendere come il mutato equilibrio ambientale contribuisca all'attivazione e all'intensificazione della risalita capillare è quindi fondamentale per progettare strategie conservative efficaci e durature.

La rilevanza del problema della risalita capillare,

riconosciuta a livello internazionale, deriva sia dalla frequenza con cui si presenta sia dalla gravità dei danni associati, che in assenza di adeguati interventi possono condurre al collasso di porzioni murarie o, in casi estremi, dell'intero edificio.

Originata dalla migrazione ascensionale dell'acqua presente nel terreno attraverso la rete porosa dei materiali da costruzione, essa dipende dall'esistenza di una sorgente idrica persistente (falda freatica, acque di scorrimento sotterranee, acque disperse) e dalla porosità interconnessa dei materiali stessi [Delgado (2016); EMERISDA Project (2014); Falchi (2024); Guolo (2024); Hall (2009); Proietti (2021); Vitiello, Castelluccio (2019)].

La letteratura scientifica ha fornito diverse interpretazioni del fenomeno. Oxley e Gobert (1989) lo descrivono come un effetto diretto del flusso capillare dell'acqua dal terreno; Melville e Gordon (1998) ne identificano l'origine nella falda freatica, che alimenta la base muraria; altri autori, tra cui Burkinshaw e Parrett (2004), considerano anche la possibilità di migrazione attraverso microfessure o come vapore, richiamando l'attenzione sulla difficoltà nel distinguere la risalita capillare da altre forme di umidità superficiale. Trotman et al. (2004) e Alfano et al. (2006) sottolineano il ruolo determinante delle proprietà capillari dei materiali porosi nel regolare la dinamica del fenomeno. Il *BRE Digest* (2007) indica che la risalita si manifesta soprattutto in presenza di terreni saturi a contatto con le fondazioni, mentre secondo Burkinshaw (2009) è imprescindibile, per definirla come tale, che l'umidità provenga da una fonte persistente e significativa alla base della muratura. [Agyekum (2016); Agyekum (2019)]

Alla luce di queste considerazioni, si può proporre una definizione secondo la quale l'umidità di risalita capillare può essere intesa come quella forma di umidità originata dall'acqua contenuta nel terreno che, in presenza di materiali da costruzione porosi, tende a risalire verso l'alto per capillarità dalla base delle strutture murarie e di fondazione. Tuttavia, la sola presenza di acqua non è sufficiente in quanto, perché si abbia umidità di risalita, è necessario che l'alimentazione idrica sia costante in modo da sostenere la formazione di una colonna capillare attiva e continua. In assenza di tale continuità, l'infiltrazione si comporta secondo una dinamica gravitazione, con propagazione verso il basso o in direzione orizzontale. Soltanto in presenza di un flusso idrico persistente e di un substrato murario saturo nella sua parte inferiore si innesca una vera risalita capillare.

Per la sua natura pervasiva, la risalita capillare rappresenta una delle sfide più complesse nella conservazione dell'edilizia storica. Spesso il fenomeno evolve lentamente e passa inosservato fino alla comparsa dei primi sintomi visibili, ritardando diagnosi ed interventi [Diaz Goncalves (2024); Falchi(2024); Feilden (2003); Fragata (2016); Lombardi (2005); Proietti (2021)]. Una comprensione profonda dei meccanismi di innesco e propagazione è dunque essenziale per affrontare con rigore metodologico le fasi successive dell'analisi. Nei prossimi paragrafi verranno esaminate le condizioni predisponenti che favoriscono l'attivazione del fenomeno, le modalità con cui esso si manifesta e le principali forme di degrado che ne derivano.

2.6.1 Cause della risalita capillare

Perché si manifesti la risalita capillare è necessaria la presenza simultanea di tre condizioni fondamentali: (i) il contatto diretto dell'organismo edilizio con il terreno; (ii) la presenza di una sorgente idrica continua nel sottosuolo; (iii) l'impiego di materiali da costruzione caratterizzati da una rete porosa interconnessa che consenta un flusso ascensionale per capillarità.

In base alla natura della sorgente d'acqua che alimenta il sistema, l'umidità di risalita si distingue in [EMERISDA Project (2014); Guolo (2024)]:

- **Umidità primaria:** alimentata da falde freatiche o flussi sotterranei stabili riforniti da precipitazioni, infiltrazioni o scioglimento delle nevi, che si accumulano al di sopra di strati impermeabili del terreno [Lombardi

(2005); Premoli (2015)]. In presenza di falda superficiale la risalita è generalmente omogenea in tutta la pianta dell'edificio ed è poco soggetta a fluttuazioni stagionali, salvo variazioni significative del livello piezometrico o delle condizioni termoigrometriche

- **Umidità secondaria:** riconducibile ad apporti locali ed intermittenti dovuti alle acque disperse (perdite da reti impiantistiche, disconnessioni impiantistiche, deflusso delle acque meteoriche, errato livello del piano di campagna) [Lombardi (2005); Premoli (2015)]. In questi casi la distribuzione dell'umidità è irregolare, spesso limitata a porzioni dell'edificio, con una fascia umida soggetta a marcate variazioni stagionali. Se persistente, tale umidità può simulare o amplificare la risalita primaria.

La distinzione tra queste due tipologie è fondamentale in fase diagnostica in quanto se l'umidità primaria richiede strategie di intervento più complesse per contenere o bloccare l'apporto capillare, quella secondaria può essere affrontata con interventi puntuali volti ad eliminare la causa specifica. Pertanto la comprensione della natura della sorgente d'acqua è il primo passo per impostare un piano di intervento efficace.

La risalita capillare si configura come un processo multifattoriale il cui comportamento dinamico dipende dall'equilibrio tra caratteristiche costruttive e materiche dell'edificio e dalle variabili ambientali, climatiche e geotecniche del contesto [Kportufe (2015); Lombardi (2005)].

2.6.1.1 Condizioni Climatiche, Ambientali e Geotecniche

Il comportamento della risalita capillare è fortemente influenzato dalle variabili ambientali e climatiche che regolano l'equilibrio idrico della muratura [Ciocan (2019); Feilden (2003); Franzoni (2023); Guolo (2024); Lombardi (2005)]. Il fenomeno si manifesta come il risultato di un bilancio dinamico tra l'acqua assorbita alla base della struttura e quella evaporata dalla superficie.

Il tasso di evaporazione può essere descritto fisicamente dalla relazione [Lopez-Arce (2009); Torres (2018)]:

$$g = \beta(Cs' - Ca')$$

Dove:

- g è la densità del flusso di asciugatura [kg/m2s]
- β è il coefficiente di trasferimento superficiale dell'umidità [m/s]
- Cs' è la concentrazione del vapore acqueo sulla superficie
- Ca' è la concentrazione del vapore acqueo nell'aria

Quando la differenza tra Cs' e Ca' è trascurabile, come accade frequentemente negli edifici storici dove la temperatura interna dell'aria e quella delle pareti tendono a coincidere, il flusso evaporativo è quasi nullo, ciò compromette significativamente la capacità della muratura di smaltire l'umidità assorbita.

Soleggiamento, orientamento e caratteristiche superficiali (colore, emissività, inerzia termica) condizionano la temperatura superficiale e, quindi, il potenziale evaporativo [Franzoni (2023); Torres (2018)]. Pareti esposte a sud e sud-ovest ricevono maggiore radiazione solare e raggiungono temperature superficiali più elevate, favorendo l'asciugatura e limitando l'altezza del fronte umido; pareti rivolte a nord mostrano invece una maggiore persistenza dell'umidità e una risalita capillare più marcata.

La ventilazione, sia esterna che interna, aumenta il coefficiente β ed è fra i fattori più impattanti nel bilancio idrico di una muratura [Franzoni (2023); Torres (2018)]. La circolazione dell'aria intorno e dentro l'edificio accelera il processo di asciugatura, con un effetto amplificato in presenza di vento. Alcuni studi dimostrano che l'evaporazione può aumentare da tre a cinque volte in presenza di vento moderato, e da due a tre volte per effetto della radiazione solare

diretta [Lombardi (2005)]. Per questo motivo gli ambienti ipogei o mal ventilati favoriscono l'accumulo e la risalita dell'umidità.

Data l'influenza delle condizioni ambientali è intuibile come il fenomeno della risalita capillare sia soggetto a marcate fluttuazioni stagionali [Franzoni (2023); Guolo (2024)]. L'aumento della temperatura, infatti, modifica le proprietà fisiche dell'acqua: una temperatura più alta abbassa la viscosità dell'acqua e facilita il movimento capillare e le dinamiche di imbibizione-asciugatura, intensificando i cicli umido-secco che degradano i materiali igroscopici. Questo andamento ciclico è particolarmente evidente nei climi temperati, dove il contenuto idrico della muratura tende ad essere massimo in primavera (residuo invernale) e minimo in autunno (dopo la fase estiva di evaporazione).

Infine, la natura del terreno e la quota della falda freatica, sui quali sorge l'organismo edilizio, sono determinanti [Franzoni (2023); Guolo (2024)]. La stratigrafia e la permeabilità del suolo regolano la quantità e la velocità con cui l'acqua raggiunge la muratura: suoli sciolti, sabbiosi e ben drenanti ostacolano la formazione di una frangia capillare significativa, limitando la risalita; suoli fini e coesivi (es. argille e limi) favoriscono, invece, l'accumulo idrico e l'innalzamento più lento e persistente del fronte umido.

Per comprendere la dinamica del fenomeno e definire un piano di intervento mirato, è indispensabile un monitoraggio sistematico dei principali parametri:

- Livello e variabilità della falda freatica
- Natura e salinità del suolo
- Temperatura e umidità relativa interna ed esterna
- Quantità e distribuzione delle precipitazioni
- Ventilazione e irraggiamento solare sulle superfici murarie

Questi dati, integrati con rilievi murari e analisi dei materiali, consentono di ricostruire il bilancio idrico della struttura, valutare le potenzialità di evaporazione e identificare le reali condizioni di innesco, sviluppo e mantenimento della risalita capillare. Tali valutazioni costituiscono una base imprescindibile per la progettazione di strategie conservative efficaci e durature.

2.6.1.2 Presenza di Sali Solubili

La presenza di sali solubili nel terreno o nei materiali da costruzione è un fattore determinante nell'evoluzione e nell'intensificazione della risalita capillare [Franzoni (2023); Guolo (2024); Lombardi (2005); Torres (2018)]. Durante il moto ascensionale dell'acqua, i sali vengono disciolti e trasportati in soluzione. Raggiunte le zone di evaporazione, l'acqua evapora e i sali precipitano accumulandosi nella fascia di evaporazione.

Il trasporto dei sali igroscopici all'interno del materiale comporta due conseguenze fondamentali: in primo luogo, la cristallizzazione progressiva dei sali tende a ridurre la dimensione dei pori capillari, ostacolando i naturali processi di evaporazione e incrementando la capacità di suzione del materiale; in secondo luogo, l'accumulo di sali all'interno dei materiali ne incrementa l'igroscopicità, ovvero la capacità di assorbire e trattenere umidità atmosferica. In questo modo, l'umidità può permanere o addirittura aumentare anche in assenza di nuovo apporto di acqua liquida dal basso, innescando un meccanismo di autoalimentazione del contenuto idrico all'interno della muratura. [Lopez-Arce (2009); Occhipinti (2023); Stastny (2021)]

L'aumento della concentrazione salina modifica, inoltre, i gradienti osmotici locali: materiali con alta concentrazione si sali esercitano forze osmotiche maggiori che attraggono acqua dalle zone circostanti a minore concentrazione salita, ostacolando il raggiungimento dell'equilibrio idrico nella muratura e mantenendo attivo il flusso di risalita [Lombardi (2005); Feilden (2003].

Nel tempo, cicli ripetuti di imbibizione-evaporazione-cristallizzazione concentrano progressivamente i sali nella fascia di evaporazione, aumentando ulteriormente l'igroscopicità locale e rafforzando il fenomeno di degrado.

Dal punto di vista pratico, la presenza e la natura dei sali condizionano sia il tipo di danno che le tecniche di diagnostica e risanamento degli edifici. Pertanto la valutazione quantitativa e qualitativa dei sali costituisce un passaggio diagnostico imprescindibile in ogni indagine di risalita capillare.

2.6.1.3 Caratteristiche Dell'Edificio e Proprietà Dei Materiali Da Costruzione

Il comportamento della muratura nei confronti dell'umidità da risalita capillare è legato anche alla natura dei materiali impiegati ed alla configurazione geometrica e tecnologica dell'edificio [Franzoni (2023); Guolo (2024); Premoli (2015); Torres (2018); Vitiello, Castelluccio (2018)]. La risalita capillare è, infatti, il risultato di un equilibrio complesso che integra la capacità di un materiale di assorbire e trattenere acqua, la continuità capillare della massa muraria e la presenza di elementi di discontinuità o protezione.

Come sarà approfondito nel capitolo dedicato ai meccanismi di trasporto nei materiali da costruzione, la condizione materica primaria che abilita la risalita capillare è la porosità aperta e interconnessa: laterizi pieni, pietre naturali porose e malte a base di calce possiedono reti capillari in grado di attivare e sostenere un flusso ascensionale continuo. Le caratteristiche porometriche (dimensione, distribuzione e tortuosità dei pori) regolano direttamente la velocità e l'altezza della risalita [Torres (2018)]: pori più piccoli generano forze capillari maggiori, ma imbibizione più lenta; pori più grandi permettono un'imbibizione più rapida ma meno persistente. Per questo motivo gli studi porosimetrici e di assorbimento capillare sono strumenti diagnostici essenziali per valutare l'idoneità igrometrica dei materiali.

Nelle murature in laterizio, ad esempio, il potere assorbente del mattone può essere fino a 3-5 volte superiore a quello della malta; giunti sottili e regolari tendono ad uniformare il comportamento igrometrico complessivo della muratura, favorendo risalite rapide e continue lungo il paramento. [Lombardi (2005); Premoli (2015)]

Al contrario, murature in pietrame disordinato o irregolare presentano dinamiche più lente e frammentate: blocchi di grandi dimensioni possono superare l'altezza di adescamento (ovvero la capacità di imbibizione verticale per capillarità) e mantenere il nucleo relativamente asciutto, con accumuli localizzati di umidità nei giunti di allettamento e manifestazioni di degrado eterogenee. [Lombardi (2005)]

La geometria muraria (spessore, stratigrafia, presenza di cavità o elementi discontinui) influisce sull'intensità e sull'estensione della risalita capillare: pareti più spesse favoriscono una maggiore sezione assorbente alla base e, in assenza di adeguato bilancio evaporativo, possono produrre fronti umidi più elevati.

Sistemi a doppia parete o con intercapedine possono risultare inefficaci se mal eseguiti: ponti capillari (es. accumulo di malta nella camera d'aria) annullano l'efficacia delle eventuali barriere impermeabili.

Analogamente errori esecutivi, degrado materico, modifiche del livello del terreno e assenza, degrado o interruzione delle barriere orizzontali (DPC – *Damp Proof Course*) e delle membrane impermeabili (DPM – *Damp Proof Membrane*) espongono anche gli edifici contemporanei al contatto diretto con l'umidità presente nel suolo.

Fattori aggravanti comuni sono rivestimenti impermeabili (intonaci cementizi, pitture filmogene), pavimentazioni non traspiranti e carenze manutentive (grondaie ostruite, sistemi di drenaggio inefficaci, perdite impiantistiche) [Torres (2018)].

Dal punto di vista fisico, la velocità con cui l'acqua penetra nei materiali segue un andamento diffusivo. Inizialmente rapida, rallenta nel tempo seguendo una legge proporzionale alla radice quadrata del tempo [Guolo (2024); Sardella (2021)]:

$$W_A = B\sqrt{\tau}$$

Dove:

- W_A è la quantità d'acqua assorbita

- B è un coefficiente dipendente dalla struttura porosa del materiale
- τ è il tempo

Questa dinamica è fondamentale per interpretare il profilo verticale dell'umidità all'interno della muratura: nella parte inferiore si possono rilevare concentrazioni d'acqua del 20–30%, che si riducono progressivamente al 2–5% verso l'alto [Lombardi (2005)].

Per comprendere a fondo il comportamento igrometrico delle murature è quindi necessaria un'analisi integrata che consideri i seguenti elementi:

- Caratteristiche porometriche e permeabilità dei materiali da costruzione
- Tipologia e qualità delle malte di allettamento
- Spessore e tipologia muraria
- Superficie evaporante disponibile
- Presenza di rivestimenti impermeabili o traspiranti
- Presenza di discontinuità, cavità o ponti capillari
- Stato di conservazione delle eventuali barriere impermeabili e dei sistemi di drenaggio
- Trasformazioni e alterazioni intervenute nel tempo

Solo attraverso una valutazione complessiva e interdisciplinare, che combini geotecnica, prove di laboratorio e monitoraggio in sito, è possibile interpretare correttamente la genesi del fenomeno e pianificare interventi mirati e duraturi, compatibili con le specificità storiche e costruttive dell'edificio.

2.6.2 Effetti della risalita capillare

La risalita capillare è un fenomeno progressivo e insidioso, i cui effetti possono manifestarsi anche molti anni dopo la costruzione dell'edificio. Essa interessa in particolare le murature e gli elementi edilizi a diretto contatto con il terreno, con maggiore evidenza nei piani bassi, nei locali interrati e seminterrati.

Sebbene in condizioni teoriche l'acqua possa risalire fino ad oltre 10 metri, nella pratica l'altezza effettiva si stabilizza generalmente tra 0,5 e 2 metri a causa della dispersione per evaporazione e dell'eterogeneità materica [Feilden (2003); Guolo (2024); Lombardi (2005); Proietti (2021)]. Questa porzione, nota come ***fascia di risalita attiva***, è la zona in cui il degrado si concentra con maggiore intensità.

Un indicatore macroscopico del fenomeno, infatti, è proprio il ***fronte di risalita*** [Agyekum (2016); Guolo (2024)], una linea orizzontale visibile sulle superfici murarie che segna la transizione tra la zona umida inferiore e quella asciutta superiore. Esso riflette l'equilibrio dinamico tra flusso capillare ascendente ed evaporazione superficiale e subisce oscillazioni in funzione della composizione materica, delle condizioni termoigrometriche e della ventilazione [Guolo (2024); Lombardi (2005); Premoli (2015)].

Nel fronte umido si localizzano le principali manifestazioni macroscopiche tipiche della risalita capillare:

- Alterazioni cromatiche (macchie scure e scolorimenti)
- Efflorescenze saline di colore variabile dal bianco al giallastro-marrone
- Sub-efflorescenze saline
- Rigonfiamenti, esfoliazioni e distacchi delle finiture superficiali
- Colonizzazione biologica
- Fenomeni di condensazione superficiale o interstiziale

È importante sottolineare che i danni più gravi non coincidono con la zona di saturazione, bensì con la ***fascia di evaporazione attiva***: qui si concentrano i cicli di imbibizione-evaporazione, dissoluzione-cristallizzazione salita e stress termoigrometrici giornalieri e stagionali. [Lombardi (2005); Premoli (2015)]

Nel tempo, tali processi inducono un progressivo squilibrio igrometrico, che compromette le

proprietà dei materiali da costruzione e può estendersi anche alle porzioni apparentemente asciutte della muratura, minandone la durabilità e la stabilità complessiva. [Delgado (2016); Lombardi (2005); Torres (2018)]

In assenza di interventi correttivi e monitoraggi sistematici, la risalita capillare evolve, quindi, da anomalia localizzata a causa sistematica di degrado con conseguenze quali:

- Perdita dell'efficienza termo-igrometrica dell'involucro edilizio
- Comparsa di microfessurazioni e danni statico-strutturali
- Incremento dell'umidità relativa interna con peggioramento della qualità dell'aria
- Problematiche igienico-sanitarie e rischi per la salute degli occupanti
- Riduzione del valore d'uso, di mercato e culturale dell'immobile

La comprensione del fronte umido e della fascia di risalita attiva non ha dunque un valore solo descrittivo, ma rappresenta la chiave per interpretare la patologia e pianificare le strategie di intervento e monitoraggio compatibili con la conservazione del patrimonio architettonico.

2.6.2.1 Degrado Fisico e Chimico

L'umidità da risalita capillare non produce soltanto alterazioni superficiali visibili, ma innesca processi di degrado a scala microstrutturale e chimica che riducono progressivamente la durabilità, la coesione interna e le prestazioni termiche e meccaniche dei materiali. [Delgado (2016); Proietti (2021)]

Quando l'acqua penetra nella rete porosa dei materiali si verificano:

- ***Incremento della porosità effettiva*** e alterazione della geometria dei pori, con perdita di coesione granulare (polverizzazione, disgregazione superficiale, distacchi)
- ***Dissoluzione selettiva delle componenti leganti*** nelle malte e negli intonaci, che accelera il degrado e compromette l'adesione con gli aggregati
- ***Indebolimento meccanico delle murature***: in materiali teneri (es. tufo) sono documentate riduzioni fino al 50% della resistenza a compressione uniassiale in seguito a cicli ripetuti di imbibizione ed essiccamento [Guolo (2024)]

Parallelamente, l'umidità influisce sulle proprietà termoigrometriche; l'acqua nei pori incrementa la conducibilità termica dei materiali e riduce la capacità isolante dell'involucro edilizio fino al 30-50%, con incremento dei consumi energetici di climatizzazione del 20-30% negli edifici non coibentali. [Guolo (2024); Lombardi (2005)]

Due meccanismi assumono un ruolo primario nel degrado fisico-chimico: i cicli di gelo-disgelo e la cristallizzazione dei sali solubili.

2.6.2.1.1 CICLI DI GELO-DISGELO

Numerosi materiali da costruzione sono definiti ***gelivi***, ossia suscettibili a danni quando l'acqua presente nei pori congela ed esercita spinte di espansione lungo i pori. Tra i meccanismi di degrado fisico indotti dalla risalita capillare, i ***cicli di gelo-disgelo*** sono tra i più insidiosi, soprattutto nei climi temperati soggetti a frequenti oscillazioni attorno alla soglia di 0 °C.

Le prove sperimentali su pietre naturali e laterizi mostrano che la sensibilità al gelo dipende da due fattori chiave:

- ***Porometria del materiale:*** la distribuzione e la dimensione dei pori condizionano la velocità di saturazione e la resistenza alle pressioni da gelo
- ***Grado di saturazione idrica:*** quando l'acqua contenuta nei pori raggiunge o supera una soglia critica, generalmente compresa tra il 65% e il 100% del volume dei vuoti, si attivano i meccanismi di degrado più intensi [Lombardi (2005)]

I materiali caratterizzati da una prevalenza di pori di diametro >10μm trattengono maggiori quantità di acqua e raggiungono più facilmente la soglia critica di saturazione, risultando

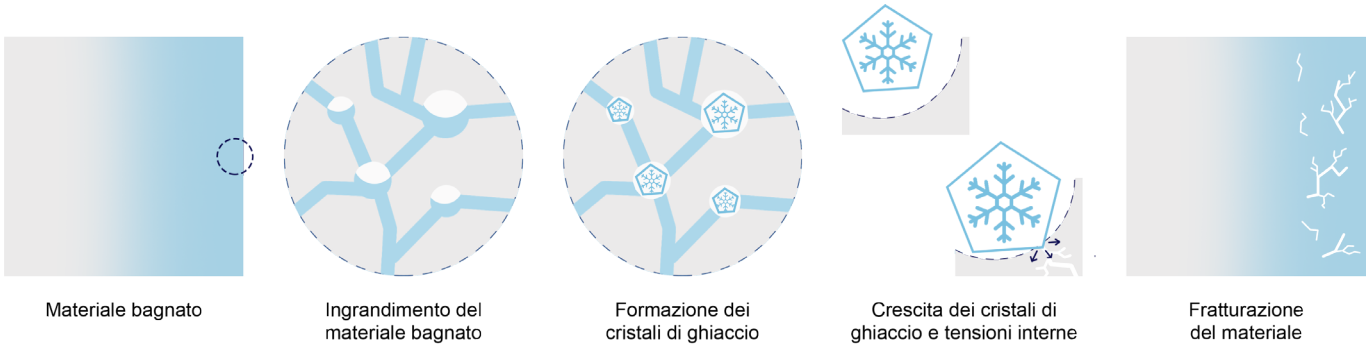


Fig. 4 | Processo di degrado dei cicli di gelo-disgelo

quindi più vulnerabili. Al contrario, i materiali con pori di diametro maggiore, come i laterizi cotti ad alte temperature (oltre 1200 °C), con microstruttura compatta e maggiore frazione di macropori, tendono a resistere meglio. Viceversa, i laterizi cotti a basse temperature (circa 900 °C), caratterizzati da una maggiore percentuale di micropori, risultano molto più fragili [Lombardi (2005)].

Quando le temperature scendono sotto lo zero, l'acqua contenuta nei pori e negli alveoli più grandi congela rapidamente, esercitando spinte di espansione nei confronti delle pareti capillari (Fig. 4). I pori più piccoli, per contro, oppongono inizialmente una resistenza al congelamento dovuta alla tensione capillare. Tuttavia, il progressivo sviluppo di cristalli di ghiaccio nei pori più grandi genera micro-capillari intermedi, capaci di richiamare ulteriore acqua dai pori minori. Questo meccanismo alimenta la crescita dei cristalli e induce pressioni interne tali da superare la resistenza meccanica del materiale, provocando microfratture e macro-fessurazioni strutturali.

La criticità di questo degrado non risiede soltanto nell'intensità del singolo evento di gelo, quanto nella ripetitività ciclica. Ogni sequenza gelo-disgelo amplifica le micro-lesioni preesistenti e accelera la propagazione del danno, riducendo esponenzialmente la vita utile dei materiali. [Franzoni (2023); Premoli (2015)]

2.6.2.1.2 CRISTALLIZZAZIONE DEI SALI SOLUBILI

La cristallizzazione dei sali solubili è uno dei meccanismi di degrado più critici associati alla risalita capillare (Fig. 5). È un processo fisico-chimico che agisce in modo progressivo e spesso irreversibile, compromettendo l'integrità estetica, materica e meccanica delle murature. [Ciocan (2019); Feilden (2003); Feijoo, Ottosen (2020); Franzoni (2023); Guimaraes (2016)]; Guolo (2024); Kilian (2023); Proietti (2021); Rodrigues Peruchi (2021)]

Nel suo percorso l'acqua funge da solvente, mobilitano sia i sali solubili (ioni) che i contaminanti esterni (organici, inorganici e atmosferici) fino a raggiungere la fascia di evaporazione attiva. Qui, una volta raggiunta la saturazione, si innesca il processo di nucleazione e cristallizzazione, ovvero la transizione di fase da soluzione a solido cristallino.

I danni più rilevanti si manifestano nella fascia di transizione tra la muratura bagnata e quella asciutta. In questa zona, il flusso ascensionale dell'umidità rallenta, mentre prevale il processo di evaporazione, favorendo l'accumulo e la precipitazione dei sali. Questo fenomeno porta alla formazione di efflorescenze e sub-efflorescenze. Al contrario, nella parte inferiore della muratura, la costante circolazione dell'acqua contribuisce a mantenere i sali in soluzione, limitando così i processi di cristallizzazione. [Lombardi (2005); Premoli (2015); Ricca, Donato (2023)]

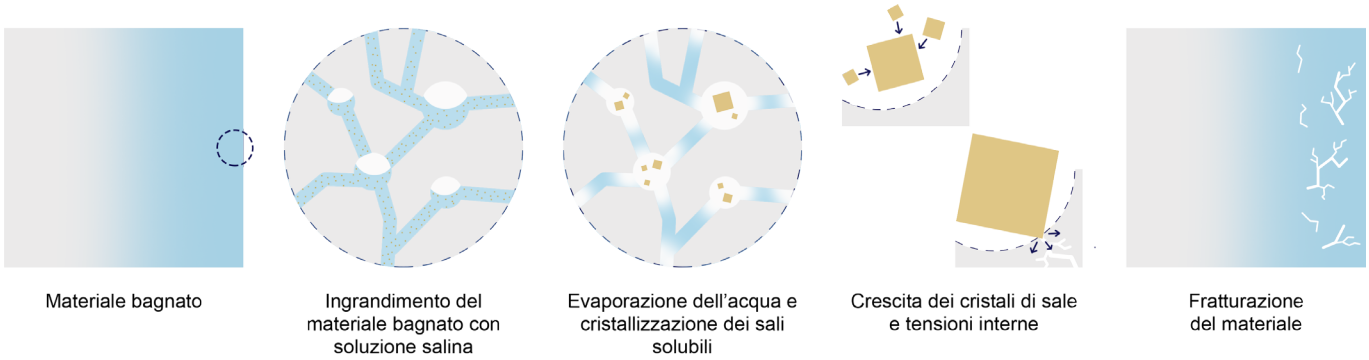


Fig. 5 | Processo di degrado dei cicli di cristallizzazione dei sali solubili

Gli effetti meccanici della cristallizzazione sono diretti: la crescita dei cristalli all'interno dei pori genera pressioni capaci di superare la resistenza meccanica a trazione del materiale, con conseguente microfessurazione, perdita di coesione e disgregazione. L'entità del danno dipende dalla natura chimica dei sali, dalla microstruttura porosa del materiale e dalle condizioni termo-igrometriche locali. I materiali a porosità fine sono particolarmente vulnerabili poiché favoriscono sovrasaturazione e pressioni di cristallizzazione elevate; tuttavia anche pori più grandi possono subire tensioni rilevanti durante la crescita dei cristalli di sale [Ciocan (2019); Delgado (2016); Proietti (2021)].

Oltre alla pressione di cristallizzazione, contribuiscono al degrado: la pressione osmotica (dovuta a gradienti ionici), la pressione di idratazione (formazione di fasi idrate volumetricamente più estese) e le differenze di espansione termica tra sali e substrato.

Molti sali sono inoltre igroscopici o deliquescenti (es. alcuni nitrati e cloruri): a determinate umidità relative assorbono vapore fino a ritornare in soluzione, riattivando cicli di dissoluzione-cristallizzazione anche in assenza di apporto idrico dall'interno della muratura.

Questo rende il fenomeno fortemente autoalimentante e rende inefficaci azioni di sola deumidificazione quando la contaminazione salina non è rimossa o neutralizzata.

Inoltre, la velocità di asciugatura di un materiale saturo di soluzione salina è inferiore rispetto a quella di un materiale contenente solo acqua, e prolunga la condizione umida e favorendo la ciclicità del degrado.

Il degrado indotto dai sali solubili, noto il letteratura come *salt attack*, *salt decay* o *salt crystallization* [Delgado (2016)], si manifesta attraverso diverse morfologie: efflorescenze e sub-efflorescenze (o crypto-efflorescenze). [Guimaraes (2016); Guolo (2024); Hird (2016); Kportufe (2015); Lopez-Arce (2009); Premoli (2015); Torres (2018)]

Le ***efflorescenze*** saline si formano quando la cristallizzazione avviene in superficie, in corrispondenza della zona di evaporazione, in condizioni in cui la velocità di evaporazione è minore o uguale a quella del flusso capillare. In tale scenario, l'interfaccia liquido-vapore si mantiene sulla superficie esterna del materiale, consentendo alla soluzione salina di raggiungere l'ambiente esterno e cristallizzare senza sviluppare forti pressioni nei pori. Gli effetti risultano prevalentemente estetici ma non privi di conseguenze secondarie:

- Erosione delle superfici
- Impoverimento dei giunti di malta
- Distacco parziale delle finiture superficiali
- Riduzione della capacità meccanica

degli strati superficiali

Le ***sub-efflorescenze***, o ***crypto-efflorescenze***, si originano all'interno della rete porosa dei materiali, quando la velocità di evaporazione dell'umidità in superficie è superiore al flusso capillare (Fig. 6-7-8). Questo provoca la recessione del fronte evaporativo all'interno del materiale, con nucleazione e crescita dei cristalli in profondità. Le pressioni generate dalla cristallizzazione in fase confinata tendono a superare la resistenza a trazione del materiale poroso, determinando fenomeni di polverizzazione, alveolizzazione, scagliatura, esfoliazione, rigonfiamenti, microfessurazioni, perdita di coesione e distacchi.

Dal punto di vista fisico, questi fenomeni sono regolati da due principali meccanismi di trasporto [Casti (2015); Hird (2016)]:

- **Diffusione:** processo guidato dalla presenza di un gradiente di concentrazione, ossia gli ioni si spostano dalle zone ad alta concentrazione verso quelle a concentrazione minore, fino al raggiungimento dell'equilibrio. Nei materiali porosi, tuttavia, questo è un meccanismo relativamente lento
- **Avvezione:** meccanismo di trasporto dovuto al movimento del fluido stesso (in questo caso, l'acqua contenente Sali in soluzione), generalmente più rapido, soprattutto in presenza di un forte flusso capillare

La competizione tra questi due meccanismi è descritta dal numero di Peclet (Pe) [Casti (2015)]:

$$Pe = \frac{UL}{D_{eff}}$$

Dove:

- ***U*** è la velocità del fluido (trasporto per avvezione)
- ***L*** è la dimensione caratteristica del sistema (es. spessore del campione)
- D_{eff} è il coefficiente di diffusione efficace del sale nel materiale poroso, funzione della microstruttura del mezzo

Con:

$$D_{eff} = nTD_s$$

Dove:

- D_s è il coefficiente di diffusione del sale in acqua.
- ***n*** è la porosità del materiale
- ***T*** è la tortuosità (percorso medio degli ioni nel reticolo poroso)

In base al valore del numero di Peclet, si identificano due scenari:

- ***Pe < 1*** (prevale la diffusione): la cristallizzazione avviene in profondità, generando sub-efflorescenze
- ***Pe > 1*** (prevale l'avvezione): i sali raggiungono la superficie, dando luogo a efflorescenze

Questo comportamento è osservabile nella stratigrafia verticale del fronte umido, dove si distinguono tre fasce funzionali [Casti (2015)]:

- **Zona bassa (satura):** muratura permanentemente umida, l'evaporazione è limitata ⇢ i sali restano in soluzione o migrano lentamente per diffusione senza cristallizzare
- **Zona intermedia (fascia di evaporazione attiva):** equilibrio tra evaporazione e risalita capillare ⇢ possibile cristallizzazione superficiale e formazione di efflorescenze saline
- **Zona alta (superiore al fronte evaporativo):** evaporazione più rapida del flusso di risalita ⇢ recessione del fronte liquido e formazione di sub-efflorescenze

Numerose ricerche hanno indagato il legame tra i meccanismi di crescita cristallina, la pressione di cristallizzazione nei pori e le modalità di propagazione delle fessure nei materiali da costruzione, con particolare attenzione al patrimonio edilizio storico. Tuttavia, la relazione tra composizione chimica dei sali, microstruttura



Fig. 6 | Esempio di efflorescenza salina



Fig. 7 | Esempio di sub-efflorescenza salina

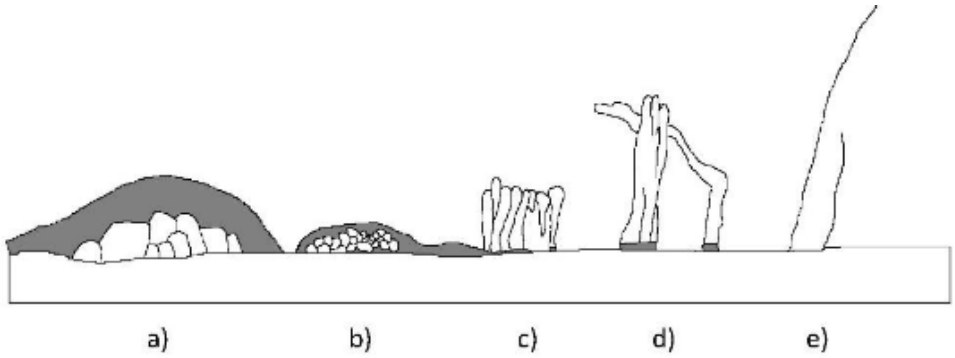


Figura 1.6 Rapporto tra la morfologia del cristallo e l'umidità del substrato in un materiale poroso. a) Grandi cristalli con le loro specifiche forme di equilibrio si sviluppano quando sono completamente immersi in una pellicola di soluzione su un substrato bagnato. b) Una crosta granulare formata da più piccoli e isometrici cristalli cresce su un substrato bagnato con ridotto film di soluzione. c) Una crosta fibrosa cresce in aria da un substrato coperto da un sottilissimo film di soluzione. d) Cristalli colonnari e whiskers crescono quando il supporto è leggermente umido. e) cristalli molto sottili crescono in aria dalla superficie quasi a secca [2-3].

Fig. 8 | Processo di accrescimento dei cristalli di sale [Fonte: https://www.renzo-arthome.com/sali-nelle-murature-cause-ed-effetti-renzo-spedicato-renzo-arthome/]

dei materiali e sollecitazioni ambientali resta ancora oggetto di approfondimento, in particolare per quanto riguarda le implicazioni a lungo termine sulla stabilità delle murature storiche. [Proietti (2021)]

ORIGINE E DIFFUSIONE DEI SALI

La comprensione della provenienza dei sali solubili nelle murature è intrinsecamente complessa: la loro presenza dipende sia dalla composizione eterogenea dei materiali da costruzione, sia dalla molteplicità di sorgenti esterne. Inoltre, la localizzazione delle manifestazioni saline non coincide necessariamente con la sorgente, poiché gli ioni in soluzione possono migrare lungo la rete capillare e depositarsi a distanza dalla fonte originaria. [Delgado (2016); Fragata (2021); Guolo (2024); Lombardi (2005)]

I sali solubili possono essere distinti in base alla loro sorgente in:

- **Sali endogeni:** derivano dalla composizione chimica dei materiali da costruzione stessi (es. carbonati e silicati) [Ahmad (2010); Guolo (2024); Han (2022); Kilian (2023); Lombardi

(2005); Nunes (2018); Rodrigues Peruchi (2021)]

- **Sali esogeni:** imputabili a fattori esterni (suolo, aerosol marino, falde acquifere, fertilizzanti agricoli, rifiuti organici, inquinamento atmosferico o interventi di restauro/conservazione). In particolare, la presenza di anidride carbonica (CO_2), anidride solforosa (SO_2) e ossidi di azoto possono favorire la formazione di sali secondari o la solubilizzazione di composti preesistenti [Ahmad (2010); Guolo (2024); Han (2022); Kilian (2023;) Lombardi (2005); Nunes (2018); Rodrigues Peruchi (2021); Weiss (2024)]

I sali generalmente riscontrati nelle murature sono spesso associati a calcio (Ca), sodio (Na), magnesio (Mg) e potassio (K). In presenza di leganti cementizi, possono tuttavia formarsi anche prodotti secondari complessi come ettringite e thaumasite. Questi ultimi derivano da reazioni tra i prodotti di idratazione del cemento, in particolare i silicati e gli alluminati di calcio, con solfati disponibili nell'ambiente. Condizioni favorevoli, come elevata umidità, basse temperature, presenza di gesso o altri sali solfatici, possono promuovere tali trasformazioni, contribuendo in modo significativo al degrado delle murature.

Nitrati e nitriti

I nitrati e i nitriti costituiscono una delle classi di sali più mobili e igroscopici riscontrabili nelle murature. Derivano dalla trasformazione di acido nitrico (HNO_3) o acido nitroso (HNO_2), spesso impiegati in ambito agricolo nei fertilizzanti azotati e responsabili, in particolare nelle zone rurali, di frequenti contaminazioni del terreno e delle falde. La loro origine può essere ricondotta anche a decomposizioni organiche, falde inquinate, acque deliquescenti, oppure a reazioni con ossidi di azoto atmosferici che reagiscono con l'azione di batteri. In ambienti esterni, la contaminazione può avvenire anche per condensazione superficiale, specialmente su superfici murarie esposte. Si manifestano tipicamente con fasce orizzontali dello spessore di circa 10-15 cm e alterazioni cromatiche. [Delgado (2016); Feijoo, Ottosen (2020); Guolo (2024); Kilian (2023); Lombardi (2005); Nunes (2018); Ricca, Donato (2023); Stastny (2021); Weiss (2024)]

Esempi rilevanti sono:

- **Nitrato di sodio ($NaNO_3$) e nitrato di potassio (KNO_3):** derivano dalla trasformazione dell'acido nitrico e sono ampiamente presenti nei suoli contaminati. Estremamente solubili, questi nitrati mostrano grande mobilità, con elevata propensione al trasporto attraverso il sistema capillare della muratura. A causa della loro instabilità, partecipano attivamente ai cicli di cristallizzazione-dissoluzione, favorendo l'insorgenza di efflorescenze, sub-efflorescenze e fenomeni di degrado superficiale
- **Nitrato di calcio ($Ca(NO_3)_2$):** è considerato il più dannoso tra i nitrati per via della sua elevata igroscopicità, che lo rende capace di assorbire notevoli quantità di vapore acqueo anche con umidità relativa intorno al 50%. Cristallizza a circa 25 °C, e la sua presenza peggiora la risposta meccanica dei materiali e ne aumenta la vulnerabilità al gelo [Nunes (2018)]
- **Nitrato di magnesio ($Mg(NO_3)_2$):** presenta caratteristiche simili a quelle del nitrato di calcio, con il quale spesso coesiste. È anch'esso fortemente igroscopico e contribuisce in modo significativo alla ritenzione dell'umidità. La sua cristallizzazione avviene quando l'umidità relativa scende sotto il 50%, rendendolo meno prevedibile ma estremamente aggressivo in contesti soggetti a fluttuazioni termoigrometriche, dove può innescare pressioni di cristallizzazioni importanti anche in assenza di apporti idrici diretti

Cloruri

I cloruri sono frequenti in aree costiere o in ambienti esposti ad inquinati industriali e derivano principalmente dall'acido cloridrico

(HCl), generalmente presente sotto forma di cloruro di sodio (NaCl). Il vapore acqueo contenente cloruri condensa facilmente a contatto con le superfici fredde, penetrando in profondità nella muratura. Una delle principali criticità è legata al fatto che, quando si trovano nell'acqua di impasto delle malte, i cloruri (soprattutto in combinazione con altri sali, come i solfati) diventano fortemente igroscopici, alterando il comportamento termoigrometrico dell'intero sistema murario.

Proprio per questa forte igroscopicità, sono in grado di trattenere grandi quantità d'acqua, ostacolando i processi di deumidificazione e favorendo effetti secondari, tra cui: condensazione interstiziale e superficiale, formazione e proliferazione di muffe e microrganismi, alterazioni cromatiche, distacco e disgregazione delle finiture superficiali. Inoltre possono dare origine a efflorescenze anche in condizioni di umidità relativa bassa, risultando particolarmente insidiosi in climi secchi o in ambienti con ventilazione ridotta. [Delgado (2016); Feijoo, Ottosen (2020); Guolo (2024); Kilian (2023); Lombardi (2005); Ricca, Donato (2023); Stastny (2021); Weiss (2024)]

Tra i cloruri più comuni:

- **Cloruro di sodio (NaCl):** si presenta sottoforma di depositi salini bianchi, generalmente a struttura microcristallina, ben visibili in superficie. È un sale fortemente igroscopico, capace di assorbire umidità anche a basse percentuali di umidità relativa (circa 30%), e cristallizza intorno ai 25 °C. Questa sua capacità rende particolarmente difficile il processo di deumidificazione delle murature contaminate, poiché il sale tende a mantenere il materiale in uno stato di umidità costante, contribuendo alla persistenza del contenuto umido e al degrado delle finiture [Delgado (2016); Nunes (2018)]
- **Cloruro di calcio ($CaCl_2$):** forma anch'esso efflorescenze bianche microcristalline, ma si distingue per una cristallizzazione più precoce, favorita da condizioni di bassa umidità relativa. È noto per favorire la condensazione interstiziale e contribuire alla formazione di ambienti ad alta umidità superficiale, che rappresentano un substrato ideale per la proliferazione di muffe e microrganismi

Solfati

I solfati derivano dall'acido solforico (H_2SO_4) e costituiscono un gruppo di sali altamente reattivi, presenti sia nella composizione dei materiali da costruzione (es. leganti a base di calce o cemento), sia introdotti per contaminazione esterna attraverso fenomeni di smog, piogge acide o impregnazione dal suolo. Questi Sali sono tra i più pericolosi in ambito conservativo per via della loro notevole espansività cristallina, della forte solubilità (soprattutto nel caso dei solfati alcalini), e della tendenza a cicli ripetuti di dissoluzione-cristallizzazione.

L'aggressività dei solfati è amplificata nei materiali a grana fine e porosità elevata, come intonaci storici o murature in laterizio, dove le pressioni generate dalla crescita dei cristalli superano facilmente la resistenza meccanica del supporto. [Feijoo, Ottosen (2020); Guolo (2024); Han (2022); Kilian (2023); Lombardi (2005); Stastny (2021); Weiss (2024)]

Tra i principali solfati presenti nelle murature si distinguono:

- **Solfato di sodio (Na_2SO_4):** classificato tra i Sali più aggressivi sotto il profilo meccanico, è un solfato alcalino altamente solubile, capace di originare efflorescenze biancastre più o meno spesse, caratterizzate da strutture polverulente o arborescenti, localizzate principalmente nella fascia di evaporazione. La sua espansività cristallina è tale da causare notevoli sollecitazioni interne che si manifestano con rigonfiamenti, esfoliazioni e distacchi delle finiture superficiali [Kilian (2023)]
- **Solfato di potassio (K_2SO_4):** è anch'esso un solfato alcalino, molto solubile in acqua. Tende a formare una pellicola diafana continua simile ad una

velatura grigiastra, che altera la cromia originaria del paramento murario e riduce la brillantezza delle superfici. Pur essendo meno espansivo del solfato di sodio, può reagire con altri sali (es. CaSO4), formando Sali composti più solubili e mobili, che ne aggravano il potenziale degradativo

- **Solfato di magnesio ($MgSO_4$):** è considerato il sale a maggiore potenziale di degrado meccanico, si distingue per la sua alta mobilità capillare, la forte espansione cristallina e la frequente presenza nelle murature in laterizio. Produce efflorescenze polverulente, costituite da cristalli aghiformi ramificati o a fiocchi e può generare patine superficiali compatte e molto dure, in particolare sugli intonaci a base di gesso. I danni associati includono la disgregazione del supporto e il distacco delle finiture, soprattutto in condizioni di umidità variabile
- **Solfato di calcio ($CaSO_4$):** sale poco solubile in acqua, si presenta sotto forma di deposito bianco aderente alla superficie. Se isolato, non dà origine a efflorescenze significative. Tuttavia, in presenza di altri sali solubili, come il solfato di potassio, può formare sali composti più solubili. La sua presenza è frequentemente associata alla reazione della calce (componente comune in malte e intonaci) con gas solforati atmosferici (es. SO_2), con successivo assorbimento da parte della muratura in seguito al dilavamento generato dalle acque meteoriche

Carbonati e silicati

I carbonati e i silicati sono composti naturalmente presenti nei materiali da costruzione, in particolare negli intonaci e nei leganti a base calcareo-silicata. La loro origine è legata alla composizione chimica dei materiali da costruzione, ma può anche derivare da processi chimici successivi, come la carbonatazione. Sebbene carbonati e silicati siano generalmente meno aggressivi di altri sali in termini di degrado diretto, in presenza di umidità, questi composti possono: solubilizzarsi, partecipare a reazioni di idrolisi, contribuire alla variazione della composizione ionica delle soluzioni presenti nella muratura, facilitare la formazione di sali secondari. [Delgado (2016); Lombardi (2005); Torres (2018)]

In particolare, i carbonati derivano dall'acido carbonico (H_2CO_3) e risultano particolarmente idrosolubili. Le sostanze organiche presenti nei materiali o nei depositi ambientali possono perdere idrogeno e ossigeno, arricchendosi di carbonio e dando origine al fenomeno della carbonatazione, che ne modifica la chimica del materiale, con possibili implicazioni sulla durabilità e sulla reattività del sistema murario.

2.6.2.1.3 REAZIONI CHIMICHE INDOTTE DALLA PRESENZA DI UMIDITÀ

L'interazione prolungata dell'acqua con i materiali da costruzione attiva reazioni chimiche complesse che trasformano i componenti mineralogici e i leganti, compromettendone progressivamente le proprietà meccaniche e termoigrometriche.

Tali fenomeni si sviluppano sia per contatto diretto con acqua liquida sia all'interno di microambienti umidi e contaminati da inquinanti atmosferici (es. SO_2, CO_2, NO_x), e sono accentuati dai ripetuti cicli di imbibizione e asciugatura tipici della risalita capillare. [Delgado (2016); Guolo (2024); Kilian (2023); Ricca, Donato (2023)]

Di seguito sono sintetizzati i meccanismi chimici di maggiore rilievo:

- **Solfatazione:** è uno dei meccanismi più aggressivi, in cui i solfati reagiscono con componenti calcarei o con i prodotti dell'idratazione del cemento, dando origine a composti secondari ad alto volume specifico, quali gesso ($CaSO_4 \cdot H_2O$) ed ettringite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$). La formazione di questi prodotti causa un'espansione interna dei materiali, con conseguenti microfessurazioni, rigonfiamenti, perdita di coesione e, nei

casi più gravi, distacchi e disgregazione profonda.

- **Carbonatazione:** processo attraverso il quale l'anidride carbonica (CO_2) presente nell'atmosfera si dissolve nell'umidità presente nei pori dei materiali, generando acido carbonico (H_2CO_3), che reagisce con i leganti a base di idrossido di calcio, formando carbonato di calcio ($CaCO_3$). Questa reazione modifica il pH interno, abbassandolo sensibilmente, con implicazioni importanti sulla stabilità dei leganti idraulici, sulla durabilità del materiale e sulla suscettibilità a successivi attacchi chimici.
- **Idrolisi e decomposizione dei leganti:** in ambienti umidi, molti leganti (in particolare quelli a base di calce e cemento) vanno incontro a idrolisi progressiva. La degradazione dei silicati e degli alluminati di calcio idrati compromette l'integrità della matrice legante, facilitando il distacco dei componenti e una perdita graduale di coesione e resistenza meccanica.

Questi processi, spesso concomitanti e sinergici, si manifestano tipicamente nelle zone inferiori delle murature o nella fascia di transizione tra materiale umido e asciutto.

2.6.2.2 Degrado Biologico

L'umidità da risalita capillare non trasporta soltanto acqua e sali: veicola anche nutrienti organici e inorganici che, in presenza di condizioni microclimatiche favorevoli (UR > 65-75%, temperature prossime ai 30 °C, scarsa ventilazione e pH compatibile), creano habitat ideali per l'insediamento di organismi biodeteriogeni. La porosità naturale e le microfessure generate dai cicli di imbibizione-evaporazione facilitano l'ancoraggio e la penetrazione dei microrganismi, trasformando progressivamente il substrato con effetti chimici, fisici ed estetici. [Franzoni (2023); Guolo (2024); Lombardi (2005)]

Le prime manifestazioni si traducono in patine, macchie e incrostazioni di colore variabile (verde, nero, rosso-bruno), evidenza della presenza e dell'attività metabolica degli organismi colonizzati.

I principali gruppi biodeteriogeni si distinguono in:

- **Organismi autotrofi (batteri chemioautotrofi, cianobatteri, alghe, licheni):** sintetizzano sostanze organiche a partire da composti inorganici attraverso fotosintesi clorofilliana o chemosintesi
- **Organismi eterotrofi (funghi, muffe, microrganismi animali):** necessitano di sostanze organiche già elaborate

Questa distinzione è utile per comprendere i meccanismi specifici di interazione con il substrato.

Batteri chemioautotrofi, pur non effettuando fotosintesi, colonizzano ambienti umidi sfruttando l'ossidazione di composti inorganici per il proprio metabolismo. La loro attività si manifesta prevalentemente su materiali lapidei alcalini, dove possono innescare reazioni di alterazione chimica, agendo talvolta come agenti di pre-degradazione che favoriscono l'insediamento di specie più complesse.

Cianoficee, comunemente associate a comunità algali, producono mucillagini che mantengono elevato il tenore di umidità intorno alle cellule, favorendo la permanenza in substrati umidi o scarsamente esposti alla luce diretta.

Alghe si sviluppano prevalentemente su superfici porose e umide, soprattutto in presenza di luce e nutrienti; la loro colonizzazione si accompagna alla formazione di biofilm pigmentati che penetrano nei pori e accentuano la fragilità meccanica dei substrati. L'attività metabolica di questi organismi può produrre sostanze acide, responsabili della solubilizzazione di componenti minerali del supporto, con conseguente decoesione e perdita di materiale.

Licheni, simbiosi complesse tra miceti e alghe o cianobatteri, costituiscono una forma avanzata di colonizzazione biologica. La loro presenza è indicativa di un'esposizione prolungata all'umidità e si osserva frequentemente sulle superfici esterne dei paramenti murari, in

particolare nei versanti nord o in prossimità della base muraria. La loro azione è particolarmente aggressiva: gli acidi lichenici prodotti metabolicamente esercitano un effetto solvente sui minerali del substrato, con attacchi localizzati che determinano un aumento della porosità e della superficie specifica esposta, innescando una spirale degenerativa spesso irreversibile.

Funghi e muffe, rappresentano una delle forme più frequenti di biodeterioramento in ambienti interni e scarsamente ventilati. Le spore fungine trovano nelle superfici umide e ricche di sostanza organica un ambiente ottimale per lo sviluppo, soprattutto nei materiali porosi organici come carta, legno, colla, resine e intonaci contaminati. Le muffe si manifestano con patine di colore variabile (verde, nero, grigio), con tipologie specifiche che si diversificano in funzione del tasso di umidità. Specie quali *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium* e *Phoma* sono comuni negli ambienti umidi e possono essere responsabili non solo di danni ai materiali, ma anche di effetti negativi sulla salubrità ambientale e sulla salute umana, soprattutto in soggetti sensibili. I funghi penetrano nei materiali attraverso le microfessurazioni e, crescendo, esercitano pressioni meccaniche interne che contribuiscono alla disgregazione del substrato. Inoltre, la produzione di metaboliti acidi accelera i processi chimici di deterioramento.

Organismi superiori (muschi, piante), si osservano generalmente in stadi più maturi del degrado biologico. Tali organismi, favoriti dalla costante umidità e dalla disponibilità di particelle organiche e minerali, si radicano nei pori e nelle fessure, espandendosi meccanicamente e peggiorando lo stato di conservazione dei supporti murari. Le radici esercitano pressioni tangenziali e radiali che provocano distacchi e incrementano l'ingresso di acqua e agenti inquinanti.

2.6.2.3 Impatti Igienico-Sanitari

L'umidità da risalita capillare, oltre a provocare danni materiali e strutturali, incide in maniera rilevante sulla salubrità degli ambienti interni e sulla salute degli occupanti, alterando in modo significativo il comfort termoigrometrico degli spazi abitati. [Kportufe (2015); Lombardi (2005); Stastny (2021)]

Tra gli agenti più rilevanti si annoverano muffe, funghi e batteri che, colonizzando superfici interne e materiali da costruzione, rilasciano spore, metaboliti secondari e composti organici volatili (VOC), molti dei quali dotati di proprietà tossiche o allergeniche. Le specie fungine come *Aspergillus famigaturs*, *Penicillium chtysogenum*, *Stachybotrys chartarum* (nota come "muffa nera") e *Cladosporium spp.* sono state frequentemente associate a patologie dell'apparato respiratorio, in particolare in soggetti predisposti (bambini, anziani, immunodepressi, asmatici).

La persistenza dell'umidità genera inoltre condizioni favorevoli allo sviluppo della carie secca (*Serpula lacrymans*), un fungo ligniforo che attacca i componenti lignei strutturali, con potenziale pericolo statico e sanitario. La sua azione è tanto più devastante quanto più gli ambienti risultano scarsamente aerati e soggetti a continui sbalzi igrometrici.

A questi effetti si aggiungono fenomeni indiretti legati alla compromissione del microclima abitativo: l'aumento dell'umidità relativa interna compromette l'equilibrio termoigrometrico, incrementando la sensazione di discomfort termico e peggiorando la qualità dell'aria. Il vapore acqueo emesso dalle murature umide contribuisce alla condensazione interstiziale, alla diffusione di cattivi odori e all'ulteriore proliferazione di agenti patogeni.

In sintesi, l'umidità da risalita capillare genera un ambiente insalubre e deteriorato che, oltre a compromettere la conservazione del patrimonio architettonico, rappresenta un fattore di rischio concreto per la salute e il benessere abitativo.

2.6.2.4 Impatti Sul Patrimonio Culturale

L'umidità da risalita capillare costituisce una minaccia non solo per il patrimonio architettonico, ma anche per la salvaguardia del patrimonio culturale materiale custodito al suo interno. Musei, biblioteche, archivi e pinacoteche rappresentano ambienti particolarmente

vulnerabili: la presenza costante di umidità e la mancanza di adeguate condizioni termo-igrometriche possono determinare danni, in molti casi irreversibili, alle opere d'arte, ai manufatti cartacei e ai materiali organici di natura documentaria o artistica. [Lombardi (2005)]

I materiali conservati in questi luoghi (carta, pergamena, cuoio, tessuti, legno, pigmenti e supporti murali) sono per loro natura fortemente igroscopici. L'umidità presente nelle pareti o nei pavimenti, risalendo per capillarità, modifica il microclima interno, generando elevate concentrazioni di vapore acqueo che si traducono in condensa superficiale e interstiziale. Questo fenomeno, oltre a favorire l'instaurarsi di microambienti instabili, altera l'equilibrio termoigrometrico richiesto per una corretta conservazione preventiva.

Nei depositi archivistici e bibliotecari, la risalita capillare provoca un incremento dell'umidità relativa che, se non adeguatamente controllato, determina macchie, deformazioni, increspature, crescita biologica e fragilità meccanica dei materiali cartacei e pergamenacei. Tali alterazioni compromettono la leggibilità, accelerano i fenomeni di invecchiamento della cellulosa e rendono difficoltosa la manipolazione dei documenti, aumentando il rischio di danni durante le operazioni di consultazione o restauro.

Nei musei e nelle gallerie d'arte, le opere esposte a ridosso di pareti soggette a umidità ascendente risultano particolarmente esposte all'azione combinata di vapore acqueo, sali solubili e contaminanti biologici. Le pitture murali, ad esempio, possono subire sollevamenti, efflorescenze saline, distacchi dello strato pittorico e fenomeni di decoesione, mentre cornici lignee, supporti telati o dorature sono soggetti a biodeterioramento, imbarcamenti, rigonfiamenti e fessurazioni. Le opere policrome, inoltre, reagiscono in modo estremamente sensibile a oscillazioni termoigrometriche anche minime, che alterano il bilancio idrico interno e favoriscono la mobilizzazione dei leganti.

Particolarmente critica è la condizione degli ambienti ipogei o seminterrati (depositi, cripte, magazzini), dove la ventilazione naturale è limitata e la presenza di fonti di umidità dal sottosuolo è costante. In questi spazi, l'umidità ascendente può innalzarsi fino a oltre un metro, coinvolgendo interi apparati decorativi, basamenti lapidei, scaffalature e oggetti da esposizione o archiviazione non opportunamente isolati. Il contatto diretto con materiali lignei o cartacei favorisce fenomeni di carie, attacchi fungini, decolorazioni e perdita di integrità strutturale.

L'umidità da risalita agisce anche in maniera indiretta, poiché interferisce con i sistemi di climatizzazione passiva o attiva, rendendoli inefficaci o controproducenti. Le fluttuazioni incontrollate dell'umidità relativa interna, anche nell'arco della stessa giornata, possono provocare cicli di imbibizione e asciugatura non uniformi che compromettono la stabilità dimensionale degli oggetti e dei materiali da conservare. Nei casi peggiori, si assiste alla disgregazione progressiva degli strati costitutivi o al collasso delle fibre organiche.

Le conseguenze si riflettono non solo sul valore materiale ed estetico dei beni, ma anche sulla loro accessibilità, sicurezza e fruibilità pubblica. In ambienti museali e culturali, la perdita anche parziale dell'integrità di un'opera può precluderne l'esposizione, ridurne il valore testimoniale e richiedere costosi e complessi interventi di restauro.

In questo contesto, l'umidità da risalita capillare impone la necessità di strategie conservative multidisciplinari e integrate. Le soluzioni efficaci devono prevedere una stretta collaborazione tra restauratori, conservatori, ingegneri, architetti e tecnici dell'ambiente, orientata al monitoraggio microclimatico, alla regolazione termoigrometrica e alla mitigazione permanente delle fonti di umidità. Solo in tal modo è possibile garantire condizioni stabili, compatibili con la natura dei materiali conservati e con le esigenze di tutela del patrimonio culturale.

MECCANISMI DI TRASPORTO DELL'ACQUA NEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

3

3.1 Porosità

3.2 Trasporto dell'umidità: fondamenti fisici

3.3 Meccanismi di assorbimento

3.4 Modelli di flusso nei mezzi porosi

3 MECCANISMI DI TRASPORTO DELL'ACQUA NEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

La presenza di umidità nei materiali da costruzione è una delle principali cause di degrado del patrimonio architettonico. Per interpretare correttamente le manifestazioni patologiche associate all'umidità e definire strategie di intervento efficaci e durature, è fondamentale analizzare il comportamento dell'acqua all'interno dei materiali porosi.

Questo capitolo introduce le principali proprietà fisiche e chimiche che regolano le interazioni tra i materiali da costruzione e l'umidità, sia in fase liquida che in fase di vapore. In particolare, caratteristiche come porosità, imbibizione, adescamento, permeabilità e igroscopicità influenzano direttamente i meccanismi di trasporto, accumulo ed evaporazione dell'acqua, condizionando il comportamento igrometrico dei materiali.

La comprensione di tali proprietà e dei principi che ne governano il funzionamento costituisce la base per affrontare in modo consapevole le problematiche legate alla presenza di acqua negli edifici. Queste conoscenze permettono di valutare la durabilità dei materiali, progettare interventi diagnostici e conservativi basati su criteri scientifici, e garantire prestazioni adeguate in termini di salubrità ambientale ed efficienza energetica.

3.1

POROSITÀ

3.1 Porosità

Tra le diverse proprietà che influenzano il comportamento igrometrico dei materiali da costruzione, la ***porosità*** rappresenta il presupposto strutturale fondamentale [Delgado (2016); Guolo (2024); Hall (2009); Vitiello, Castelluccio (2019)]. Essa determina la presenza, la forma e la distribuzione degli spazi vuoti (pori, cavità e fratture) all'interno del materiale, condizionando direttamente la sua capacità di assorbire, trattenere e trasferire l'umidità. Analizzarne le caratteristiche è quindi il primo passo per comprendere i meccanismi attraverso cui l'acqua interagisce con la matrice solida.

La porosità (***n***) è definita come il rapporto tra il volume dei vuoti (V_v) presenti in un materiale e il suo volume totale apparente (***V***) [Hall (2009); Hird (2016); Premoli (2015); Vitiello, Castelluccio (2019)]:

$$n = \frac{V_v}{V} \left[\frac{m^3}{m^3}\right]$$

Questo parametro, espresso come valore compreso tra 0 e 1 (o in percentuale), è un indicatore quantitativo che misura la frazione di spazio vuoto all'interno di un materiale.

È importante sottolineare che la porosità non è una proprietà omogenea né isotropa: anche i materiali apparentemente più compatti presentano, in realtà, una certa frazione del loro volume occupata da pori. Queste cavità possono assumere forme e dimensioni molto differenti (sferiche, allungate, ramificate o irregolari) (Fig.9) e la loro connessione con l'ambiente esterno rappresenta un criterio fondamentale per la comprensione del comportamento igrometrico.

In base alla loro origine, i pori si distinguono in primari e secondari (Fig. 10) [Premoli (2015)].

Fig. 9 | Variabilità morfologica dei pori

Fig. 10 | Porosità chiusa, aperta ed efficace

I ***pori primari***, o di base, si formano durante il processo stesso di realizzazione del materiale. Ne sono esempio gli spazi intergranulari tra le particelle solide, la cui dimensione e distribuzione dipendono dalla granulometria e dal grado di compattazione della miscela. I ***pori secondari***, invece, si sviluppano successivamente, come conseguenza di specifici fenomeni fisici o chimici. Tra questi rientrano i pori di dissoluzione, generati dalla rimozione di componenti solubili; i pori da frattura, dovuti a sollecitazioni meccaniche o a stati tensionali interni che determinano la formazione di microfessure; i pori da ritiro, tipicamente osservabili nei materiali cementizi o nelle malte, causati dalla perdita d'acqua e dalla conseguente riduzione volumetrica durante l'asciugatura; i pori da intrappolamento di gas, che possono formarsi durante l'impasto o come risultato di reazioni chimiche all'interno del materiale stesso.

Sotto il profilo funzionale, si distingue tra porosità chiusa e porosità aperta [Hall (2009); Hird (2016); Lombardi (2005); Premoli (2015)]. La ***porosità chiusa*** è costituita da cavità isolate che non comunicano né con l'ambiente esterno né con altri pori interni. Non partecipando ai processi di trasporto di fluidi, questi pori non influenzano direttamente la permeabilità del materiale. Tuttavia, incidono su altre proprietà come la massa volumica apparente, la conducibilità termica e il comportamento meccanico [Hall (2009); Lombardi (2005); Premoli (2015)]. La ***porosità aperta***, invece, comprende tutti quei pori che comunicano direttamente con la superficie del materiale: cavità accessibili dall'esterno che costituiscono le principali vie di ingresso per l'umidità, sia in forma liquida che in vapore. Essa influenza quindi in modo determinante la permeabilità, la durabilità e il comportamento igroscopico del materiale [Hall (2009); Lombardi (2005); Premoli (2015)].

È importante sottolineare che non tutti i pori aperti sono interconnessi: alcuni, pur comunicando con la superficie, restano isolati all'interno della matrice solida. All'interno della porosità aperta si distingue una sottoclasse particolarmente rilevante, detta ***porosità percolante*** (o ***porosità efficace***), che include solo quei pori aperti e interconnessi tra loro che formano un reticolo continuo in grado di attraversare l'intero volume del materiale [Lombardi (2005). Questo sistema percolante è ciò che consente l'effettivo trasporto macroscopico di fluidi e gas [Hall (2009)].

Secondo la ***teoria della percolazione***, esiste una soglia critica oltre la quale i pori interconnessi si organizzano in un cluster continuo, che si estende nel materiale in tutte le direzioni consentendo la migrazione efficace dei fluidi. Al di sotto di tale soglia, i pori risultano organizzati in cluster finiti non comunicanti, che non garantiscono un percorso di trasporto efficace, rendendo la permeabilità fortemente limitata anche in presenza di porosità aperta [Hall (2009)].

Indicando con V (m^3) il volume totale apparente del materiale, con V_s (m^3) il volume della sola fase solida, e con V_{pa} (m^3) e V_{pc} (m^3) rispettivamente i volumi dei pori aperti e chiusi, si hanno le seguenti relazioni [Congedo (2021); Premoli (2015)]:

$$V = V_s + V_{pa} + V_{pc}$$

La ***porosità totale*** (n) si definisce come [Hall (2009); Lombardi (2005)]:

$$n = \frac{V_{pa} + V_{pc}}{V} = 1 - \frac{V_s}{V}$$

mentre la ***porosità aperta*** (n_a), accessibile ai fluidi, è:

$$n_a = \frac{V_{pa}}{V}$$

e la ***porosità chiusa*** (n_c):

$$n_c = \frac{V_{pc}}{V}$$

Ne deriva che:

$$n = n_a + n_c$$

Tali distinzioni sono fondamentali per comprendere il comportamento igroscopico e la durabilità dei materiali, in quanto influenzano direttamente i meccanismi di degrado indotti dall'umidità [Lombardi (2005)].

Particolarmente significativa è la correlazione tra porosità e ***permeabilità***, definendo quest'ultima come la capacità di un materiale di lasciarsi attraversare o penetrare da un fluido [Guolo (2024)]. Questa proprietà dipende non solo dalla quantità di vuoti, ma anche dalla loro forma, dimensione e interconnessione. In altre parole, la permeabilità non è semplicemente funzione della porosità, ma della topologia del sistema poroso.

La ***dimensione dei pori*** riveste un ruolo determinante nei processi di trasporto [Delgado (2016); Lombardi (2005)]. Essa condiziona la superficie specifica interna disponibile per le interazioni tra fluido e solido, e regola le pressioni capillari che si instaurano nei pori. In questo contesto è utile richiamare la ***classificazione IUPAC*** (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), adottata a livello internazionale nella chimica dei materiali e valida anche per i materiali da costruzione. Questa classificazione distingue tre fasce dimensionali:

- **Micropori (Ø < 2nm):** pori estremamente fini in cui l'acqua viene trattenuta per adsorbimento ("*fenomeno in virtù del quale la superficie di una sostanza solida, detta adsorbente, fissa molecole provenienti da una fase gassosa o liquida con cui è a contatto*" – Treccani). Tuttavia, in questa scala dimensionale, il diametro è troppo ridotto per consentire un flusso continuo del liquido: l'acqua si muove molto lentamente o rimane intrappolata [Guolo (2024); Premoli (2015)].
- **Mesopori (2nm ≤ Ø ≤ 50nm):** in questa fascia dimensionale si verificano i principali fenomeni di condensazione, migrazione dell'umidità e trasporto del vapore. In particolare, il vapore può condensare all'interno dei mesopori anche quando l'umidità relativa è inferiore al 100%. Questo accade a causa della curvatura concava del menisco che si forma nei pori (un concetto che verrà approfondito più avanti, in relazione alle pressioni capillari e ai fenomeni di imbibizione). Tale curvatura genera una diminuzione della pressione di vapore richiesta per il passaggio del vapore allo stato liquido. Il fenomeno è descritto dall'***equazione di Kelvin***, che mette in relazione il raggio del poro con la pressione di vapore in equilibrio [Hall (2009)]:

$$\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = -\frac{2\sigma V_m}{rRT}$$

Dove:

- p [Pa] è la pressione di vapore in equilibrio con il menisco concavo all'interno del poro
- p_0 [Pa] è la pressione di vapore saturo a superficie piana
- σ [N/m] è la tensione superficiale
- V_m [m3/mol] è il volume molare del liquido
- r [m] è il raggio di curvatura nel menisco (approssimabile al raggio del poro)
- R è la costante dei gas pari ad 8,314 [J/(mol·K)]
- T [K] è la temperatura assoluta

Da questa relazione si deduce che nei pori più piccoli la pressione di vapore necessaria alla condensazione è più bassa rispetto alla pressione di saturazione su una superficie piana. In altre parole, l'acqua può condensare nei mesopori anche in condizioni ambientali non sature, contribuendo così alla ritenzione di umidità da parte

del materiale. Questo comportamento ha importanti conseguenze sul piano applicativo: i mesopori rappresentano le vie principali attraverso cui l'umidità viene assorbita, trattenuta e rilasciata, e giocano un ruolo chiave nei cicli igroscopici e nei processi di degrado correlati alla presenza d'acqua [Guolo (2024); Premoli (2015)].

- **Macropori (Ø > 50nm):** cavità di dimensioni maggiori che non generano forze capillari significative, ma facilitano il deflusso dei liquidi e la diffusione del vapore. La macroporosità è generalmente legata alla microstruttura del materiale ed alla tecnologia produttiva adottata [Guolo (2024); Premoli (2015)].

Alla luce di quanto analizzato, risulta evidente che le caratteristiche morfologiche e strutturali del sistema poroso influenzano profondamente il comportamento dell'umidità nei materiali da costruzione. Prima di approfondire i meccanismi di trasporto dell'acqua, è opportuno soffermarsi su alcune proprietà funzionali che ne regolano l'interazione con la matrice solida, come imbibizione, assorbimento capillare, permeabilità e igroscopicità.

3.2

TRASPORTO DELL'UMIDITÀ: FONDAMENTI FISICI

3.2 Trasporto dell'umidità: fondamenti fisici

La descrizione della porosità e delle sue caratteristiche morfologiche fornisce il presupposto essenziale per comprendere il comportamento igrometrico dei materiali da costruzione. Tuttavia, affinché l'umidità possa effettivamente penetrare e muoversi all'interno di questi spazi vuoti, è necessario analizzare anche i fenomeni fisici che governano l'interazione tra l'acqua e la superficie solida dei pori.

Tali fenomeni coinvolgono forze intermolecolari, tensione superficiale e meccanismi di adesione e coesione che regolano la forma del menisco, la pressione capillare e l'imbibizione [Delgado (2016)]. Comprendere queste dinamiche è fondamentale per analizzare i successivi meccanismi di trasporto dell'umidità nei materiali porosi, e per interpretare correttamente le proprietà funzionali come l'assorbimento capillare, la permeabilità e l'igroscopicità.

3.2.1 Tensione superficiale, angolo di contatto e menisco

Il trasporto dell'umidità nei materiali porosi è governato da una serie di fenomeni fisici che si manifestano all'interfaccia tra fase solida, liquida e gassosa. Tra questi, la tensione superficiale, l'angolo di contatto e la formazione del menisco sono determinanti per comprendere i meccanismi iniziali con cui l'acqua interagisce con la superficie dei materiali e penetra nei pori.

La molecola d'acqua (H_2O) è costituita da un atomo di ossigeno e due di idrogeno, disposti secondo una struttura tetraedrica che conferisce alla molecola una geometria angolare. La differenza di elettronegatività tra ossigeno e idrogeno comporta una distribuzione asimmetrica delle cariche, con una parziale carica negativa (δ-) localizzata sull'ossigeno e una carica positiva (δ+) sugli atomi di idrogeno. Questa polarità fa sì che l'acqua si comporti come un dipolo elettrico, responsabile sia della coesione tra le molecole d'acqua, sia dell'adesione sulle superfici solide, aspetti cruciali per il comportamento del liquido nei materiali porosi [Congedo (2021); Guolo (2024)].

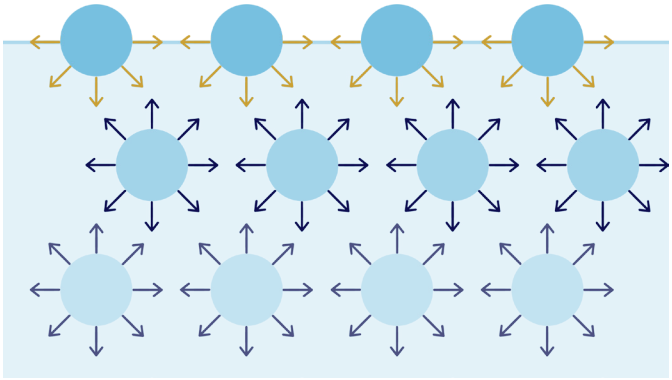


Fig. 11 | Tensione superficiale

Le molecole d'acqua sono tenute insieme da forze di coesione che permettono loro di muoversi senza disperdersi. All'interno del liquido, ogni molecola è circondata da altre molecole con cui si bilanciano le forze di attrazione (la risultante delle forze coesive è nulla), ma in corrispondenza di una superficie libera (interfaccia liquido-vapore), le molecole sono soggette a una forza risultante che le attrae verso l'interno del liquido detta ***tensione superficiale*** (***σ***) (Fig. 11) .

La ***tensione superficiale*** (***σ***) è una proprietà fisica descritta da Thomas Young che esprime la tendenza di un liquido a contrarsi per minimizzare la propria area, comportandosi come una membrana elastica. È proprio per questo motivo che, in assenza di forze esterne, una goccia di liquido tende ad assumere una forma sferica, che corrisponde alla minima superficie per un dato volume [Fioravanti

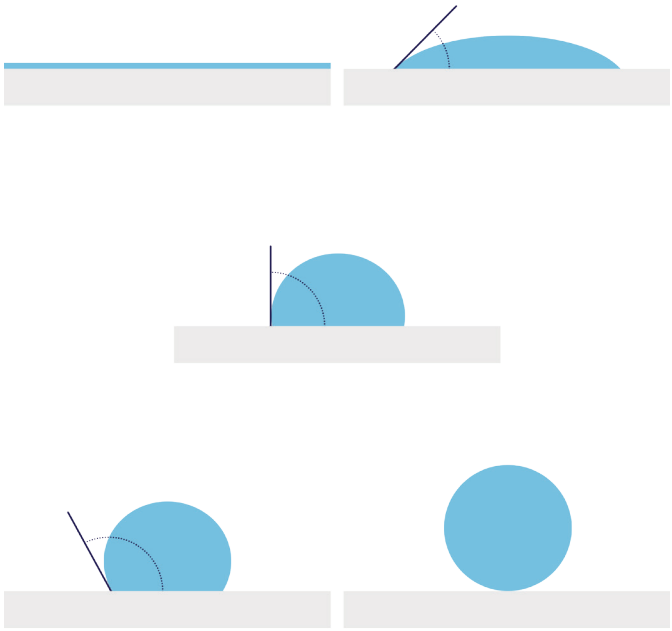


Fig. 12 | Gradi di bagnamento in funzione dell'angolo di contatto

(2017); Hird (2016); Lombardi (2005); Vitiello, Castelluccio (2019)].

Quando una goccia d'acqua entra in contatto con una superficie solida, modifica la propria geometria in funzione dell'equilibrio tra le forze coesive interne al liquido (che mantengono la goccia compatta) e le forze adesive tra il liquido e il solido (che tendono a espanderla sulla superficie). Questo equilibrio si esprime attraverso il cosiddetto ***angolo di contatto*** (***ϑ***), definito come l'angolo formato tra la tangente alla superficie del liquido nel punto di contatto solido-liquido e la superficie del solido [Fioravanti (2017); Hird (2016); Lombardi (2005). Il valore di ***ϑ*** permette di classificare la bagnabilità di una superficie (Fig. 12):

- ***ϑ = 0° (bagnabilità totale – superficie idrofila):*** il liquido si distribuisce completamente sulla superficie
- ***0° < ϑ < 90° (bagnabilità parziale favorevole):*** il liquido tende a espandersi e può essere assorbito nei pori
- ***ϑ = 90°:*** stato limite tra bagnamento e non bagnamento
- ***90° < ϑ < 180° (bagnabilità sfavorevole):*** il liquido forma gocce arrotondate e tende a rimanere separato dalla superficie solida
- ***ϑ = 180° (assenza di bagnabilità – superficie idrofoba):*** la goccia è quasi perfettamente sferica e indipendente dalla superficie del solido

Questa interazione iniziale tra fluido e superficie è determinante per i fenomeni di adesione e per l'attivazione dei meccanismi di imbibizione nei materiali da costruzione. In presenza di pori aperti idrofili, le forze adesive esercitate dalla superficie dei pori sono sufficienti a superare la coesione della goccia, innescando l'ingresso spontaneo del liquido nei pori. Viceversa, una superficie idrofoba respinge il liquido, ostacolando il trasporto capillare [Premoli (2015)].

In ambito edilizio, l'angolo di contatto ha implicazioni pratiche nella progettazione delle strategie di intervento (es. trattamenti idrofobizzanti) e nello studio dei fenomeni di degrado legati all'umidità.

Quando l'acqua raggiunge l'ingresso di un poro, la sua superficie libera si incurva generando un'interfaccia concava detta ***menisco*** [Vitiello, Castelluccio (2019)]. La curvatura del menisco riflette l'equilibrio tra forze di coesione (che tendono a mantenere la goccia compatta) e forze di adesione (che favoriscono l'espansione del liquido sulle pareti) ed è determinata dall'angolo di contatto tra il liquido e la superficie interna del poro (Fig. 13) [Lombardi (2005):

- Se $\vartheta < 90°$, le forze adesive prevalgono e il menisco assume una forma concava (verso l'interno del liquido)
- Se $\vartheta > 90°$, prevalgono le forze coesive e il menisco è convesso (verso l'esterno)
- Nel caso di bagnabilità perfetta $\vartheta \approx 0°$, il menisco è fortemente concavo e si massimizza la risalita del liquido

Questa curvatura, combinata con la tensione superficiale, determina una differenza di pressione tra la superficie del menisco e

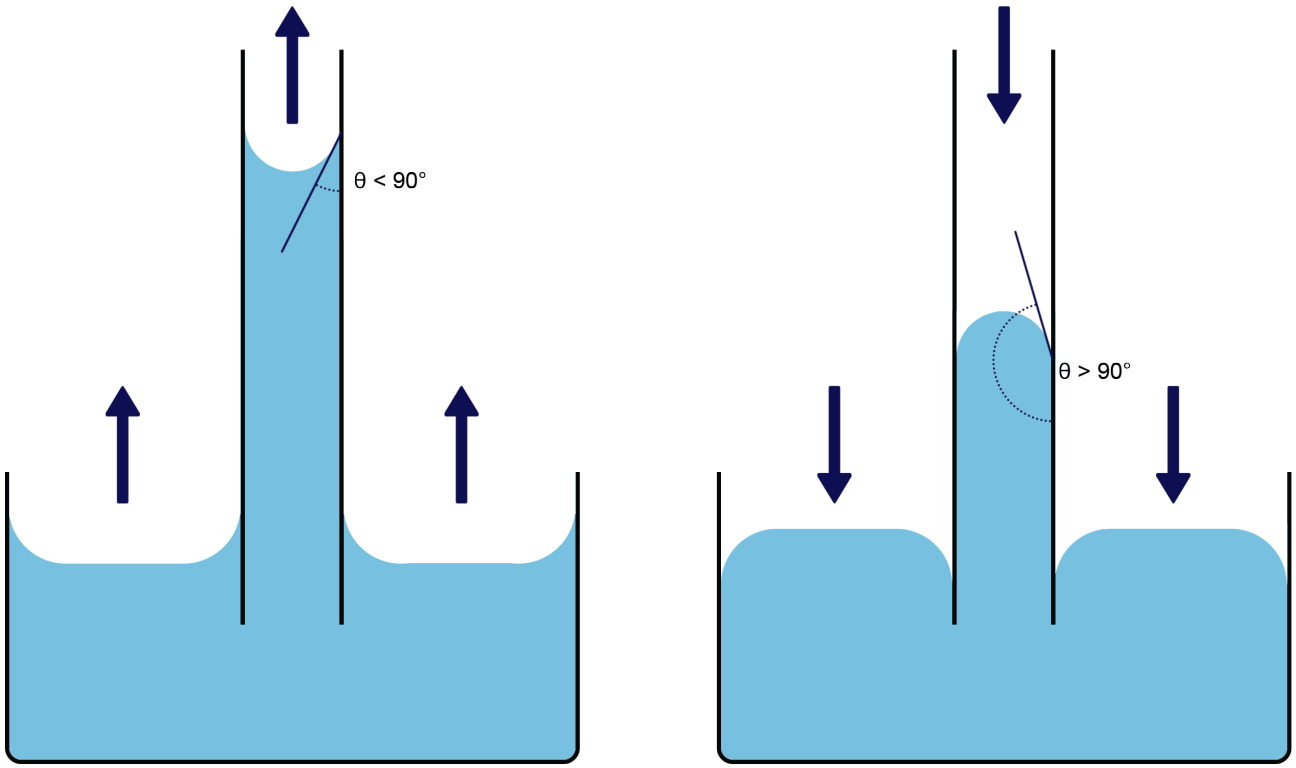


Fig. 13 | Comportamento del Menisco in Fenomeni di Capillarità: Influenza dell'Angolo di Contatto

l'ambiente esterno [Hall (2009)]. In particolare, un menisco concavo genera una pressione negativa all'interno del liquido rispetto alla pressione atmosferica: questo squilibrio è noto come ***suzione capillare*** e costituisce la forza motrice del trasporto spontaneo dell'acqua all'interno dei pori. Nei materiali da costruzione, tale meccanismo è essenziale per l'imbibizione, la risalita capillare ed altri fenomeni legati al trasporto dell'umidità [Hall (2009)].

In sintesi, un angolo di contatto favorevole ($\vartheta < 90°$) non solo consente l'adesione del liquido alla superficie solida, ma è anche responsabile della curvatura del menisco necessaria a generare una pressione differenziale che induce il liquido a penetrare nei pori.

3.2.2 Adescamento

Quando l'acqua entra in contatto con una superficie porosa idrofila, può innescarsi un fenomeno noto come ***adescamento***, che descrive la tendenza di un liquido ad espandersi e distribuirsi su una superficie solida, ovvero a "bagnarla". Questo comportamento è essenziale affinché il liquido possa successivamente penetrare nei pori del materiale [Premoli (2015)].

L'adescamento si verifica quando la sostituzione dell'interfaccia solido-aria con quella solido-liquido comporta una riduzione dell'energia libera del sistema. Ogni materiale, solido o liquido, possiede un'energia superficiale caratteristica, dovuta al fatto che atomi e molecole situati sulla superficie si trovano in uno stato energetico più elevato rispetto a quelli all'interno del volume.

Quando un liquido entra in contatto con una superficie solida la sua distribuzione dipende non solo dalle proprietà chimico-fisiche delle interfacce coinvolte, ma anche dalle forze che agiscono sulla superficie del liquido stesso. In particolare, come abbiamo visto, la tensione

superficiale tende a minimizzare l'area libera del liquido, generando una pressione interna maggiore rispetto a quella esterna.

Nei materiali porosi, ciò porta alla formazione di menischi concavi nei pori più piccoli, che esercitano una spinta sul liquido verso l'interno dei pori. Questo comportamento sarà meglio descritto nella sezione successiva tramite la ***legge di Young-Laplace*** che ci consentirà di quantificare la pressione capillare generata dalla curvatura del menisco [Fioravanti (2017); Franzoni (2014); Hall (2009); Hird (2016)].

Tuttavia, per comprendere appieno se un liquido bagnerà una superficie, non basta considerare la sola tensione superficiale, ma è necessario valutare anche l'interazione energetica tra le diverse interfacce coinvolte nel sistema. In particolare, si considerano tre energie superficiali:

- σ_{SA} [J/m2]: energia superficiale del solido a contatto con l'aria
- σ_{LA} [J/m2]: energia superficiale del liquido a contatto con l'aria
- σ_{SL} [J/m2]: energia dell'interfaccia solido-liquido

Il bilancio tra queste energie determina il grado di bagnabilità del solido da parte del liquido. Questo equilibrio è descritto dalla relazione di Young, che fornisce il legame tra l'angolo di contatto ϑ e le tensioni superficiali in gioco (Fig. 14):

$$\sigma_{LA} \cos\theta = \sigma_{SA} - \sigma_{SL}$$

Da cui si deduce che:

- Se $\sigma_{SA} - \sigma_{SL} > \sigma_{LA}$, il liquido tende a bagnare completamente la superficie (bagnamento completo)
- Se $\sigma_{SA} - \sigma_{SL} < \sigma_{LA}$, il liquido assume un angolo $\vartheta > 0°$, generando un bagnamento parziale

In entrambi i casi, l'equilibrio si raggiunge quando le forze di tensione superficiale si bilanciano lungo la linea di contatto tra le tre fasi: solido-liquido-aria.

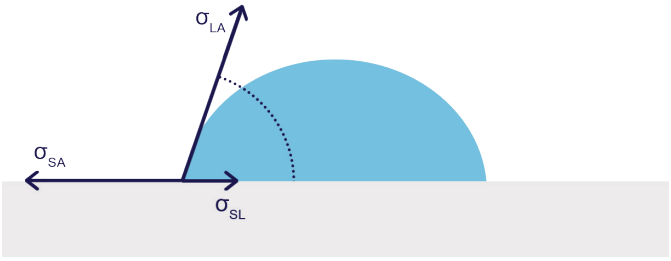


Fig. 14 | Rappresentazione dell'equilibrio delle tensioni superficiali secondo la relazione di Young

Questa dinamica è alla base del trasporto dell'umidità nei materiali da costruzione, ed è un meccanismo chiave per comprendere fenomeni quali la risalita capillare, l'assorbimento per imbibizione e l'interazione tra acqua e materiali porosi in condizioni ambientali variabili.

3.3

MECCANISMI DI ASSORBIMENTO

3.3 Meccanismi di assorbimento

3.3.1 Capillarità

A seguito del fenomeno di adescamento, descritto nella sezione precedente, nei materiali porosi si attiva un meccanismo di trasporto dell'acqua noto come capillarità. Comprendere questo fenomeno è fondamentale per analizzare come l'umidità si distribuisce e si muove nel reticolo poroso dei materiali. Questo meccanismo è alla base di diversi processi, come l'assorbimento per imbibizione, la risalita capillare e la redistribuzione interna dell'acqua nei materiali parzialmente saturi. In particolare, la risalita capillare rappresenta un caso specifico in cui l'acqua si muove verso l'alto contro la forza di gravità. Questo fenomeno è responsabile dell'umidità di risalita capillare nelle murature che, come vedremo in seguito, è tra le cause principali di degrado negli organismi edilizi.

La ***capillarità*** è un fenomeno fisico che descrive il movimento spontaneo dell'acqua all'interno dei pori di un materiale, determinato dell'equilibrio tra le forze di coesione tra le molecole del liquido e le forze di adesione tra il liquido e la superficie solida [Premoli (2015)]. Come anticipato, queste forze in presenza di pori capillari causano la formazione di menischi curvi all'interfaccia tra liquido ed aria, che generano una differenza di pressione tra l'acqua nei pori e l'ambiente esterno. Questa differenza di pressione, nota come ***pressione capillare*** (P_c), o ***suzione capillare***, è ciò che guida il movimento dell'acqua nella matrice solida [Delgado (2016); Hall (2009); Guolo (2024)].

La pressione capillare si può esprimere attraverso la ***legge di Young-Laplace***, che mette in relazione le proprietà fisiche del sistema con la geometria del poro [Casti (2015); Franzoni (2014); Hall (2009)]:

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{r}$$

Dove:

- P_c è la pressione capillare [Pa]
- σ è la tensione superficiale [N/m]
- ϑ è l'angolo di contatto [°]
- r è il raggio del poro [m]

Questa relazione evidenzia un concetto fondamentale: minore è il raggio del poro, maggiore sarà la pressione capillare esercitata dall'acqua per penetrare o risalire nel materiale. In materiali porosi eterogenei, l'acqua tende a migrare verso i pori più piccoli, seguendo un gradiente di pressione: ciò permette la redistribuzione interna dell'umidità [Casti (2015)].

Il fenomeno dell'***imbibizione*** è alla base di questo comportamento e si verifica quando le tensioni superficiali determinano la formazione di menischi concavi nei pori, generando una pressione interna inferiore a quella atmosferica. In questo stato, l'acqua si muove spontaneamente attraverso il materiale lungo i gradienti di pressione capillare, cercando di riequilibrare la distribuzione idrica [Guolo (2024); Premoli (2015)].

Per conoscere la capacità di un materiale di assorbire acqua, si utilizza il ***coefficiente di imbibizione***, definito come l'aumento percentuale di peso che un campione subisce dopo prolungata immersione in acqua, rispetto al suo peso allo stato secco [Congedo (2021); Guolo (2024); Premoli (2015)]:

$$i\% = \frac{G_m - G}{G} \cdot 100$$

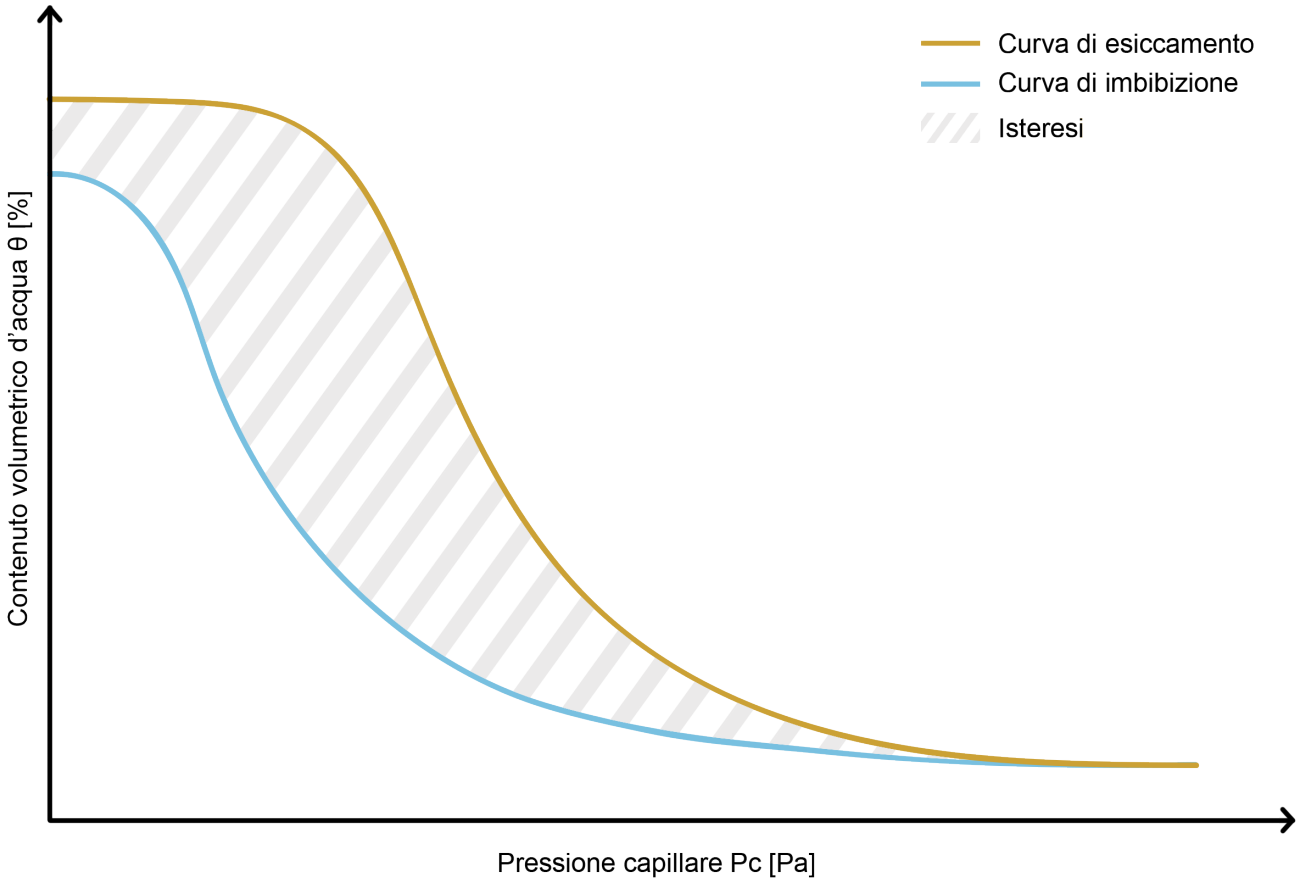


Fig. 15 | Curva caratteristica idrica

Dove:

- ***G*** è il peso del provino asciutto
- G_m è il peso del provino bagnato

Questo parametro fornisce un'indicazione pratica della porosità aperta effettiva del materiale e della sua capacità di assorbire acqua.

Perché il fluido possa effettivamente migrare, non basta la sola spinta capillare: il poro deve essere sufficientemente ampio da permettere il passaggio dell'acqua e energeticamente favorevole.

La ***forza capillare*** (***F***), che si sviluppa lungo la linea di contatto tra liquido e solido, rappresenta l'effetto microscopico alla base della pressione capillare ed è data dalla relazione [Guolo (2024)]:

$$F = 2\pi r\sigma \cos\theta$$

Dove:

- ***F*** è la forza capillare [N]
- ***r*** è il raggio del capillare [m]
- σ è la tensione superficiale [N/m]
- ϑ è l'angolo di contatto [°]

Questa forza è coerente con la pressione capillare descritta sopra, ma espressa in termini di forza applicata su una superficie curva.

Nel contesto ingegneristico e dei modelli idraulici nei mezzi porosi, si usa spesso esprimere la pressione capillare anche in forma di ***potenziale capillare*** (ψ), noto anche come ***potenziale di Buckingham***. Esso rappresenta l'energia potenziale per unità di peso del liquido, e si esprime come [Hall (2009)]:

$$\psi = \frac{p_c}{\rho g}$$

Dove:

- ρ [kg/m3] è la densità dell'acqua
- g [m/s2] è l'accelerazione di gravità

Il potenziale capillare ha dimensioni di lunghezza [m] e consente una rappresentazione intuitiva dell'energia del sistema, utile per modellare i flussi in mezzi insaturi.

La dipendenza della pressione capillare dal contenuto d'acqua è descritta dalla ***curva caratteristica idrica*** $p_c(\vartheta_w)$, dove ϑ_w rappresenta il contenuto volumetrico d'acqua nel materiale [Hall (2009)]. Questa curva rappresenta la relazione tra stato idrico e tensione capillare, e presenta si divide in due curve distinte:

- la curva di imbibizione, che descrive l'assorbimento d'acqua in un materiale asciutto
- la curva di essiccamento, che descrive il rilascio d'acqua da un materiale saturo

Queste curve (Fig. 15) mostrano un comportamento ad isteresi, ovvero a parità di contenuto d'acqua il percorso seguito durante l'assorbimento non coincide con quello dell'essiccamento. Questo comportamento è importante per la previsione realistica del comportamento igroscopico dei materiali da costruzione.

In sintesi, la capillarità nei materiali porosi è un fenomeno complesso ma ben descrivibile attraverso leggi fisiche fondamentali, che trovano applicazione diretta nello studio della durabilità, delle prestazioni igrotermiche e del degrado delle costruzioni.

3.3.1.1 Legge di Jurin

La pressione capillare generata nei materiali porosi, descritta nella sezione precedente, determina il movimento spontaneo dell'acqua verso le regioni a minore contenuto idrico. Tra i fenomeni più significativi connessi a questo meccanismo vi è la risalita capillare dell'umidità, che può avvenire anche contro la forza di gravità. Per stimare teoricamente l'altezza massima raggiunta da un liquido in un sistema capillare verticale, si utilizza la ***legge di Jurin*** [Agyekum (2016); Congedo (2021); Franzoni (2014); Guolo (2024); Hall (2009); Lombardi (2005); Rirsch (2010); Vitiello, Castelluccio (2019)].

Questa legge, formulata su un modello ideale di tubo capillare cilindrico immerso in un liquido, esprime l'altezza di risalita come equilibrio tra la forza capillare che tende a far salire il liquido e la forza peso che lo trattiene (Fig. 16):

$$z_e = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g r}$$

Dove:

- z_e è l'altezza di risalita capillare [m]
- σ è la tensione superficiale del liquido [N/m]
- ϑ è l'angolo di contatto liquido-solido [°]
- ρ è la densità del liquido [kg/m^3]
- g è l'accelerazione gravitazionale [m/s^2]
- r è il raggio del tubo capillare [m]

L'equazione mette in evidenza che la risalita capillare è tanto maggiore quanto più il liquido è "adesivo" rispetto alla superficie solida (cioè con piccolo angolo di contatto), quanto maggiore è la tensione superficiale, e quanto più piccoli sono i pori. Al contrario, liquidi più densi o pori più grandi tendono a ridurre l'altezza raggiunta.

Infatti l'equazione di Jurin si basa su un modello idealizzato che non tiene conto dell'eterogeneità e tortuosità dei pori, della variazione nella

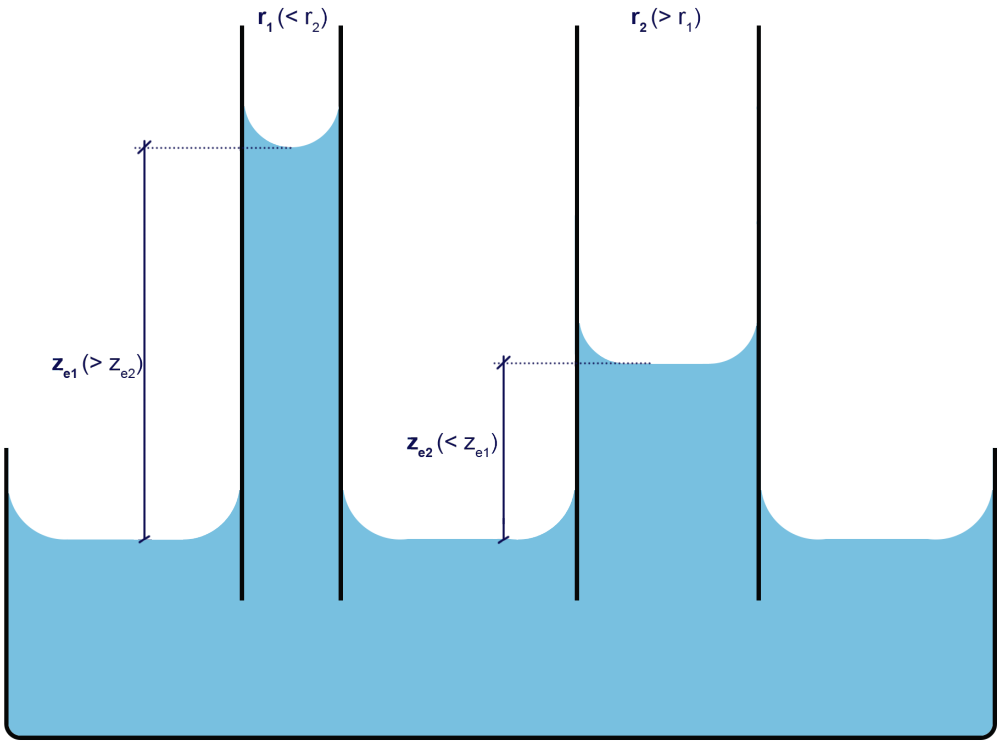


Fig. 16 | Effetto del raggio capillare sull'altezza di risalita del liquido: illustrazione della legge di Jurin

distribuzione delle dimensioni capillari, degli effetti dell'evaporazione e delle interazioni con sali solubili e materiali costituenti. Infatti, applicando la legge di Jurin all'acqua a temperatura ambiente (20°C), con una tensione superficiale $\sigma \approx 0.072$N/m e una densità $\rho \approx 999.8$ kg/m^3, e considerando un raggio capillare compreso tra 0.1 e 1 µm (valori tipici di molti materiali da costruzione), si ottengono altezze teoriche di risalita anche superiori ai 10-15 metri. Tuttavia, nelle condizioni reali dei materiali da costruzione, tale valore rappresenta un limite ideale mai effettivamente raggiunto.

La struttura porosa di una muratura è caratterizzata da una rete irregolare di pori con distribuzioni dimensionali variabili, percorsi tortuosi, discontinuità e presenza di fessure, che influiscono negativamente sulla continuità della risalita. Inoltre, il processo è fortemente influenzato da fenomeni di evaporazione attraverso le superfici esposte. In pratica, l'acqua assorbita dalla base di una muratura evapora man mano che risale, dando luogo a un equilibrio dinamico tra assorbimento e perdita per evaporazione.

L'altezza effettiva della zona umida si stabilizza dunque a un livello stazionario, che dipende dal bilancio tra la quantità d'acqua fornita per capillarità (U) e quella persa per evaporazione (U_e) [Rirsch (2010)].

Questo equilibrio è condizionato da fattori ambientali, come temperatura, umidità relativa e ventilazione, e dalle proprietà fisiche del

materiale, in particolare la permeabilità e la porosità. Anche la presenza di sali solubili, che cristallizzano durante il ciclo di evaporazione, può alterare il regime di risalita.

Comprendere le implicazioni della legge di Jurin, e i limiti del suo modello teorico, è essenziale per valutare correttamente il comportamento igroscopico delle murature e progettare strategie efficaci di deumidificazione. In ambito conservativo, questa consapevolezza permette di prevedere il potenziale sviluppo di degrado nei materiali da costruzione e orientare le scelte progettuali verso soluzioni compatibili con il contesto storico e materico dell'edificio.

3.3.1.2 Modello di Hall-Hoff

Come evidenziato nel paragrafo precedente, la legge di Jurin, pur costituendo un riferimento teorico essenziale per la comprensione dei fenomeni capillari nei materiali porosi, presenta limiti significativi se applicata a sistemi reali. Il modello presuppone una geometria idealizzata (pori cilindrici regolari), condizioni isotermiche, assenza di evaporazione e un fluido in equilibrio meccanico. Per superare tali semplificazioni e descrivere con maggiore realismo il comportamento dell'umidità nelle strutture edilizie, viene utilizzato il ***modello di Hall-Hoff*** [Guolo (2024); Hall (2009); Rirsch (2010)].

Questo modello adotta un approccio semi-empirico per rappresentare il regime stazionario che si instaura tra due fenomeni contrapposti: l'assorbimento capillare dell'acqua dal terreno verso l'alto (***U***), che dipende dalle caratteristiche del materiale e dal tempo, e l'evaporazione dell'acqua attraverso le superfici esposte (U_e).

La muratura viene schematizzata come un corpo poroso omogeneo, di spessore ***b***, in contatto idraulico con il suolo alla base e di altezza teoricamente illimitata. Inizialmente l'acqua risale per capillarità lungo la struttura, ma l'evaporazione ne limita la crescita verticale, fino a raggiungere una condizione di equilibrio in cui il flusso assorbito è uguale a quello evaporato ($U = U_e$).

La quantità di acqua assorbita da una sezione muraria in un intervallo di tempo (***t***) è descritta da una legge di imbibizione capillare che dipende dalla ***sorptività*** (***S***) del materiale [Congedo (2021); Guimaraes (2016); Guolo (2024); Hall (2009); Hird (2016)]:

$$i = S \cdot \sqrt{t}$$

Dove:

- ***i*** è la quantità d'acqua assorbita [kg/m^2]
- ***S*** è la sorptività del materiale [kg/(m^2·s$^{1/2}$)]
- ***t*** è il tempo [s]

Allo stesso tempo, la quantità totale di acqua presente nella zona bagnata della muratura fino all'altezza h può essere espressa come:

$$i = w \cdot h$$

Dove:

- ***w*** è il contenuto umido della muratura nella zona satura [kg/m^3]
- ***h*** è l'altezza di risalita [m]

Ponendo le due espressioni in equilibrio si ottiene:

$$S \cdot \sqrt{t} = w \cdot h$$

Questa relazione mostra l'evoluzione temporale della risalita fino al raggiungimento di una condizione stazionaria, in cui l'altezza smette di crescere. Ricavando l'altezza massima teorica di risalita (h_{ss}) si ottiene [Congedo (2021)]:

$$h_{ss} = \frac{b \cdot S^2}{2w}$$

Questa espressione rappresenta il punto

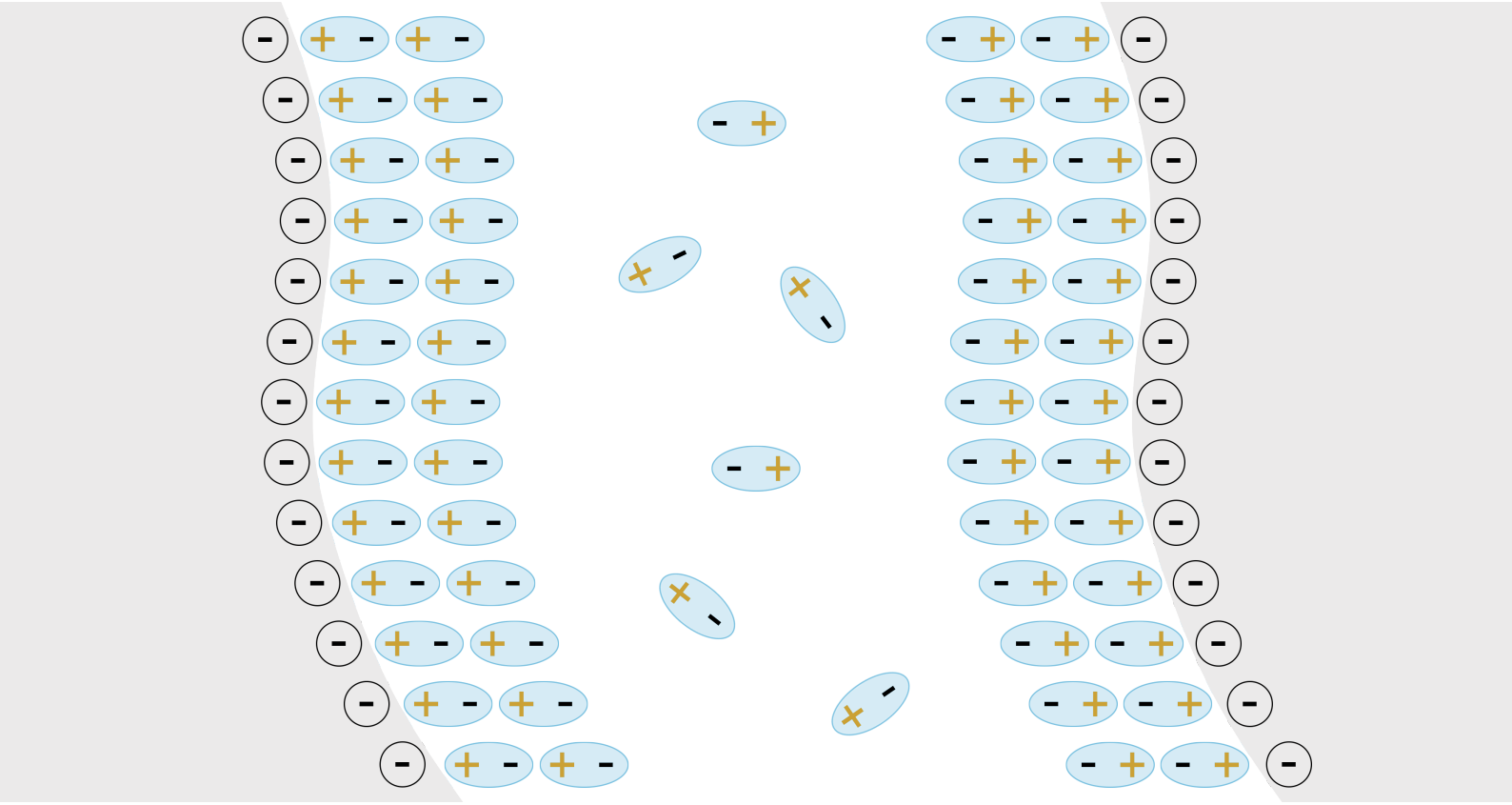


Fig. 17 | Doppio strato elettrico: schema capillare nella muratura

centrale del modello di Hall-Hoff, e mostra come l'altezza di risalita capillare in regime stazionario sia direttamente proporzionale alla sorptività ***S*** del materiale e allo spessore ***b*** della muratura, ma inversamente proporzionale al contenuto umido del materiale nella zona satura.

Il tasso di evaporazione influisce a sua volta sull'equilibrio. Esso dipende dalla velocità specifica di evaporazione (***e*** espressa in kg/(m^2·s)) e dall'altezza della zona umida ***h***:

$$U_e = e \cdot h$$

Eguagliando assorbimento ed evaporazione (***U = Ue***), è possibile ottenere una formulazione alternativa dell'altezza di risalita:

$$h = \left(\frac{S \cdot b}{\sqrt{e \cdot w}}\right)^2 = \frac{Sb}{\sqrt{ew}}\ [m]$$

Anche questa formulazione conferma che l'altezza di risalita capillare aumenta con l'incremento della sorptività e dello spessore murario, mentre diminuisce all'aumentare della velocità di evaporazione o del contenuto di umidità.

Il modello di Hall-Hoff rappresenta quindi un utile strumento interpretativo, capace di collegare in modo coerente proprietà fisiche del materiale, condizioni geometriche della muratura e fattori ambientali esterni. La sua formulazione semplice ma efficace consente di stimare, con buona approssimazione, l'altezza teorica della zona umida, utilizzando parametri misurabili o controllabili (come ventilazione, esposizione solare, trattamenti superficiali), rendendolo

applicabile alla diagnosi dell'umidità e alla progettazione di strategie di mitigazione per il degrado nelle murature esistenti.

3.3.1.3 Modelli Chimico-Fisici: Doppio Strato Elettrico

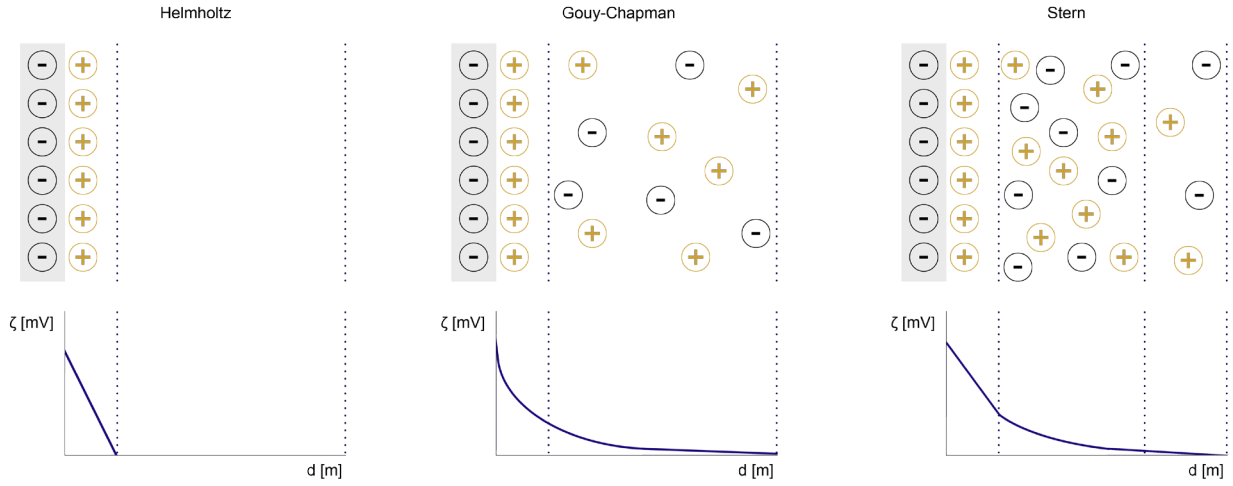
Oltre ai fenomeni meccanici e capillari, il trasporto dell'umidità nelle murature è influenzato anche da interazioni di tipo chimo-fisico ed elettrocinetico tra le molecole d'acqua e la superficie solida dei materiali. Questi fenomeni, spesso trascurati nelle analisi semplificate, rivestono invece un ruolo cruciale nella dinamica reale dell'umidità nelle murature. Il concetto chiave che li descrive è quello di doppio strato elettrico, una struttura che si forma all'interfaccia tra le superfici solide dei materiali e l'acqua, intesa come fluido contenente ioni (Fig. 17).

La natura chimica dei materiali costruttivi, generalmente ricchi di silicio, rappresenta un fattore determinante nella formazione e nel comportamento del doppio strato. L'isotopo di silicio conferisce alle pareti dei capillari una carica elettrica negativa. Quando l'acqua, che agisce come una soluzione ionica debole, entra in contatto con queste superfici, le molecole polarizzate si orientano elettrostaticamente con i poli positivi rivolti verso il solido e tendono a formare legami di tipo ionico. Questo comportamento genera la formazione di una struttura stratificata, costituita da uno strato più vicino al solido, dove i cationi sono disposti ordinatamente per neutralizzare la carica, e da una regione più diffusa e disorganizzata, in cui gli ioni si distribuiscono nel fluido.

In questo strato, noto come ***doppio strato di Helmholtz*** (1879), i cationi di dispongono ordinatamente, determinando una carica netta opposta a quella della superficie e provocando una diminuzione lineare del potenziale elettrico con l'aumentare della distanza [Endo (2001); Guolo (2024); Vitiello, Castelluccio (2019)]. Tuttavia, la distribuzione degli ioni non si arresta bruscamente oltre lo strato compatto, ma prosegue in una regione meno ordinata e più estesa, descritta dal modello di Gouy-Chapman (1910-1913), in cui il potenziale elettrico decresce esponenzialmente e la densità di carica ionica è più bassa e soggetta a movimenti aleatori [Doblhoff-Dier (2021); Endo (2001); Flanagan (2008); Guolo (2024)].

Il modello di Stern (1924) integra questi due

Fig. 18 | Modelli del doppio strato di Helmholtz, strato diffuso di Gouy-Chapman e Stern



approcci, rappresentando il doppio strato elettrico come composto da uno strato compatto, dove i cationi a bassa mobilità aderiscono alla superficie solida, e da uno strato diffuso, in cui gli ioni più mobili si distribuiscono nel fluido (Fig. 18) [Doblhoff-Dier (2021); Endo (2001); Flanagan (2008); Guolo (2024)].

Al di là della struttura stessa, un parametro fondamentale è il potenziale elettrico residuo, detto ***potenziale zeta*** (*ζ*), che esprime il gradiente elettrocinetico effettivo responsabile della migrazione delle particelle liquide. Questo potenziale dipende da fattori come la viscosità del liquido, la costante dielettrica del mezzo, lo spessore del doppio strato e la carica superficiale del materiale.

Nelle murature reali, il gradiente di potenziale zeta non è costante: varia a causa del continuo movimento dell'acqua, dell'evaporazione superficiale e della disomogeneità dei materiali, generando una forza elettrica interna che si somma alle pressioni capillari. In particolare, si osserva una correlazione tra l'intensità del potenziale zeta e la capacità del sistema poroso di attrarre acqua:

- ***ζ ≈ 0 mV :*** assenza di risalita capillare poiché si raggiunge un equilibrio elettrostatico [Guolo (2024); Vitiello, Castelluccio (2019)]
- ***ζ = 10-20 mV:*** risalita capillare debole [Guolo (2024); Vitiello, Castelluccio (2019)]
- ***ζ = 300-500 mV:*** intensa risalita capillare, sostenuta anche da forze elettrocinetiche [Guolo (2024); Vitiello, Castelluccio (2019)]

In questo contesto, l'acqua non è semplicemente attratta per tensione superficiale o per differenza di pressione, ma anche in virtù di una polarizzazione elettrica locale che ne influenza il comportamento molecolare.

Comprendere il ruolo del doppio strato elettrico consente di affinare le previsioni sul comportamento dell'umidità nei materiali e, soprattutto, di progettare strategie di mitigazione basate su una visione molecolare del degrado. Interventi come i trattamenti idrofobizzanti, la deumidificazione elettrofisica o l'ottimizzazione delle condizioni di ventilazione ambientale trovano una giustificazione più profonda se inquadrati all'interno di questo modello teorico. In definitiva, il doppio strato elettrico rappresenta una chiave di lettura essenziale per comprendere la complessità del trasporto d'acqua nei sistemi porosi, soprattutto in ambito conservativo e diagnostico.

3.3.2 Igroscopicità

Dopo aver analizzato i meccanismi capillari che governano il trasporto di acqua in fase liquida nei materiali porosi, è necessario considerare un ulteriore fenomeno che interviene quando l'acqua non è presente in forma libera, ma si manifesta come vapore in equilibrio con l'ambiente circostante. In queste condizioni, il comportamento del materiale dipende dalla sua capacità di interagire con il vapore acqueo atmosferico, assorbendolo o rilasciandolo in funzione dell'umidità relativa. Questo fenomeno, noto come ***igroscopicità***, rappresenta una modalità di trasporto e accumulo dell'umidità distinta ma complementare rispetto alla capillarità. Mentre quest'ultima implica il movimento dell'acqua liquida per effetto della pressione nei pori, l'igroscopicità descrive invece l'interazione tra le superfici porose del materiale e le molecole di vapore. Comprendere questo meccanismo è fondamentale per analizzare il comportamento igrometrico dei materiali, soprattutto in condizioni di parziale saturazione o di esposizione ambientale discontinua, e per valutare la durabilità e la risposta ai cicli di assorbimento e rilascio dell'umidità.

L'igroscopicità è la capacità di un materiale di assorbire o rilasciare acqua sotto forma di vapore acqueo in risposta alle variazioni di umidità relativa ambientale, fino al raggiungimento di uno stato di equilibrio. Questo comportamento è strettamente legato alla struttura microporosa del materiale, che ne influenza sia la capacità sia la velocità di scambio di umidità, ma anche alla composizione chimica, alla temperatura dell'aria e al contenuto di umidità all'equilibrio (EMC – *Equilibrium Moisture Content*) [Delgado (2016); Guolo (2024)].

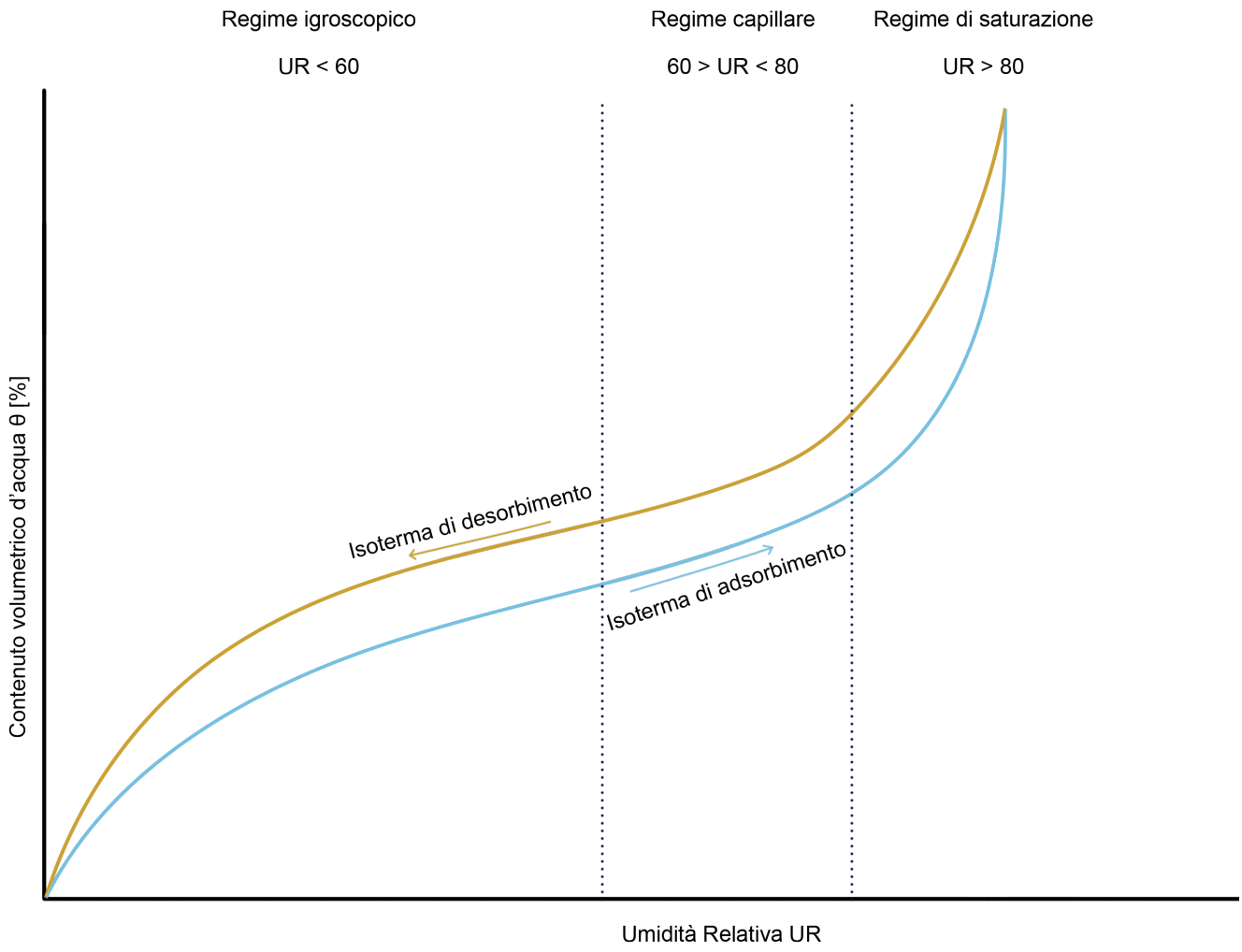


Fig. 19 | Isoterme di sorzione e regimi igrometrici

Questo fenomeno si manifesta attraverso un processo di adsorbimento e desorbimento del vapore acqueo da parte del materiale. L'***adsorbimento*** consiste nell'adesione delle molecole di vapore alle superfici solide del materiale, formando uno strato più o meno sottile di acqua legata molecolarmente. Questo processo differisce dall'assorbimento, che invece indica la penetrazione e distribuzione del fluido all'interno del volume del materiale o del poro, coinvolgendo quindi la fase interna e non solo la superficie.

La relazione tra l'umidità relativa dell'aria, mantenuta a temperatura costante, e il contenuto di umidità nel materiale può essere rappresentata mediante le cosiddette ***isoterme di sorzione*** (il termine "sorzione" indica il processo complessivo di ritenzione e rilascio di umidità da parte di un materiale, comprendendo sia l'adsorbimento che l'assorbimento). Queste curve (Fig. 19) descrivono quantitativamente l'interazione tra il vapore acqueo e la fase solida porosa, distinguendo due comportamenti opposti [Buttolo (2016); Guolo (2024)]:

- ***Isoterma di adsorbimento:*** ottenuta esponendo il materiale a livelli crescenti di umidità relativa. Rappresenta il processo mediante il quale le molecole d'acqua vengono attratte e trattenute sulla superficie interna dei pori
- ***Isoterma di desorbimento:*** descrive il rilascio progressivo di umidità da un materiale inizialmente saturo,

in condizioni di umidità relativa decrescente

Generalmente, le due curve non coincidono, dando luogo a un'isteresi che riflette la diversa energia richiesta nei due percorsi di scambio dell'umidità.

Il meccanismo di adsorbimento si manifesta prevalentemente nei materiali porosi in condizione di saturazione incompleta. In questi casi, le molecole di vapore si legano alla superficie interna dei pori per effetto delle forze elettrostatiche di van der Waal, dando origine alla formazione del doppio strato di Helmholtz.

L'interazione tra materiale poroso e umidità può essere ulteriormente chiarita distinguendo tre regimi principali, osservabili all'aumentare dell'umidità ambientale relativa [Guolo (2024)]. Nel primo, definito ***regime igroscopico***, il vapore acqueo viene adsorbito progressivamente sulla superficie interna dei pori: questo processo si sviluppa fino a circa il 60% di umidità relativa, ed è governato principalmente dalle interazioni superficiali. Quando l'umidità relativa supera una soglia critica, generalmente compresa tra il 60% e l'80%, si innesca il ***regime capillare***, in cui l'umidità in eccesso si accumula nei pori sotto forma liquida, per effetto della condensazione capillare. In questa fase, l'adsorbimento viene interrotto poiché le superfici risultano occupate da acqua allo stato liquido. Infine, si raggiunge il ***regime di saturazione***, corrispondente a un'umidità relativa prossima al 100%, dove i pori risultano completamente colmi d'acqua e il materiale non è più in grado di assorbirne altra.

Dal punto di vista quantitativo, il comportamento del materiale nei processi di adsorbimento e desorbimento può essere descritto da relazioni esponenziali che tengono conto dei parametri fisici coinvolti nella formazione del film d'acqua [Guolo (2024)]:

$$\varphi_{ads} = exp\left(-\frac{\sigma \cdot v}{(r - h_s)R \cdot T}\right)$$

$$\varphi_{des} = \exp\left(-\frac{2 \cdot \sigma \cdot v}{(r - h_d)R \cdot T}\right)$$

Dove:

- φ è l'umidità relativa (valore adimensionale)
- σ è la tensione superficiale dell'acqua [N/m]
- v è il volume molare dell'acqua [m3]
- h è lo spessore del film d'acqua [m]
- R è la costante dei gas per il vapore [J/kgK]
- T è la temperatura assoluta [K]

L'analisi delle due espressioni mostra che, a parità di condizioni, il processo di desorbimento risulta energeticamente più intenso rispetto a quello di adsorbimento. Ciò riflette il fatto che rimuovere molecole già organizzate in film multipli richiede una maggiore energia rispetto al legame iniziale tra molecole di vapore e superficie solida. In forma semplificata, si può descrivere questa differenza con la relazione:

$$\varphi_{des} = (\varphi_{ads})^2$$

Che rappresenta un'approssimazione utile per illustrare in termini qualitativi la maggiore difficoltà del rilascio di umidità rispetto all'assorbimento.

3.4

MODELLI DI FLUSSO NEI MEZZI POROSI

3.4 Modelli di flusso nei mezzi porosi

Dopo aver analizzato i meccanismi di assorbimento nei mezzi porosi, è possibile affrontare il tema della dinamica dei fluidi all'interno di tali sistemi. Il comportamento del fluido dipende in larga misura dallo stato di saturazione del mezzo: la descrizione del flusso saturo rappresenta il punto di partenza. A partire da questa base, sarà poi possibile estendere la trattazione ai casi più complessi di flusso insaturo, nei quali intervengono proprietà idrauliche variabili e processi non lineari.

3.4.1 Flusso saturo

La legge di Darcy descrive il flusso di un fluido attraverso un mezzo poroso saturo, affermando che la ***portata volumetrica Q*** (espressa in m^3/s) di un liquido attraverso un mezzo poroso è proporzionale alla ***differenza di pressione*** applicata ***Δp*** (Pa), proporzionale all'area della sezione trasversale ***A*** (m^2) e inversamente proporzionale alla lunghezza del campione ***L*** (m) [Casti (2015); Hall (2009)]:

$$Q = k \cdot \frac{A \cdot \Delta p}{L}$$

Dove ***k*** (m^2) è la ***permeabilità*** del materiale, considerata costante per un dato fluido e un mezzo poroso saturo. La permeabilità, definita come la proprietà di alcuni corpi di lasciarsi attraversare o penetrare da liquidi o gas, può essere distinta in due categorie: ***assoluta***, che dipende unicamente dalla struttura del mezzo poroso, ed ***effettiva***, che tiene conto anche delle proprietà del fluido, in particolare della ***viscosità dinamica μ*** (Pa·s) [Hird (2016)].

Sostituendo questi fattori nella formulazione, la ***legge di Darcy*** può essere espressa come:

$$u = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L}$$

Dove ***u*** (m/s) è la ***velocità di Darcy***, definita come portata volumetrica per unità di superficie [Hall (2009)]:

$$u = \frac{Q}{A} = k \cdot \frac{\Delta p}{L}$$

Questa velocità è una grandezza media apparente, in quanto considera l'intera sezione del mezzo, inclusa la parte solida non attraversabile dal fluido. Per ottenere la velocità reale del fluido all'interno dei pori, nota come ***velocità interstiziale*** o ***velocità effettiva*** u_{eff} (m/s), è necessario dividere la velocità di Darcy per la ***porosità efficace*** n_{eff} (adimensionale), cioè la frazione di volume effettivamente attraversabile dal fluido:

$$u_{eff} = \frac{u}{n_{eff}}$$

La legge di Darcy è formulata per condizioni di flusso saturo, ovvero quando tutti i pori del mezzo sono completamente riempiti di liquido. Il lavoro pionieristico di Henry Darcy ha costituito il fondamento teorico per lo studio del trasporto di fluidi nei mezzi porosi. Tuttavia, nella pratica, la legge viene spesso estesa anche a condizioni di flusso insaturo.

In questi casi, la permeabilità ***k*** non è più sufficiente a descrivere il sistema, e viene sostituita da una proprietà più generale nota come ***conduttività idraulica*** (o ***conduttività capillare***), indicata con ***K*** (m/s) [Hall (2009)]. A

differenza della permeabilità, ***K*** non è costante, ma varia in funzione del contenuto d'acqua $\boldsymbol{\theta}$ del mezzo:

$$K = K(\theta)$$

Questa dipendenza introduce una significativa nella modellazione del flusso, rendendo spesso inapplicabili soluzioni analitiche semplici. prosieguo del testo si adotteranno le seguenti convenzioni: il termine permeabilità sarà riservato alle condizioni sature, mentre i termini conduttività idraulica o conduttività capillare saranno utilizzati per il flusso insaturo. In condizioni di saturazione completa, le due grandezze coincidono.

Infine, è importante ricordare che la legge di Darcy è una relazione empirica, valida soltanto entro determinati limiti. In particolare, essa presuppone che il flusso nel mezzo poroso sia laminare, ovvero regolare e privo di turbolenze. Questo avviene quando il ***numero di Reynolds*** è sufficientemente basso:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu}$$

Dove:

- $\boldsymbol{\rho}$ [kg/m^3] è la densità del fluido
- $\boldsymbol{u}$ [m/s] è la velocità di Darcy
- $\boldsymbol{L}$ [m] è una lunghezza caratteristica (tipicamente la dimensione dei pori)
- $\boldsymbol{\mu}$ [Pa·s] è la viscosità dinamica del fluido

Il numero di Reynolds (***Re***) è un numero adimensionale che rappresenta il rapporto tra forze inerziali e forze viscose del fluido. Nei mezzi porosi, si ha un flusso laminare per valori molto bassi di Re, tipicamente Re $\ll$ 1. Al crescere di Re, il flusso può diventare turbolento o non lineare, rendendo necessaria l'adozione di modelli alternativi e più complessi.

3.4.2 Flusso insaturo

Concluso il quadro teorico sul flusso saturo, possiamo ora estendere l'analisi al comportamento del fluido in condizioni insature. In queste condizioni, non tutti i pori sono riempiti d'acqua e si sviluppano fenomeni più complessi, governati da proprietà idrauliche variabili e da meccanismi di trasporto non lineari, che richiedono un trattamento teorico più articolato.

Il flusso in condizioni insature è descritto dall'***equazione di Richards***, una relazione fondamentale che combina la legge di Darcy con il principio di conservazione della massa [Hall (2009)]. Essa consente di modellare la variazione del contenuto d'acqua nel tempo all'interno di un mezzo poroso soggetto a imbibizione o drenaggio.

Nella formulazione più diffusa, proposta da ***Klute***, si assume il contenuto volumetrico d'acqua $\boldsymbol{\theta}$ come variabile indipendente. La proprietà materiale dominante è la ***diffusività idraulica D(θ)*** (m2/s), che governa la velocità di propagazione dell'umidità all'interno del materiale e che è definita come [Hall (2009)]:

$$D(\theta) = \frac{K(\theta)}{C(\theta)}$$

Dove

- $\boldsymbol{K(\theta)}$ [m/s] è la conduttività idraulica, funzione del contenuto d'acqua, e rappresenta la capacità del materiale di trasmettere l'acqua
- $\boldsymbol{C(\theta)=d\theta/d\psi}$ [m^{-1}] è la capacità idrica specifica, che indica quanto rapidamente varia il contenuto d'acqua al variare del potenziale matriciale
- $\boldsymbol{\Psi}$ [m] è il potenziale matriciale, ossia l'energia con cui l'acqua è trattenuta nei pori del materiale, principalmente per effetto capillare.

L'equazione di Richards nella ***forma di Klute*** si scrive:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D(\theta) \nabla \theta)$$

Tuttavia, le funzioni ***D(θ)*** e ***K(θ)*** non sono lineari e variano fortemente in funzione di ***θ***. Questa non linearità rende complessa la risoluzione analitica dell'equazione, che nella pratica richiede l'impiego di metodi numerici avanzati.

Per ovviare a queste difficoltà, in molti contesti applicativi, si ricorre ad un modello semplificato noto come ***teoria del fronte netto***, (o *Sharp Front Theory*). Questa teoria si basa su osservazioni sperimentali che mostrano come, in molti materiali da costruzione, l'umidità non si distribuisca gradualmente, ma avanzi nel mezzo poroso formando un fronte di imbibizione ben definito, ovvero una transizione relativamente brusca tra la zona asciutta e quella satura [Hall (2009); Vitiello, Castelluccio (2019)].

Il motivo fisico risiede nel fatto che la ***diffusività idraulica D(θ)*** cresce molto rapidamente con il contenuto d'acqua ***θ***. Ne consegue che l'acqua penetra rapidamente fino a un certo punto, oltre il quale la velocità di imbibizione rallenta drasticamente. Questo determina la formazione di un gradiente estremamente ripido, che può essere efficacemente approssimato come netto [Hall (2009)].

In tal senso, la teoria del fronte netto può essere vista come una semplificazione della soluzione dell'equazione di Richards in presenza di non linearità. La teoria assume che:

- La zona imbibita abbia un contenuto d'acqua ***θ*** uniforme, prossimo alla saturazione
- Il fronte di imbibizione sia rappresentato da una superficie mobile caratterizzata da un potenziale capillare costante ***f***
- Il flusso nella zona imbibita sia trattabile come flusso saturo a superficie libera

Dal punto di vista matematico, l'avanzamento del fronte può essere descritto mediante un bilancio di massa dell'umidità che porta all'equazione differenziale:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{K}{h}$$

Dove:

- ***h(t)*** [m] è l'altezza raggiunta dal fronte di umidità nel tempo
- ***K*** [m^2/s] è una costante che dipende dall'assorbimento capillare ***S*** ($m/s^{1/2}$) e dal contenuto d'acqua per unità di volume ***θ*** nella zona imbibita, secondo:

$$K = \frac{S^2}{2\theta}$$

Integrando questa equazione si ottiene la ***legge di imbibizione***:

$$h(t) = \frac{S}{\theta}\sqrt{t}$$

che mostra che l'altezza di risalita capillare cresce nel tempo secondo la proporzione:

$$h(t) \propto \sqrt{t}$$

dove:

- ***S*** [$m/s^{1/2}$] è l'assorbimento capillare, cioè la capacità del materiale di assorbire acqua per effetto capillare
- ***t*** [s] è il tempo
- ***h(t)*** [m] è l'altezza del fronte nel tempo

Sebbene il ***potenziale capillare efficace f*** non compaia esplicitamente nell'equazione finale, esso è implicito nella definizione di assorbimento capillare. Infatti, S è un parametro integrato che dipende anche dal profilo di ***ψ*** e quindi dal valore di ***f***, assunto costante per un dato materiale e tipo di liquido [Hall (2009)].

Il vantaggio principale della teoria del fronte netto risiede nella possibilità di ottenere

soluzioni analitiche semplici, evitando l'impiego di tecniche numeriche complesse. Questa teoria costituisce oggi una solida base teorica per l'analisi dei fenomeni di risalita capillare nelle murature ed è alla base di modelli applicativi consolidati, come il modello di Hall-Hoff.

TECNICHE CONTRO LA RISALITA CAPILLARE

4

4.1 Scelta e progettazione degli interventi

4.2 Strategie storiche contro l'umidità da risalita capillare

4.3 Interventi che limitano o bloccano il flusso d'acqua in ingresso

4.4 Interventi evaporativi

4.5 Interventi elettrofisici

4.6 Interventi palliativi di mitigazione

4.1

SCELTA E PROGETTAZIONE DEGLI INTERVENTI

4.1 Scelta e progettazione degli interventi

4.1.1 Criticità metodologiche

Il trattamento dell'umidità da risalita capillare rappresenta una delle sfide più complesse e dibattute nell'ambito della conservazione del patrimonio architettonico [Agyekum (2016); Delgado (2016); Koca (2024); Lubelli (2018); Vanhellemont (2018)]. La difficoltà deriva sia dalla molteplicità dei contesti in cui il fenomeno si manifesta, sia dall'impossibilità di definire modelli predittivi univoci capaci di descrivere in modo esaustivo i processi termoigrometrici e chimico-fisici che lo governano. L'interazione tra variabili ambientali, morfologiche, geotecniche e costruttive, spesso non direttamente misurabili, impedisce l'adozione di soluzioni standardizzate e richiede interventi progettati su misura, fondati su un'attenta valutazione dei parametri tecnici, ambientali e culturali che caratterizzano ciascun manufatto.

Tradizionalmente, l'umidità di risalita è stata trattata come un problema di natura strutturale, con l'impiego di soluzioni invasive quali tagli orizzontali o iniezioni chimiche nelle murature [Aiello (2022); Fragata (2016); Lopez-Arce (2009)]. Sebbene diffuse, tali tecniche presentano limiti significativi: comportano costi elevati, necessitano di manutenzioni periodiche e, nei beni soggetti a vincoli conservativi, possono compromettere l'integrità materica e l'identità storica dell'edificio. Nei contesti di elevato valore storico-artistico, l'invasività ne limita fortemente l'applicabilità e può causare danni irreversibili [Aiello (2022); Castelluccio, Vitiello (2016); Desarnaud (2021); Riminesi (2018)].

Negli ultimi anni si sono sviluppati approcci meno invasivi, come i sistemi elettrofisici, che mostrano potenzialità interessanti ma richiedono una valutazione rigorosa in termini di efficacia e durabilità [Desarnaud (2021); Guolo (2024); Riminesi (2018); Stastny (2021)]. L'adozione di tali soluzioni deve essere accompagnata da interventi complementari volti a ridurre il contatto tra murature e acqua, come la correzione delle pendenze del terreno, òa realizzazione di sistemi di drenaggio, intercapedini o pozzi assorbenti.

Il fine ultimo di un intervento di deumidificazione non è soltanto eliminare l'umidità visibile, ma ripristinare l'equilibrio igroscopico del sistema murario, garantendo traspirabilità, resistenza alla cristallizzazione dei sali, mantenimento delle prestazioni termoigrometriche e compatibilità chimico-fisica con il substrato. Ciò implica l'adozione di strategie in grado di interrompere o limitare la risalita capillare, favorire l'evaporazione dell'umidità residua e rispondere a criteri di sostenibilità e reversibilità. In questo contesto, la sostenibilità non riguarda solo il basso impatto ambientale dei materiali, ma anche la riduzione dei cicli manutentivi, il contenimento dei costi energetici e la minimizzazione delle interferenze funzionali nell'uso dell'edificio.

L'efficacia di qualsiasi trattamento è strettamente legata alla corretta tempistica. Intervenire su murature in fase di imbibizione attiva, o senza un'adeguata diagnosi preliminare e coordinamento con le condizioni termoigrometriche stagionali, può produrre effetti indesiderati come migrazione di sali, formazione di sub-efflorescenze o inversione dei flussi igroscopici. Pertanto, la scelta della tecnica più idonea deve derivare da una valutazione integrata di molteplici fattori [EMERISDA (2014); Koca (2024); Lombardi (2005); Lopez-Arce (2009); Lubelli (2018); Stastny (2021)]: tipologia, geometria e composizione della muratura, grado di saturazione, natura e distribuzione dei sali, condizioni ambientali locali, qualità della ventilazione [Aiello (2022); Vitiello, Castelluccio (2019)], presenza di pressione idrostatica, caratteristiche del terreno, valore storico e vincoli di tutela, accessibilità e interferenze d'uso, oltre alla fattibilità tecnico-economica

complessiva. Questi elementi costituiscono una griglia decisionale flessibile, il cui peso relativo varia secondo il contesto, e richiedono un approccio multidisciplinare che integri competenze ingegneristiche, storico-critiche e ambientali.

Un aspetto spesso trascurato è la gestione ambientale post-intervento. Mantenere un'adeguata ventilazione, controllare l'umidità relativa interna e bilanciare le pressioni igrometriche sono condizioni indispensabili per preservare nel tempo i risultati ottenuti [Vitiello, Castelluccio (2019)]. Il trattamento dell'umidità da risalita capillare non rappresenta mai un'azione isolata, ma costituisce la base indispensabile per ogni successivo intervento conservativo, dalla pulitura al consolidamento, fino alla protezione delle superfici. Una gestione coordinata e sequenziale delle operazioni rappresenta una delle chiavi del successo nella conservazione preventiva e programmata, garantendo durabilità e sostenibilità all'intero processo di restauro. [Ricca, Greca (2023); Riminesi (2018); Vanhellemont (2018)]

Nonostante la varietà di tecniche oggi disponibili, il panorama degli interventi contro l'umidità da risalita capillare è ancora caratterizzato da una forte eterogeneità applicativa, carenza di standard validati e documentazione scientifica frammentaria [Agyekum (2016); Desarnaud (2021); EMERISDA (2014); Lombardi (2005); Lubelli (2018); Sardella (2018); Seidu (2019)].

Una delle principali difficoltà consiste nell'assenza di *benchmark* scientifici condivisi, ossia di parametri tecnici universalmente riconosciuti per confrontare in modo oggettivo efficacia e durabilità delle diverse tecniche. Inoltre, molte soluzioni vengono diffuse attraverso documentazione tecnico-commerciale priva di studi indipendenti e basata su protocolli sperimentali non trasparenti né replicabili [EMERISDA (2014); Guolo (2024); Stastny (2021)]. Ne deriva un'elevata discontinuità tra prassi di cantiere, aspettative del committente e risultati effettivi nel medio-lungo periodo.

La letteratura scientifica, inoltre, si concentra prevalentemente su test di laboratorio difficilmente trasferibili alla pratica, specie nel caso di edifici storici o in condizioni di cantiere non controllabili. Le difficoltà nella valutazione comparativa dei diversi studi derivano da [Guolo (2024); Lombardi (2005); Lubelli (2018); Sardella (2018); Stastny (2021)]:

- Assenza di protocolli sperimentali replicabili, ovvero di metodologie standardizzate e trasparenti per la verifica dell'efficacia *in situ*
- Disomogeneità dei materiali impiegati nei provini di laboratorio, spesso non rappresentativi delle reali stratigrafie murarie: si utilizzano campioni di dimensioni ridotte, con grado di saturazione artificiale, materiali omogenei, talvolta saturati con sola acqua anziché con soluzioni saline
- Estrema variabilità delle murature reali in termini di composizione, stratificazione, tecniche costruttive e condizioni climatiche locali, che impedisce l'estrapolazione dei risultati da un contesto
- Scarsa documentazione su monitoraggi estesi nel tempo, soprattutto in edifici storici o su murature complesse
- Diffuso impiego di trattamenti combinati (es. iniezioni chimiche + intonaci deumidificanti o barriere fisiche + ventilazione), che rende difficile isolare il contributo specifico di ciascun metodo
- Brevità delle fasi di osservazione post-intervento, spesso limitate a pochi mesi, e assenza di veri e propri programmi *follow-up*, ovvero di controlli successivi per valutare la stabilità dei risultati nel tempo e l'evoluzione igrometrica delle murature

A ciò si aggiunge la quasi totale mancanza di tracciabilità nei contesti non vincolati, dove spesso non viene redatta documentazione tecnica sufficiente sugli interventi eseguiti, né conservati dati su materiali impiegati o sugli effetti ottenuti nel tempo.

Dal punto di vista normativo e sperimentale, il panorama europeo relativo alla validazione tecnico-scientifica dei trattamenti contro

l'umidità da risalita capillare è caratterizzato da una notevole disomogeneità. Non esiste attualmente un protocollo internazionale unificato e condiviso che disciplini in modo sistemico la verifica dell'efficacia delle tecnologie di deumidificazione, né a livello di laboratorio né di cantiere.

Tuttavia, alcuni enti tecnico-scientifici di riferimento hanno elaborato linee guida, metodi di prova e raccomandazioni tecniche (anche se su specifiche tematiche o tecniche di deumidificazione) che rappresentano strumenti consolidati a livello nazionale. Tra i principali si annoverano:

- Il BRE (*Building Research Establishment*) nel Regno Unito, autore del BRE Digest 245, pubblicato nel 1997, che costituisce uno dei pochi documenti tecnici ufficiali sul trattamento dell'umidità di risalita capillare. Il documento fornisce indicazioni operative, con un particolare orientamento all'utilizzo di barriere fisiche come soluzione efficace e duratura; [Complete Preservation (2020); PCA (2017); Safeguard Europe (2007); Safeguard Europe (2016); Seidu (2019)]
- Il WTA (*Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege*) in Germania, che ha sviluppato veri e propri Merkblätter (fascicoli tecnici), considerati protocolli applicativi di riferimento per il risanamento murario. Tra questi, il WTA 4-4-04/D si concentra sull'iniezione di prodotti idrofobizzanti, fornendo specifiche tecniche per materiali, applicazione e verifica dell'efficacia; [ANIT (2021); Korber (2018); Lubelli (2018); Monczynski (2019)]
- Il BBA (*British Board of Agrément*) nel Regno Unito, che emette *Agrément Certificates*, certificazioni volontarie che includono prove di laboratorio, criteri di posa in opera e valutazioni di durabilità per i materiali impiegati nel trattamento dell'umidità; [BBA; BBA (2010)]
- Il TNO (*Netherlands Organisation for Applied Scientific Research*) nei Paesi Bassi e il BBRI (*Belgian Building Research Institute*) in Belgio, che pur non redigendo protocolli normativi in senso stretto, hanno svolto numerose sperimentazioni nel campo dell'ingegneria dei materiali da costruzione e della fisica dell'umidità, contribuendo alla definizione di buone pratiche nel settore. [EMERISDA (2014); Lubelli (2018); TNO]

Nonostante la loro utilità, questi riferimenti differiscono sensibilmente nei criteri di prova: variano le dimensioni dei provini, il grado di saturazione iniziale (con acqua o con soluzioni saline), i materiali costitutivi utilizzati, le tecniche di misurazione, i tempi di osservazione e le soglie considerate significative per valutare l'efficacia dei trattamenti. Questa eterogeneità metodologica compromette la possibilità di confronto diretto tra studi e risultati e rende difficile l'elaborazione di *benckmark* tecnici condivisi.

In Italia, non esiste ad oggi un protocollo ufficiale unificato con valenza normativa nazionale che disciplini in maniera sistematica la valutazione dell'efficacia delle tecnologie contro l'umidità da risalita capillare [Lombardi (2005)]. Alcuni riferimenti tecnici si trovano:

- In ambito UNI (Ente Italiano di Normazione), ad esempio nella UNI EN 16322:2013 (*Conservation of Cultural Heritage - Test methods - Determination of drying properties*) sulla valutazione delle condizioni di umidità nei materiali da costruzione porosi, in particolare per la conservazione dei beni culturali;
- Nella Raccomandazione NORMAL 20/85 (Conservazione dei Materiali Lapidei: Manutenzione Ordinaria e Straordinaria), che definisce i metodi di misura del contenuto d'acqua nelle murature storiche e nei materiali edilizi tradizionali
- In linee guida regionali o capitolati tecnici locali, spesso redatti a livello di singoli enti pubblici o Soprintendenze,

con valore non vincolante e spesso non aggiornati

Questi strumenti, pur rappresentando importanti risorse di riferimento, non costituiscono un corpus normativo coerente, aggiornato e condiviso a livello nazionale, né offrono criteri omogenei per la validazione delle tecnologie. Di conseguenza, la scelta dell'intervento ricade quasi esclusivamente sul progettista, il quale può essere fortemente condizionato dalle logiche commerciali dei produttori, dalla discrezionalità individuale o dall'esperienza empirica personale e dalla scarsa disponibilità di dati indipendenti, soprattutto in relazione a casi studio su edifici storici o in murature complesse.

In parallelo, accanto alle tecniche convenzionali (es. barriere chimiche, taglio murario o sistemi di drenaggio), si stanno diffondendo metodi non convenzionali, tra cui i dispositivi elettrofisici o a campo elettromagnetico. Sebbene presentino il vantaggio di essere non invasivi e potenzialmente più compatibili con edifici storici, questi metodi sollevano dubbi significativi per quanto riguarda la validità teorica e l'affidabilità empirica. Spesso basati su principi fisici non completamente chiariti, sono difficilmente replicabili, scarsamente documentati da studi indipendenti,e richiedono protocolli di validazione avanzati (es. misurazioni termoigrometriche, mineralogiche, diagnostica non distruttiva) per poter essere valutati in modo rigoroso.

Un'altra criticità spesso trascurata è legata alla tempistica dell'intervento. A questo punto la distinzione tra umidità attiva (presenza continua di risalita capillare) e umidità residua (acqua intrappolata dopo l'interruzione del flusso capillare) è fondamentale. Applicare un trattamento pensato per murature stabilizzate a una struttura ancora in fase di imbibizione capillare attiva può rivelarsi inefficace o dannoso. Allo stesso modo, l'assenza di un monitoraggio pre intervento impedisce una corretta diagnosi e l'assenza di un monitoraggio post-intervento preclude qualsiasi valutazione della durabilità e della reale efficacia nel lungo periodo.

Questa condizione di incertezza metodologica coinvolge tutti gli attori del processo di risanamento, esponendo il patrimonio a interventi non scientificamente fondati, con rischi di inefficacia e incompatibilità con le strutture originali.

In un ambito delicato come la conservazione del patrimonio culturale, ogni intervento deve fondarsi sui principi di conservazione preventiva, compatibilità, reversibilità e sostenibilità. è dunque necessaria un'azione coordinata su più livelli:

- Sviluppo di protocolli sperimentali condivisi per la verifica in situ e in laboratorio dell'efficacia e della durabilità degli interventi
- Promozione di studi indipendenti e comparativi su casi studio reali e rappresentativi, con documentazione completa e accessibile
- Istituzione di standard di collaudo armonizzati a livello internazionale, basati su criteri misurabili e replicabili
- Diffusione di buone pratiche attraverso banche dati pubbliche, linee guida operative e programmi di formazione tecnica specialistica

Il presente lavoro intende offrire un contributo critico in questa direzione, attraverso una rassegna analitica delle tecniche oggi disponibili per il trattamento dell'umidità da risalita capillare, valutandone principi di funzionamento, applicabilità, vantaggi e limiti, con l'obiettivo di fornire una base operativa solida per scelte tecniche consapevoli e scientificamente fondate.

4.1.2 Classificazione delle tecniche d'intervento

La molteplicità delle tecniche attualmente disponibili per il trattamento dell'umidità da risalita capillare riflette la complessità del fenomeno e la varietà dei contesti applicativi in cui esso si manifesta. In assenza di un sistema normativo unitario e di protocolli di valutazione condivisi, si rende quindi indispensabile proporre una griglia classificatoria che, pur mantenendo la necessaria flessibilità, consenta di distinguere in modo chiaro le strategie d'intervento sulla

base del principio funzionale, dell'azione tecnica e del livello di compatibilità conservativa.

La classificazione delle tecniche d'intervento rappresenta uno strumento strategico per orientare scelte efficaci, coerenti e trasparenti. Un'adeguata organizzazione consente infatti di confrontare e selezionare metodi in funzione delle specifiche caratteristiche del problema, valutare l'impatto materiale ed estetico sul patrimonio architettonico, definire criteri decisionali replicabili ed evitare l'adozione di soluzioni standardizzate o commerciali inadeguate. Inoltre, tale approccio facilita l'integrazione di metodologie compatibili e complementari in una logica conservativa preventiva e multidisciplinare.

Nella letteratura scientifica sono stati proposti diversi criteri di classificazione, ognuno con vantaggi e limiti. Uno dei più diffusi ordina gli interventi in base al principio tecnico-funzionale, associando la logica d'azione (meccanismo fisico, chimico o energetico attivato) alla finalità conservativa (trattamento della causa o del sintomo). Rientrano, ad esempio, le tecniche che mirano a bloccare o limitare il flusso d'acqua in ingresso (barriere fisiche o chimiche), quelle che favoriscono l'evaporazione (sistemi ventilati, intonaci macroporosi), quelle che sfruttano fenomeni elettrofisici [Delgado (2016); Franzoni (2014); Franzoni (2018); Guolo (2024); Koca (2024); Lombardi (2005); Sardella (2021); Stastny (2021); Torres (2018)].

All'interno di questa logica, la letteratura e la prassi tecnico-commerciale comprendono talvolta anche interventi che non eliminano la causa del problema, ma si limitano a mascherarne i sintomi [Lubelli (2018); Sardella (2021)]. Sebbene tali soluzioni non possano essere considerate veri metodi di deumidificazione, sono comunque utilizzate (talvolta impropriamente) come risposta al problema e, per questo, vengono incluse nella presente classificazione con un'esplicita avvertenza sul loro carattere palliativo e sui possibili effetti collaterali a lungo termine.

Il criterio tecnico-funzionale risulta chiaro e ampiamente adottato, poiché mette in relazione il fenomeno fisico con la risposta progettuale. Tuttavia, se applicato isolatamente, non considera aspetti essenziali come invasività o compatibilità. Analogamente, il criterio basato sul grado di invasività, che distingue tra tecniche invasive, minimamente invasive e non invasive, è utile per salvaguardare l'autenticità dell'edificio, ma non descrive l'efficacia dell'intervento. Un ulteriore approccio, centrato sulle modalità di attivazione della deumidificazione, distingue sistemi passivi (drenaggi, intonaci macroporosi) che funzionano senza apporto energetico o meccanico, sistemi attivi (elettrosmosi) e sistemi ibridi che combinano entrambe le logiche.

Tutte queste classificazioni, considerate separatamente, risultano però monodimensionali e non restituiscono una visione integrata del problema. Poiché in questo ambito la compatibilità materiale, la reversibilità, la durabilità e l'impatto estetico sono fattori centrali, ogni intervento va valutato simultaneamente secondo più parametri.

Per rispondere a tale esigenza, il presente lavoro propone una classificazione multidimensionale articolata su tre dimensioni fondamentali:

- Dimensione tecnico-funzionale: suddivisione delle diverse soluzioni in macro-categorie basate sul principio funzionale, riprendendo e aggiornando la tassonomia proposta da Franzoni (2014) e distinguendo gli interventi che agiscono sulle cause da quelli che trattano i sintomi, consentendo di identificare eventuali sinergie o approcci integrati:
  - Interventi che limitano o bloccano il flusso d'acqua in ingresso
  - Interventi evaporativi
  - Interventi elettrofisici
  - Interventi palliativi di mitigazione
- Dimensione conservativa: ordina le tecniche in base alla loro invasività, privilegiando approcci compatibili con la conservazione del patrimonio architettonico
- Dimensione operativa: definisce vantaggi e limiti di ciascun intervento focalizzandosi sugli aspetti pratici legati all'efficacia, alla sostenibilità e

alla fattibilità dell'intervento

Questa griglia consente di leggere in modo organico le tecnologie esistenti e di supportare una selezione progettuale fondata su criteri scientificamente documentati e sostenibili sul piano conservativo. L'impostazione proposta è inoltre aperta ad aggiornamenti, consentendo di integrare nuove tecnologie e mantenere un approccio dinamico, in linea con gli orientamenti più recenti della conservazione preventiva.

4.2

STRATEGIE STORICHE CONTRO L'UMIDITÀ DA RISALITA CAPILLARE

4.2 Strategie storiche contro l'umidità da risalita capillare

Ancor prima che i meccanismi della risalita capillare venissero compresi a livello teorico, i costruttori antichi avevano già sviluppato strategie empiriche per fronteggiarne gli effetti. Le tecniche impiegate nell'edilizia storica e monumentale riflettono una profonda conoscenza delle interazioni tra materiali da costruzione, acqua e ambiente, maturata attraverso l'osservazione diretta e l'adattamento alle condizioni locali.

Una delle strategie preventive più diffuse consisteva nell'impiego, nella zona basamentale dell'edificio, di materiali a bassa porosità per contenere l'umidità nei livelli inferiori [Vitiello, Castelluccio (2019); EMERISDA (2014); Falchi (2024); Lopez-Arce (2009)]. In molti edifici storici, in particolare quelli di pregio, si adottavano zoccolature realizzate in pietra compatta o in laterizi cotti ad alte temperature, che grazie alla minore porosità ed alla parziale vetrificazione superficiale risultavano meno permeabili all'acqua [EMERISDA (2014); Lopez-Arce (2009); Falchi (2024)]. Tali materiali venivano spesso associati a malte a base di calce idraulica naturale, traspiranti e capaci di regolare in modo equilibrato l'umidità interna della muratura [Lopez-Arce (2009)].

Un esempio emblematico di approccio integrato alla gestione dell'umidità si osserva nella città di Venezia. Le fondazioni degli edifici monumentali venivano realizzate su pali lignei infissi nel substrato lagunare, sormontati da blocchi di pietra d'Istria, un calcare compatto e poco poroso particolarmente resistente agli agenti atmosferici e all'azione corrosiva dei sali solubili [EMERISDA (2014); Falchi (2024); Lopez-Arce (2009)]. Le porzioni basamentali delle murature erano costruite con blocchi della stessa pietra o con brustoloni, ovvero laterizi sovracotti e parzialmente vetrificati, caratterizzati da elevata resistenza all'assorbimento capillare e all'azione disgregante dei sali. Questa scelta rispondeva a una logica funzionale ben precisa: contenere la trasmissione dell'umidità verso i piani superiori e, al contempo, proteggere la struttura dagli effetti aggressivi dei sali.

Oltre alla selezione dei materiali, un ruolo fondamentale nella gestione dell'umidità da risalita capillare era ricoperto dalla manutenzione periodica, considerata parte integrante della strategia costruttiva. In particolare, le tecniche di cuci e scuci venivano impiegate per la sostituzione localizzata degli elementi murari danneggiati, garantendo la continuità strutturale e funzionale delle murature originarie. Questi interventi erano frequentemente associati alla riapplicazione di intonaci protettivi o rivestimenti superficiali, i quali non avevano solo una valenza estetica, ma svolgevano anche una funzione di regolazione igrometrica e protezione meccanica, contribuendo alla resilienza dell'edificio rispetto all'umidità.

Nei contesti caratterizzati da condizioni ambientali particolarmente aggressive, come quelli esposti a fluttuazioni del livello dell'acqua, inondazioni o in prossimità di aree paludose, si ricorreva a misure infrastrutturali e urbanistiche più articolate [Falchi (2024)]. A Venezia è ben documentato l'uso di strategie come l'innalzamento dei livelli di calpestio, la costruzione di murazzi e, in epoca recente, il sistema MOSE. Tuttavia, approcci simili vennero adottati, seppur con varianti locali, anche in altri contesti europei. Ad esempio, nelle città olandesi come Dordrecht o Rotterdam, le risposte all'umidità e alle inondazioni includevano il rialzo sistematico delle strade e delle fondazioni, oltre a sistemi di drenaggio controllato e barriere mobili lungo i fiumi. Nelle Fiandre belghe e nelle città dell'Europa centrale, si procedeva invece con il consolidamento degli argini, la creazione di zone tampone o "polder" e il controllo delle falde attraverso regolazioni idrauliche più complesse.

Anche in Italia si diffusero interventi sistemici, specie nelle aree soggette a esondazioni o con forte presenza di acque superficiali. A partire dal periodo rinascimentale e poi con maggiore sistematicità in età moderna, si realizzarono bonifiche idrauliche, innalzamenti degli argini fluviali, regolazioni del reticolo di fossi e canali, e protezioni per gli insediamenti storici. Interventi emblematici sono, ad esempio, le opere di bonifica pontificia nell'Agro Romano e quelle medicee nella Maremma toscana, dove l'obiettivo era non solo sanitario ed economico, ma anche edilizio-conservativo, prevenendo fenomeni di imbibizione persistente nei centri abitati.

Queste soluzioni testimoniano un'evoluzione dell'approccio da edilizio-localizzato a sistemico-ambientale, in cui il controllo dell'umidità non era più affidato solo a scelte materiche o costruttive, ma veniva integrato in una più ampia gestione del territorio e delle sue dinamiche idrologiche. Tale transizione, seppur storicamente graduale, anticipa molti principi oggi riconosciuti nella conservazione preventiva e nella resilienza urbana ai cambiamenti climatici.

Tra le soluzioni tecniche più ingegnose si annoverano anche i sistemi di controllo microclimatico murario. Sifoni atmosferici, intercapedini ventilate alla base della muratura o l'utilizzo di intonaci e strati sacrificali rappresentavano tentativi di incentivare la traspirazione muraria e favorire l'evaporazione dell'umidità interna [Falchi (2024)], in assenza di una formalizzazione scientifica ma con efficace logica funzionale.

Il concetto di barriera fisica orizzontale impermeabile, oggi conosciuta come *damp-proof course* (DPC), era in alcuni casi anticipato mediante l'inserimento di materiali impermeabili come ardesia, vetro, legni duri resiniferi (quercia, castagno, larice), o blocchi di scorie metalliche [Kportufe (2015)]. Questi ultimi, sottoprodotti della lavorazione metallurgica, venivano riutilizzati per la loro compattezza e resistenza all'acqua. In alcuni casi alla malta di allettamento venivano aggiunti additivi idrofobizzanti come stearati, catrame o sabbie bituminose, anche se tali pratiche erano rare, poco sistematizzate e spesso riservati a interventi di riparazione piuttosto che a fasi costruttive originarie.

Nel loro insieme, queste pratiche non puntavano all'eliminazione del fenomeno dell'umidità da risalita capillare, quanto piuttosto al suo contenimento, alla dispersione controllata ed alla regolazione del fenomeno. Le murature venivano progettate come sistemi aperti e traspiranti, in cui l'orientamento dell'edificio, la geometria degli spessori, l'esposizione solare e la ventilazione naturale contribuivano congiuntamente al bilancio igrometrico dell'involucro.

In conclusione, l'approccio tradizionale alla gestione dell'umidità da risalita capillare non si basava su tecnologie puntuali o barriere rigida, ma su un'articolata combinazione di scelte costruttiva, ambientali e manutentive. Questo sapere diffuso e stratificato, frutto di secoli di sperimentazione e osservazione, rappresenta un patrimonio tecnico-culturale di grande rilevanza. Il suo recupero critico può fornire spunti preziosi per l'elaborazione di strategie contemporanee più sostenibili, compatibili e coerenti con i valori storici e materiali del patrimonio costruito.

A partire dal XIX secolo, con l'affermarsi della scienza dei materiali e della fisica dell'edificio, l'umidità da risalita capillare è stata progressivamente affrontata con tecniche più specialistiche, basate su principi fisici, chimici o tecnologici più espliciti e misurabili. Nella sezione che segue, verranno analizzate in dettaglio le principali tecniche attualmente impiegate per il trattamento della risalita capillare per offrire un quadro aggiornato, analitico e comparabile, utile sia per la pratica progettuale che per la ricerca scientifica.

4.3

INTERVENTI CHE LIMITANO O BLOCCANO IL FLUSSO D'ACQUA IN INGRESSO

4.3 Interventi che limitano o bloccano il flusso d'acqua in ingresso

Tra le strategie oggi impiegate per il trattamento dell'umidità da risalita capillare, un ampio gruppo comprende gli interventi che mirano a limitare o interrompere il flusso d'acqua dal terreno alla muratura, agendo direttamente sulla continuità del percorso capillare. Si tratta di soluzioni causali o dirette, poiché affrontano il fenomeno intervenendo sulla sua causa primaria, piuttosto che sugli effetti secondari. [EMERISDA (2014); Torres (2018)]

Il principio tecnico alla base di tali interventi è la discontinuità capillare, secondo cui la risalita dell'umidità può essere bloccata o significativamente rallentata eliminando o modificando la connessione fisica tra la sorgente idrica e la muratura. Queste tecniche trovano applicazione soprattutto in contesti in cui la risalita è alimentata da falde freatiche superficiali o persistenti, e in cui la stabilizzazione igrometrica della muratura costituisce una priorità conservativa [Torres (2018)].

Sotto il profilo operativo, le soluzioni oggi disponibili si articolano in due principali categorie: interventi meccanici e interventi chimici.

4.3.1 Interventi meccanici

Gli interventi meccanici costituiscono una delle strategie più antiche e consolidate per contrastare l'umidità da risalita capillare. Essi si basano sull'interruzione fisica del percorso dell'acqua all'interno della muratura, modificandone in modo permanente la configurazione [Aiello (2022); EMERISDA (2014)].

In funzione delle modalità applicative, tali tecniche possono essere ricondotte a due principali sottotipi:

- ***Interventi di riduzione della sezione capillare attiva:*** consistono nella modifica della geometria o della composizione locale della muratura per ridurre la superficie disponibile al fenomeno della risalita capillare [Torres (2018)]. L'obiettivo è diminuire la porosità o sostituire selettivamente le porzioni più degradate, introducendo elementi non capillari o materiali più compatti e resistenti all'acqua
- ***Realizzazione di una barriera impermeabile (Damp-Proof Course, DPC):*** consiste nell'inserimento di una barriera continua che ostacola fisicamente il movimento capillare dell'acqua [Kportufe (2015); Lopez-Arce (2009); Torres (2018)]. Secondo la definizione generalmente accettata in ambito tecnico e normativo, una DPC può essere di tipo fisico o chimico [EMERISDA (2014)], ma nel contesto degli interventi meccanici si fa riferimento esclusivamente alle soluzioni fisiche. Le modalità operative possono includere il taglio controllato della muratura per l'inserimento di materiali impermeabili, oppure scavi perimetrali per la posa di membrane esterne a protezione delle fondazioni e delle murature interrate.

4.3.1.1 Cuci-Scuci

La tecnica del cuci-scuci, più propriamente detta "scuci-cuci" per indicare la sequenza operativa di rimozione (scuci) e successiva integrazione (cuci), è un intervento meccanico localizzato, tradizionalmente impiegato nel restauro per ripristinare la continuità strutturale di murature ammalorate. Essa prevede la sostituzione selettiva delle porzioni compromesse ed è applicabile a murature in laterizio, pietra o miste. [Castelluccio, Vitiello (2016); Giaretton (2016); Guolo (2024); Modena, Casarin (2009); Modena (2009); Modena, Valluzzi (2009); Musso]

Di origini antiche, questa tecnica consiste nella rimozione degli elementi degradati e nella loro sostituzione con nuovi elementi, omologhi o compatibili con gli originali, che possono tuttavia differire per forma, dimensioni, materiale o tecnica di lavorazione. Dal punto di vista operativo, la scelta di materiali meno permeabili, come laterizi sovracotti, pietre compatte o materiali idrofughi, consente di limitare la risalita capillare dell'acqua senza compromettere la traspirabilità complessiva della muratura [EMERISDA (2014); Falchi (2024)].

Infatti, nell'ambito della mitigazione dell'umidità da risalita capillare, il cuci-scuci assume anche una valenza funzionale: intervenendo sulla microstruttura porosa dell'area trattata, riduce la sezione assorbente e favorisce una più uniforme distribuzione del contenuto igrometrico [Falchi (2024); Lombardi (2005); Musso; Seidu (2019)]. In tal modo si configura come una strategia meccanica di riduzione della sezione assorbente, con un approccio causale-indiretto al problema dell'umidità da risalita capillare (Fig. 20).

4.3.1.1.1 METODO DI APPLICAZIONE

L'intervento di cuci-scuci richiede una sequenza operativa rigorosa [Musso], fondata su criteri di compatibilità strutturale e materica [Giaretton (2016); Ksinopoulou (2022); Modena, Valluzzi (2009)]. Una corretta esecuzione consente di preservare l'equilibrio igroscopico e meccanico della muratura, riducendo la sezione assorbente alla base e migliorando la durabilità dell'intervento.

Diagnosi e preparazione

Prima di ogni operazione è indispensabile una diagnosi preliminare approfondita, condotta tramite rilievi visivi, indagini diagnostiche e campionature di elementi lapidei e malte originarie per analisi fisico-meccaniche e petrografiche.

In base ai risultati si procede alla mappatura delle porzioni compromesse e alla progettazione della griglia di sostituzione, definendo posizione, dimensioni e sequenza dei moduli da rimuovere [Ksinopoulou (2022); Musso]. Contestualmente, si predispongono eventuali puntellature e opere provvisionali per garantire la stabilità locale e la sicurezza degli operatori.

Rimozione controllata

La demolizione selettiva degli elementi degradati avviene dall'alto verso il basso. L'operazione, condotta manualmente con strumenti a basso impatto, deve minimizzare le sollecitazioni sulla muratura. Si rimuovono blocchi alternati, lasciando porzioni integre tra un modulo e l'altro per evitare cavità continue e mantenere un sufficiente livello di stabilità. La configurazione modulare, generalmente eseguita secondo lo schema a scacchiera, è calibrata in funzione della tessitura muraria e dello spessore della parete; in ogni fase non dovrebbe essere rimosso simultaneamente più del 20-25% della superficie muraria. [Modena (2009)]

Pulitura e preparazione delle sedi

Completata la rimozione, si procede con la pulitura delle sedi di inserimento dei nuovi elementi, eliminando detriti e materiali incoerenti con spazzole, raschietti o aspiratori, ed eventualmente con una moderata quantità d'acqua. I giunti vengono puliti e le superfici di contatto irruvidite per favorire l'adesione con i nuovi blocchi.

Inserimento e connessioni

Si effettua dapprima una prova di inserimento "a secco" per verificare forma e compatibilità dei nuovi elementi, utilizzando zeppe o liste di legno per la messa in opera provvisoria.

La posa definitiva avviene con malte compatibili, preferibilmente a base di calce idraulica naturale o miscele traspiranti, in grado di favorire la migrazione del vapore acqueo ed evitare la formazione di pellicole impermeabili. Gli elementi vengono disposti secondo l'orientamento originario, evitando giunti passanti e garantendo un efficace ammorsamento [Modena (2009)].

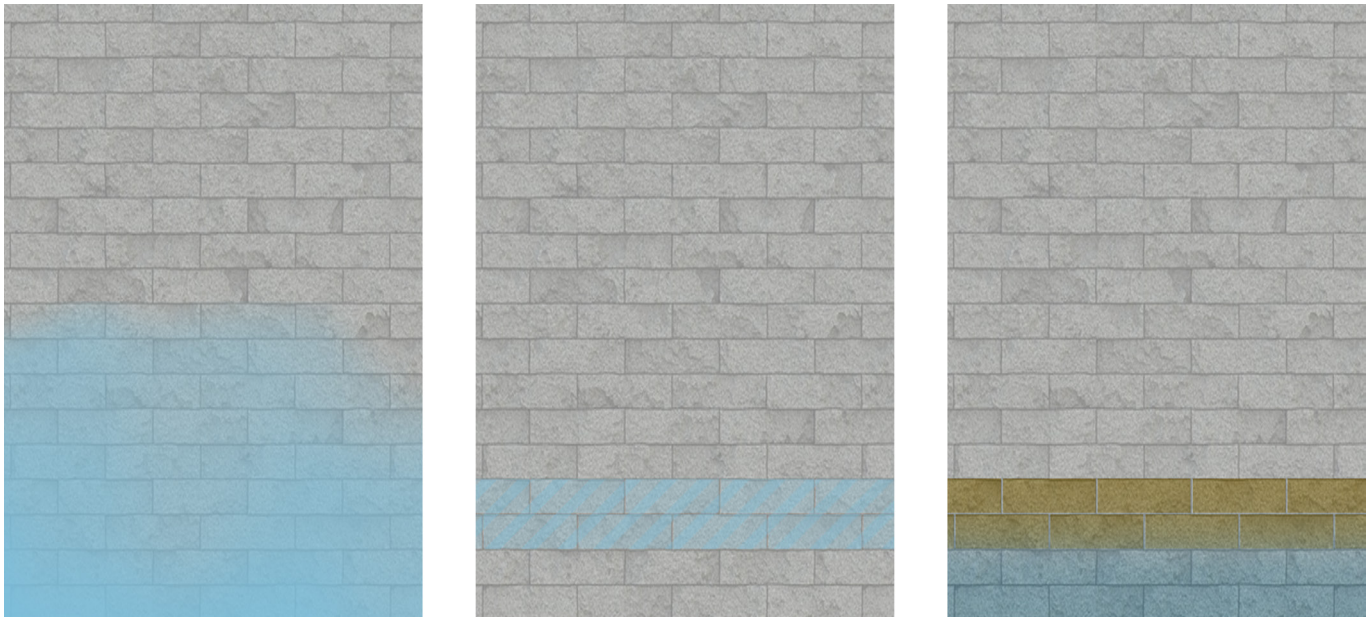


Fig. 20 | Cuci-scuci

Nei casi di murature portanti o fortemente compromesse, possono essere inseriti elementi di connessione (es. graffe metalliche, barre in materiali non reattivi o tasselli in laterizio) installati in modo reversibile e conformi ai principi della compatibilità materica [Giaretton (2016); Ksinopoulou (2022); Modena (2009)]. Se l'intervento interessa l'intero spessore della parete, si opera prima su una faccia per volta, per piccoli tratti, con il supporto di puntelli o martinetti regolabili.

Finitura e monitoraggio

La fase finale comprende la stilatura dei giunti e la finitura superficiale, per ripristinare la continuità estetica e funzionale della muratura. È raccomandabile predisporre un piano di monitoraggio igrometrico a breve e medio termine, tramite termografia, sensori o sistemi di controllo ambientale, per verificare l'efficacia dell'intervento nel contenimento dell'umidità. In contesti particolarmente esposti, si suggerisce inoltre un piano di manutenzione programmata per prevenire fenomeni di degrado ricorrente.

4.3.1.1.2 VANTAGGI

La tecnica del cuci-scuci si configura come un intervento invasivo ma compatibile con il patrimonio architettonico, grazie all'uso di materiali tradizionali e tecniche costruttive storiche. Se correttamente eseguito, consente di rispettare la tessitura muraria e l'identità formale dell'edificio, evitando alterazioni visive e strutturali significative. La sua natura modulare permette un'azione progressiva e circoscritta, facilmente monitorabile in ogni fase, così da valutare costantemente gli effetti dell'intervento e correggere eventuali criticità.

È riconosciuto dalla normativa tecnica come intervento locale, in quanto non altera la risposta globale della struttura, in accordo alla Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Un ulteriore vantaggio è rappresentato dalla parziale reversibilità: le porzioni sostituite possono essere rimosse o modificate senza alterare in modo significativo il resto della muratura.

In condizioni operative adeguate e con materiali opportunamente selezionati, la durabilità dell'intervento può risultare superiore a quella della muratura originaria, poiché gli elementi sostituiti sono generalmente più resistenti.

4.3.1.1.3 LIMITI E CRITICITÀ

Il cuci-scuci presenta limiti significativi se adottato come unica misura per il risanamento dall'umidità da risalita capillare.

In primo luogo, si tratta di un intervento di tipo effetto-centrico: modifica le caratteristiche locali della muratura, riducendo temporaneamente la velocità di imbibizione, ma non interviene sulla causa della risalita. Senza misure complementari il nuovo materiale può comunque saturarsi, rendendo il beneficio parziale e di durata limitata.

Anche se puntuale, la rimozione di porzioni di muratura comporta una perdita della stratigrafia storica e la sostituzione irreversibile di elementi originari. Tale impatto è particolarmente critico in contesti con elevato valore storico o con tessiture murarie complesse.

In paramenti eterogenei (es. muratura a sacco, *opus incertum*) o in murature di grande spessore la sostituzione modulare fatica a garantire omogeneità prestazionale, sia meccanica sia igrometrica, e aumenta il rischio di incompatibilità locali.

L'intervento richiede fasi procedurali lente e manodopera altamente specializzata. Ciò ne limita l'applicabilità in contesti con risorse o tempi ristretti.

Una scelta non appropriata dei materiali di sostituzione (porosità, comportamento igroscopico, compatibilità materico-meccanica) può generare concentrazione localizzata di umidità, stress differenziali e degrado accelerato dei materiali adiacenti, aggravando i fenomeni che si intendeva mitigare.

In conclusione, il cuci-scuci non è una soluzione risolutiva per la risalita capillare, va considerato piuttosto come misura ausiliaria o integrativa, da inserire in strategie più ampie.

4.3.1.2 Metodo di Koch

Il metodo di Koch, talvolta trascritto in modo errato come "Kock" e noto anche come "metodo edilizio" di deumidificazione , è una tecnica storica di deumidificazione edilizia impiegata per contrastare la risalita capillare nelle murature [Castelluccio, Vitiello (2016); Franzoni (2014); Franzoni (2018); Lombardi (2005); Musso].

Il suo impiego sistematico risale alla fine del XIX secolo, in particolare all'intervento realizzato da Gaetano Koch nella chiesa di San Luigi dei Francesi a Roma, dove fu applicato per proteggere un affresco di Domenichino gravemente compromesso dall'umidità (Fig. 21). L'intervento comportò la realizzazione di tre arcate e quattro plinti in selce romana, con l'obiettivo di isolare l'affresca dai muri fondali. [Massari (1969); Musso]

Il metodo si basa sulla riduzione della sezione capillare attiva alla base della muratura , con l'obiettivo di ostacolare o rallentare la risalita dell'umidità. Operativamente si ottiene asportando localmente le porzioni inferiori del paramento e inserendo, all'interno delle lacune così create, una successione di archetti o piattabande portanti. Questi elementi interrompono o restringono il percorso capillare, determinando una "strozzatura" alla base del muro che limita la quantità di acqua in grado di risalire e, allo stesso tempo, incrementa la superficie evaporante disponibile (Fig. 22).

Alla base degli archetti veniva talvolta collocato un materiale poco poroso o anticapillare con lo scopo di ostacolare ulteriormente la risalita.

4.3.1.2.1 METODO DI APPLICAZIONE

L'applicazione del metodo di Koch si articola in tre fasi operative distinte [Lombardi (2005); Musso], da eseguire generalmente a una quota di circa 1,5 m al di sotto della porzione di parete da risanare.

Preparazione delle basi d'imposta

Mediante demolizioni localizzate si realizzano plinti di appoggio, costituiti da materiali a bassa permeabilità e compatibili con la muratura esistente, che fungeranno da fondazione per gli

archetti o le piattabande.

Questa fase richiede particolare cautela: la porzione muraria residua deve garantire una superficie di appoggio adeguata e la stabilità locale. Quando necessario, si adotta la tecnica del "cuci-scuci" per sostituire selettivamente i materiali più vulnerabili con elementi maggiormente idonei dal punto di vista meccanico e igrometrico, assicurando al contempo il preconsolidamento dei maschi murari e la predisposizione di puntellature o rinforzi temporanei.

Realizzazione degli archetti o delle piattabande

All'interno delle lacune predisposte, sempre mediante la tecnica del "cuci-scuci", si costruiscono piccoli archi portanti all'interno delle porzioni demolite. Gli archetti sono progettati per scaricare i carichi verticali su punti localizzati, riducendo così la superficie continua di contatto tra la muratura e il terreno.

In alternativa agli archi, la separazione può essere ottenuta con piattabande in ferro o in calcestruzzo armato, appoggiate su pilastri ricavati dalla muratura esistente.

L'intervento su pareti molto spesse o su maschi murari viene eseguito faccia per faccia per garantire il corretto trasferimento dei carichi e la continuità strutturale; ove necessario, gli appoggi vengono consolidati con incamiciature o rinforzi in calcestruzzo armato.

Rimozione definitiva della muratura e finiture

Completati gli archetti o le piattabande e verificata la stabilità degli appoggi, si provvede alla rimozione definitiva della porzione di muratura sottostante. Gli archetti possono essere rifiniti con intonaco macroporoso per favorire l'evaporazione dell'umidità residua.

4.3.1.2.2 VANTAGGI

Dal punto di vista teorico, il metodo di Koch affronta la risalita capillare agendo direttamente sulla sua causa fisica, ovvero la superficie di assorbimento.

La riduzione della sezione assorbente, insieme

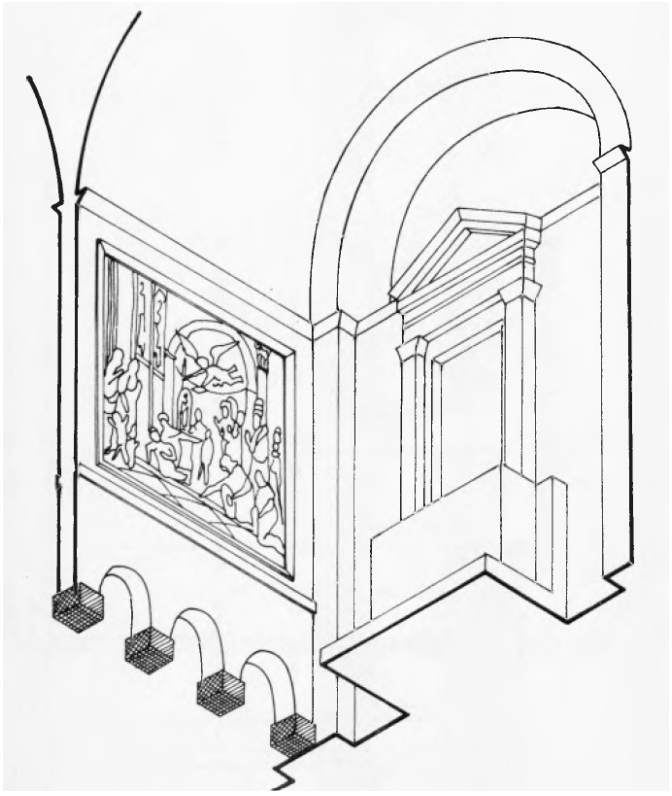


Fig. 21 | Intervento con metodo di Koch nella Chiesa di S. Luigi dei Francesi, Roma [Fonte: Massari, G. (1969). L'umidità nei monumenti. Rome Centre]

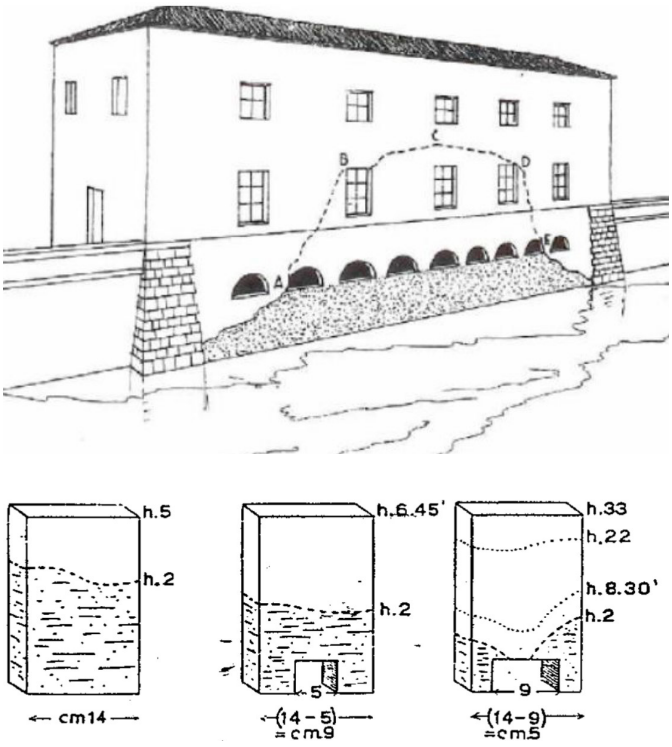


Fig. 22 | Intervento con metodo di Koch nella Chiesa di S. Luigi dei Francesi, Roma [Fonte: G. Massari and I. Massari, Risanamento igienico dei locali umidi, 5° edizione. HOEPLI, 1985]

all'inserimento di materiali anticapillari e all'aumento della superficie evaporante producono dei vantaggi teorici nel bilancio idrico della muratura, creando condizioni più favorevoli per interventi complementari di controllo igrometrico.

4.3.1.3 LIMITI E CRITICITÀ

Il metodo di Koch presenta limiti rilevanti che ne condizionano fortemente l'applicabilità nel contesto contemporaneo.

L'intervento è estremamente invasivo e comporta modifiche significative della struttura portante alla base delle murature [Lombardi (2005); Musso]. La riduzione della superficie resistente genera concentrazioni di sforzo nei maschi murari residui, che richiedono preconsolidamento per evitare deformazioni o cedimenti. Il rischio è particolarmente elevato in zone sismiche o in edifici sottoposti a sollecitazioni dinamiche, poiché l'introduzione di nuove arcate può indurre spinte orizzontali e variazioni nel trasferimento dei carichi.

Dal punto di vista operativo, la tecnica è estremamente complessa, richiede tempi lunghi e ha costi elevati [Lombardi (2005)]. La difficoltà cresce con lo spessore e la compattezza della muratura e con la discontinuità della tessitura muraria. In presenza di paramenti irregolari, lesionati o di particolare fragilità, l'esecuzione risulta spesso impraticabile.

Su pareti decorate, affrescate o di valore storico-artistico l'intervento compromette l'integrità materica e formale: la modifica geometrica è irreversibile e determina una perdita significativa di stratigrafia costruttiva e di valore storico.

Sebbene il metodo rallenti, in un primo momento, la velocità di risalita capillare, evidenze sperimentali e pratiche mostrano che, a lungo termine, la muratura tende a raggiungere livelli di saturazione analoghi a quelli preesistenti. Ne deriva che l'effetto è temporaneo.

4.3.1.3 Impermeabilizzazione Delle Strutture Controterra

L'impermeabilizzazione delle strutture e delle superfici controterra costituisce una misura preventiva e protettiva fondamentale per il controllo dell'umidità di risalita e delle infiltrazioni. [Lombardi (2005); Musso]

Il sistema si basa sulla realizzazione di una barriera fisica continua che impedisca il contatto diretto tra terreno e muratura, interrompendo i percorsi di ingresso dell'acqua (Fig. 23). Si tratta di un sistema passivo che oltre a ostacolare la risalita capillare, intercetta e devia anche le acque meteoriche. Inoltre, dove necessario, il sistema può essere dimensionato per resistere a pressioni idrostatiche importanti (es. presenza di falde o terreni fortemente imbibiti).

Sebbene la tecnica trovi oggi largo impiego anche in ambito conservativo, la sua applicazione è tipica delle nuove costruzioni, dove l'impermeabilizzazione è integrata in fase progettuale [Vitiello, Castelluccio (2019)].

4.3.1.3.1 METODO DI APPLICAZIONE

La progettazione dell'impermeabilizzazione controterra deve essere preceduta da un'analisi geotecnica, ambientale e strutturale del sito e da una valutazione dello stato di degrado della tessitura muraria: le superfici controterra sono spesso costituite da materiali porosi ed eterogenei che richiedono preparazioni specifiche del supporto prima della posa dell'impermeabilizzazione.

Scavo

Operativamente, l'intervento inizia con lo scavo perimetrale esterno alla base delle fondazioni, da eseguire per tratti successivi, al fine di non compromettere la stabilità strutturale dell'edificio e limitare i rischi di cedimenti o frane del terreno [Gebbia (2015); Lombardi (2005); Musso]. La profondità deve raggiungere l'estradosso delle fondazioni, mantenendo una distanza di sicurezza adeguata dalla muratura. Nei casi di fondazioni discontinue (es. plinti isolati) o in contesti storici particolari, la fattibilità va valutata caso per caso,

predisponendo supporti strutturali temporanei.

Preparazione del supporto e posa

Una volta eseguito lo scavo, la superficie muraria deve essere pulita, regolarizzata e, se necessario, livellata con un intonaco di preparazione compatibile. Su questa superficie si applica il sistema impermeabilizzante scelto. La continuità dell'impermeabilizzazione, l'aderenza al supporto e la corretta sovrapposizione delle giunzioni e dei punti critici sono essenziali per l'efficacia dell'intervento [Lombardi (2005)].

Principali soluzioni tecniche

- ***Membrane bituminose:*** applicate in più mani con spazzole, rullo o spruzzo. Dopo l'indurimento la membrana viene protetta con pannelli in polietilene ad alta resistenza, in vista del reinterro. Per non compromettere la qualità della posa occorre evitare l'applicazione della membrana con temperature < 5°C [Musso]
- ***Pannelli in bentonite sodica:*** pannelli preassemblati costituiti da uno strato di bentonite sodica (argilla) che, a contatto con l'acqua, si gonfiano formando una barriera impermeabile. Richiedono reinterro immediato dopo la posa o una protezione temporanea con teli per evitare un'attivazione prematura [Musso]
- Pannelli drenanti: i pannelli vengono ancorati direttamente alla muratura e combinati con un tubo drenante alla base. Questi pannelli convogliano l'acqua verso il tubo di raccolta, riducendo la pressione idrostatica sulla barriera. Una variante di questa tipologia è rappresentata dai pannelli "sandwich" drenanti, composti da due strati di TNT termosaldati con interposto un nucleo tridimensionale drenante [Musso].

Reinterro, pendenze e finiture superficiali

Il riempimento va eseguito con materiali adeguati e compattati per evitare assestamenti. La quota superiore dello scavo deve essere protetta con cordoli o marciapiedi impermeabili con una pendenza negativa verso l'esterno, in modo da deviare le acque superficiali lontano dalle fondazioni [Lombardi (2005)].

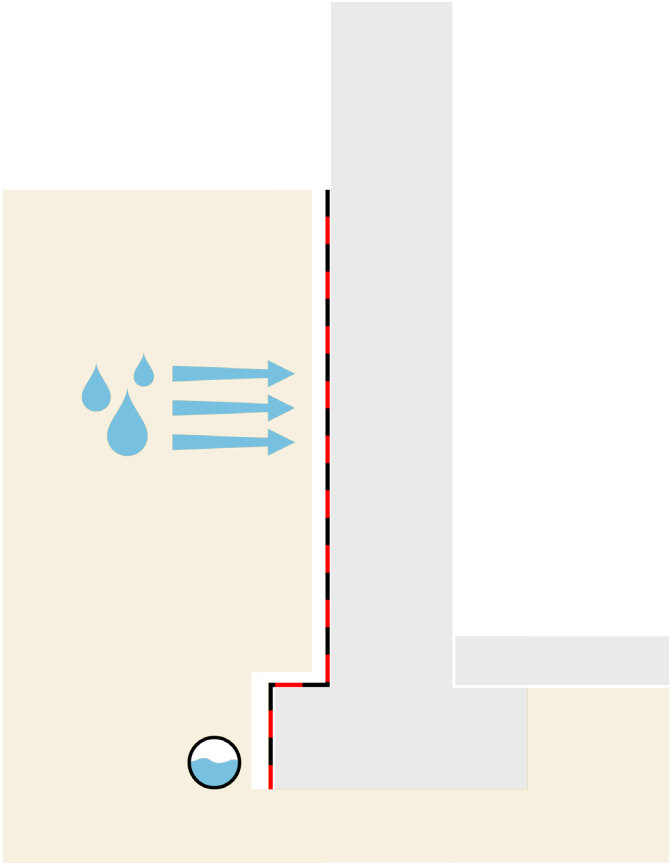


Fig. 23 | Barriera impermeabilizzante e sistema di drenaggio

La corretta applicazione di questi sistemi richiede competenze specifiche e un'accurata supervisione in fase esecutiva. L'efficacia dell'intervento dipende, infatti, tanto dalla qualità dei materiali utilizzati quanto dalla precisione nella posa, dalla continuità delle giunzioni e dalla protezione dei raccordi critici. Nei contesti storici o archeologici, tale attenzione deve essere ulteriormente rafforzata attraverso un approccio interdisciplinare che coniughi conoscenza storica, diagnostica avanzata e sostenibilità tecnica degli interventi.

4.3.1.3.2 VANTAGGI

L'impermeabilizzazione delle strutture

controterra costituisce una soluzione strategica per il controllo dell'umidità particolarmente efficace quando il degrado è causato da infiltrazioni laterali o da controspinta laterale dell'acqua.

È una tecnica che agisce a monte intercettando l'acqua prima che entri in contatto con il materiale poroso. La molteplicità di soluzioni disponibili assicura elevata flessibilità progettuale. Molti materiali impiegati sono chimicamente inerti e compatibili con le proprietà igroscopiche e meccaniche delle murature storiche.

Nelle nuove costruzioni i sistemi possono essere integrati in fase di progetto fungendo da barriera anche per l'umidità di risalita capillare, mentre nel risanamento, quando lo scavo è praticabile, agiscono esternamente senza alterare l'integrità strutturale dell'organismo edilizio.

La possibilità di ispezionare e verificare il sistema prima del reinterro migliora il controllo qualitativo e facilita eventuali interventi di manutenzione.

Inoltre, laddove è necessario, è possibile intervenire selettivamente solo sui lati esposti all'accumulo d'acqua, riducendo così i costi e l'impatto operativo. Tale adattabilità rende l'intervento vantaggioso anche in situazioni in cui l'accessibilità è limitata o la necessità di contenere le interferenze con le attività interne è prioritaria.

4.3.1.3.3 LIMITI E CRITICITÀ

Nonostante la piena efficacia negli edifici di nuova costruzione, nell'edilizia storica l'impermeabilizzazione controterra presenta limiti tecnici e operativi che ne condizionano l'efficacia e la reale opportunità d'impiego.

Il limite più rilevante è la non risolutività nei casi in cui la causa principale sia la risalita capillare: se non è possibile realizzare uno sbarramento orizzontale efficace alla base della muratura, la barriera laterale può impedire la naturale evaporazione della parete e determinare l'innalzamento del fronte umido [Lombardi (2005)].

L'esecuzione richiede scavi perimetrali fino alla base delle fondazioni: ciò impone spazi operativi, valutazioni sulla stabilità dei pendii, puntellature e una logistica compatibile con eventuali edifici adiacenti, impianti o vincoli urbanistici.

In contesti urbani densi o in presenza di scavi archeologici, l'intervento può risultare impraticabile o fortemente impattante.

Superfici articolate, basamenti irregolari, dislivelli e sporgenze rappresentano punti deboli per la continuità dell'impermeabilizzazione. Tali nodi richiedono dettagli progettuali e di cantiere particolarmente curati per evitare la formazione di vie preferenziali di infiltrazioni.

Pertanto, l'impermeabilizzazione controterra negli edifici storici è efficace quando il problema principale è l'umidità da terrapieno, ma va evitata o ripensata quando la causa dominante è la risalita capillare e non è possibile intervenire alla base della muratura. Prima di prevederne l'utilizzo occorrono indagini geotecniche e igrometriche approfondite, valutazioni di fattibilità strutturale e un progetto esecutivo che preveda dettagli di giunzione, drenaggio, ispezione e manutenzione.

4.3.1.4 Taglio Meccanico

Il taglio meccanico della muratura consiste nella realizzazione di una discontinuità orizzontale continua alla base della muratura, all'interno della quale si inserisce una barriera impermeabile (es. lamine metalliche, lastre di ardesia o vetro, membrane in polietilene ad alta densità...). Il principio tecnico è diretto e di tipo fisico: interrompere la continuità capillare dei materiali per arrestare la migrazione dell'acqua per capillarità e impedire l'imbibizione della porzione soprastante di muratura (Fig. 24 e 25). [EMERISDA (2014); Franzoni (2014); Franzoni (2018); Lombardi (2005); Musso; Seidu (2019); Stastny (2021)]

L'introduzione del *damp-proof course* (DPC) risale alla metà dell'Ottocento e prevedeva l'impiego di scaglie di ardesia posate orizzontalmente [Musso; Seidu (2019)]. La tecnica si è sviluppata nei decenni successivi con l'utilizzo di bitume (anni '30), membrane plastiche e lastre metalliche (es. piombo), per

poi evolvere, nel dopoguerra, verso l'inserimento meccanico di materiali sintetici o metallici tramite il taglio diretto della muratura.

In Italia, la tecnica fu introdotta negli anni '60, in particolare grazie agli studi e alle applicazioni del metodo Massari, tra i primi a prevedere l'inserimento di una barriera in resina poliestere all'interno della sezione tagliata [Musso; Seidu (2019)].

Diversi casi storici italiani documentano l'impiego del taglio meccanico già a partire dalla metà degli anni '60: nella chiesa di Santa Maria della Neve a Roma (1966) si sperimentò per la prima volta l'inserimento di resina in seguito al taglio; nel 1967, nella chiesa di San Sebastiano (Roma), fu introdotta una lamina in piombo inserita a scalpello; nel 1968, a Venezia, la chiesa di Santa Maria dei Miracoli vide l'applicazione del metodo Massari su murature rivestite in marmo. L'intervento, in questo caso, consistette nel taglio della muratura sia all'interno che all'esterno (marmo rosso di Verona e marmo grigio), con inserimento della barriera in resina impermeabilizzante. Seguono interventi simili anche in edifici prestigiosi come la Crocifissione del Perugino presso Santa Maria Maddalena de' Pazzi a Firenze, e nelle chiese di Santa Caterina a Galatina (1972) e di Cendon a Silea (1983).

Esperienze più recenti provengono dall'Europa centro-orientale, dove la tecnica del taglio è stata adottata anche in combinazione con iniezioni idrofobizzanti [Stastny (2021)].

Per la letteratura tecnica il taglio meccanico è considerato una misura "risolutiva" ma estremamente invasiva e questo suo carattere ha suscitato un dibattito internazionale tra sostenitori e critici, soprattutto in relazione al patrimonio architettonico tutelato. In alcuni paesi (es. Regno Unito) il metodo è stato codificato nei manuali tecnici (BRE Digest 245, 2007) e largamente utilizzato, benché con riconoscimento dei suoi elevati costi, dell'impatto invasivo e del rischio di danni secondari [Seidu (2019)]. In altri contesti, soprattutto laddove prevale un approccio conservativo orientato alla salvaguardia della materia storica, il taglio meccanico è ritenuto un intervento da adottare solo in casi estremi



Fig. 24 | Taglio meccanico della muratura [Fonte: Ongaro Risanamenti (2025). Taglio radicale murature. https://www.ongarorisanamenti.it/soluzioni/taglio-radicale-murature]



Fig. 25 | Taglio meccanico della muratura [Fonte: Musso, S. F. (a cura di). (s.d.). Banca dati: Tecniche di restauro. UTET Scienze Tecniche]

[Castelluccio, Vitiello (2016)].

Viene, generalmente, esclusa la sua applicazione negli edifici vincolati o nelle murature a sacco, in pietrame disordinato o con tessiture irregolari, a causa dell'elevato rischio di alterazione irreversibile della stratigrafia muraria e della coesione strutturale.

4.3.1.4.1 METODO DI APPLICAZIONE

Il taglio meccanico della muratura, per la sua natura altamente invasiva e per i potenziali effetti sul comportamento strutturale dell'edificio, richiede una valutazione preliminare che non può limitarsi a un'analisi prestazionale dell'intervento, ma deve fondarsi su una conoscenza approfondita e contestualizzata del manufatto, della sua storia costruttiva e

delle sue criticità specifiche.

La prima fase consiste nell'individuazione e nella caratterizzazione delle zone interessate da umidità di risalita capillare mediante una campagna diagnostica stratificata. Strumenti e prove comprendono:

- Termografia a infrarossi per individuare anomalie termiche
- Misurazioni igrometriche puntuali e, ove necessario, prelievi per analisi gravimetriche e saline (contenuto idrico e concentrazione di sali)
- Saggi murari, ove necessario, per individuare la stratigrafia e la natura dei materiali costruttivi

Parallelamente, si valuta la risposta strutturale della muratura rispetto alle sollecitazioni indotte dal taglio. L'analisi deve considerare: tipologia costruttiva, grado di coesione tra gli elementi, presenza di lesioni o discontinuità, regolarità geometrica e materica, condizioni dei leganti [Lombardi (2005); Musso]. Particolare cautela è richiesta per murature a sacco, con pietrame disordinato o vuoti interni, che possono avere comportamenti meccanici imprevedibili.

Prima dell'esecuzione è necessario verificare l'accessibilità, la presenza di impianti sottotraccia o elementi metallici nascosti (indagini con georadar/metal detector) e ogni vincolo spaziale che potrebbe compromettere le operazioni.

Nei casi in cui la struttura sia sottoposta a tutela, l'intervento deve essere preventivamente autorizzato dalle autorità competenti (D. Lgs. 42/2004). Le decisioni progettuali devono pertanto fondarsi non solo sull'efficacia tecnica, ma anche su una valutazione comparativa delle alternative possibili, nel rispetto delle linee guida ministeriali e delle buone pratiche internazionali in ambito conservativo.

Allestimento del cantiere e predisposizione dell'area di lavoro

Una volta verificata l'idoneità della muratura al taglio meccanico, si procede con la predisposizione dell'area di lavoro.

Le superfici adiacenti all'area di intervento vanno protette per prevenire danni meccanici, abrasioni e depositi di polvere. In presenza di intonaci decorati, rivestimenti o elementi di pregio la protezione deve essere particolarmente curata, incluse barriere anti-vibrazione.

La predisposizione dell'area di intervento richiede, inoltre, la rimozione di eventuali ostacoli alla linea di taglio per evitare interferenze con l'andamento del taglio o generare disallineamenti tra le porzioni di muratura.

Nella fase di predisposizione si tiene infine conto delle esigenze legate alla sicurezza del personale e alla gestione dei sottoprodotti dell'intervento. Le polveri prodotte dal taglio della muratura devono essere contenute mediante sistemi di aspirazione o raccolta localizzata, evitando dispersioni nell'ambiente e riducendo il rischio di inalazione. L'uso di acqua nebulizzata, qualora compatibile con i materiali in opera e con le condizioni conservative, può contribuire a ridurre l'emissione di particolato.

Fase di taglio

La fase di taglio rappresenta il momento operativo centrale dell'intervento. L'obiettivo è realizzare, in condizioni controllate, una discontinuità orizzontale passante nell'elemento murario, idonea ad ospitare la barriera impermeabile scelta.

Prima di estendere l'intervento all'intera struttura è necessario eseguire una prova pilota su un tratto limitato. La prova è utile per verificare la risposta della muratura, tarare la profondità e la geometria del taglio e definire le misure di mitigazione (preconsolidamento dei maschi murari, puntellature, ancoraggi, sigillature...).

Se possibile il taglio si esegue lungo un giunto di malta esistente; in sua assenza può rendersi necessaria la rimozione selettiva di un intero corso. La quota tipica di esecuzione del taglio è compresa tra i 10 e i 20 cm dal piano di calpestio, variabile in funzione della geometria muraria e delle caratteristiche specifiche del caso [Lombardi (2005); Guolo (2024)].

La larghezza della fessura deve essere

compatibile con lo spessore del materiale impermeabilizzante scelto, in genere 8-15 mm [Guolo (2024)].

La scelta della strumentazione per eseguire il taglio avviene valutando i seguenti criteri [Lombardi (2005)]:

- Precisione sull'avanzamento e controllo della profondità del taglio
- Contenimento delle vibrazioni trasmesse alla muratura
- Adattabilità alla tipologia muraria e agli spazi disponibili

Il taglio viene eseguito in tratti successivi, generalmente di lunghezza compresa tra 80 e 100 cm, alternando i settori attivi e inattivi per evitare indebolimenti localizzati. Questa metodologia consente l'inserimento progressivo della barriera impermeabilizzante.

Dopo il taglio si procede con un lavaggio a pressione (con acqua o aria compressa) per rimuovere i residui nella fessura e, se previsto, al posizionamento di tamponi in gomma o spugna su uno dei fronti del taglio, al fine di contenere l'eventuale fuoriuscita di materiali iniettati.

È fondamentale che tutta l'operazione si svolga sotto costante controllo tecnico, con un monitoraggio continuo della risposta muraria e con la possibilità di adeguare l'approccio esecutivo in funzione di criticità emergenti.

Inserimento della barriera impermeabile

Una volta eseguito il taglio nella muratura, la fase successiva consiste nell'inserimento della barriera impermeabilizzante.

Questa operazione deve essere eseguita con la massima precisione e in continuità temporale con le operazioni di taglio, così da ridurre i tempi di esposizione della muratura e prevenire possibili cedimenti locali [Lombardi (2005); Musso].

La barriera viene collocata all'interno del taglio in modo continuo e passante per l'intero spessore della muratura.

A seconda del sistema adottato, il riempimento della fessura può avvenire mediante:

- Inserimento meccanico di lastre o membrane prefabbricate
- Iniezione di prodotti impermeabilizzanti fluidi o semifluidi, capaci di aderire alle superfici interne della fessura

Nei casi di murature di grande spessore o composizione eterogenea, si possono adottare strategie specifiche come l'inserimento della barriera da entrambe le facce del muro o l'uso di materiali espandenti o autolivellanti, capaci di compensare irregolarità e disomogeneità interne.

La scelta del materiale impermeabilizzante e del relativo metodo di inserimento deve essere coerente con le caratteristiche meccaniche e materiche della muratura e con le condizioni ambientali e di esercizio (es. presenza di sali, variazioni termiche).

Completato l'inserimento, per assicurare il ripristino della continuità statica dell'elemento e la protezione della barriera impermeabile, è indispensabile verificare la corretta adesione del materiale impermeabilizzante ai bordi e procedere al reintegro murario o al consolidamento.

Finitura e monitoraggio

Una volta inserita la barriera impermeabile all'interno del tagli, si procede con la sigillatura della fessura con malte idonee.

Queste malte devono possedere caratteristiche meccaniche adeguate a garantire la stabilità del paramento, ma al contempo evitare rigidità eccessive che potrebbero innescare fenomeni fessurativi. [Lombardi (2005)]

A completamento della sigillatura, si procede al ripristino degli strati superficiali precedentemente rimossi.

Completata la fase di rifinitura, è indispensabile avviare un programma di monitoraggio post-intervento, finalizzato a verificare nel tempo:

- L'efficacia della barriera impermeabilizzante nel controllo della risalita capillare
- L'impatto dell'intervento sulle prestazioni igrometriche e meccaniche

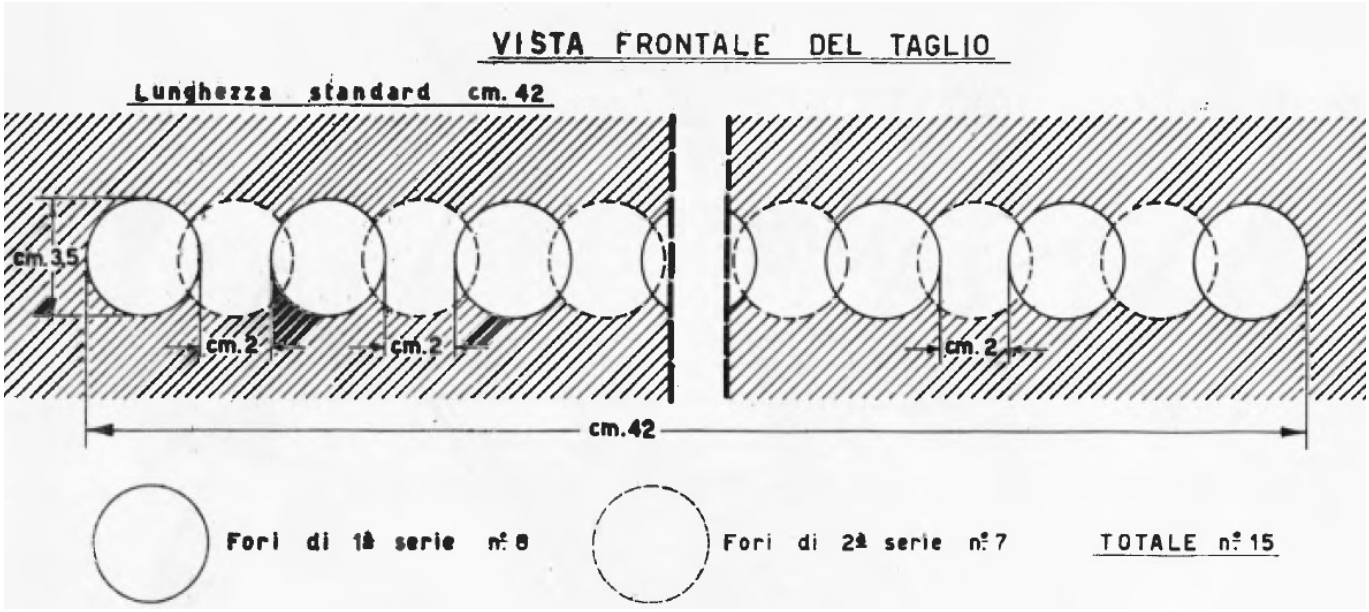


Fig. 26 | Taglio meccanico con il metodo Massari [Fonte: Massari, G. (1969). L'umidità nei monumenti. Rome Centre]

della muratura

Varianti esecutive

L'intervento di taglio meccanico può essere realizzato secondo diverse varianti operative che si distinguono in funzione della tecnica di taglio adottata, della natura del materiale impermeabilizzante impiegato e delle modalità di inserimento e sigillatura del giunto.

Una delle soluzioni consiste nell'introduzione di ***fogli impermeabili prefabbricati***, realizzati in membrane bituminose, resine sintetiche, film in polietilene o vetroresina sabbiata.

I fogli vengono dimensionati in modo da sporgere di almeno 2 cm oltre il filo della muratura, così da assicurare la protezione anche dello strato superficiale. Per garantire la continuità della barriera, i fogli vengono sovrapposti per circa 5-6 cm. Il sistema è completato con zeppe di ancoraggio in resina termoindurente, che ne assicurano la stabilità meccanica.

Una seconda variante, utilizzata nelle murature omogenee e regolari, prevede l'impiego di ***barriere impermeabili rigide***, come profilati nervati in PVC, che vengono annegati in una malta espansiva iniettata nel taglio.

I profilati vengono posati in sequenza, con giunzioni ad incastro per assicurare la continuità della barriera.

Una variante di origine austriaca è rappresentata dal ***metodo H&W*** [Lombardi (2005)], che prevede l'infissione meccanica di lamine ondulate in acciaio inox al cromo direttamente nelle fughe di malta.

L'inserimento avviene mediante martelli pneumatici montati su telai rigidi mobili, capaci di imprimere colpi ad alta frequenza senza provocare danni strutturali.

Le lamine, di spessore di circa 1,5 mm e larghezza variabile tra 30 e 40 cm, hanno una lunghezza pari allo spessore della muratura e vengono sovrapposte per garantire la continuità della barriera. Il giunto viene poi saturato con malta additivata con espansivi, per compensare eventuali ritiri e migliorare la coesione. Il sistema risulta efficace su murature regolari di spessore contenuto e presenta limiti applicativi su murature irregolari in pietrame.

Una variante tecnologicamente affine al metodo H&W è il ***taglio per inserimento percussivo di lamine in acciaio inox***, eseguito senza apertura di un vero e proprio taglio. Rispetto al metodo precedente, questo differisce per il maggiore

impatto meccanico dell'attrezzatura.

Una delle varianti più note in Italia è il ***metodo Massari*** (Fig. 26) [EMERISDA (2014); Guolo (2024); Musso; Premoli (2015)], che combina un taglio orizzontale continuo, realizzato con carotatrice o sega, con il riempimento mediante resine sintetiche, introdotte a bassa pressione o per gravità.

L'utilizzo di materiali tipici delle iniezioni chimiche ha spesso generato equivoci classificatori. Tuttavia, la presenza di un'interruzione fisica del paramento murario distingue in modo netto il metodo Massari dalle iniezioni capillari. L'azione non avviene per diffusione nel tessuto, ma per sostituzione diretta lungo un piano di taglio artificiale, e va pertanto ricondotta alle tecniche meccaniche.

Il taglio viene asciugato accuratamente prima dell'iniezione, per favorire la corretta polimerizzazione della resina, che è contenuta inferiormente da un foglio in polietilene e lateralmente da malta rapida e zeppe provvisorie. A seconda del sistema scelto, si utilizzano canalette di colatura o tubicini plastici per l'iniezione controllata. Dopo poche ore, la resina è in grado di sopportare anche carichi significativi.

Una variante radicale, di origine anglosassone, è l'***undersetting***, che prevede lo smontaggio e la successiva ricostruzione della parte inferiore della muratura per tratti successivi.

Durante la ricostruzione viene inserita una nuova DPC, generalmente in fogli di polietilene., mentre gli elementi murari originari vengono reimpiegati dopo la desalinizzazione. [Lopez-Arce (2009)]

Infine, una variante meno diffusa ma concettualmente affine al taglio con fogli prefabbricati è il ***slot sawing***, che consiste nel taglio lungo un giunto di malta e nella successiva installazione di una nuova DPC. [Lopez-Arce (2009)]

Macchinari utilizzati per il taglio meccanico

L'evoluzione delle tecniche di taglio meccanico della muratura ha portato al perfezionamento di sistemi sempre più precisi, meno invasivi e compatibili con le diverse tipologie murarie e con le condizioni di cantiere.

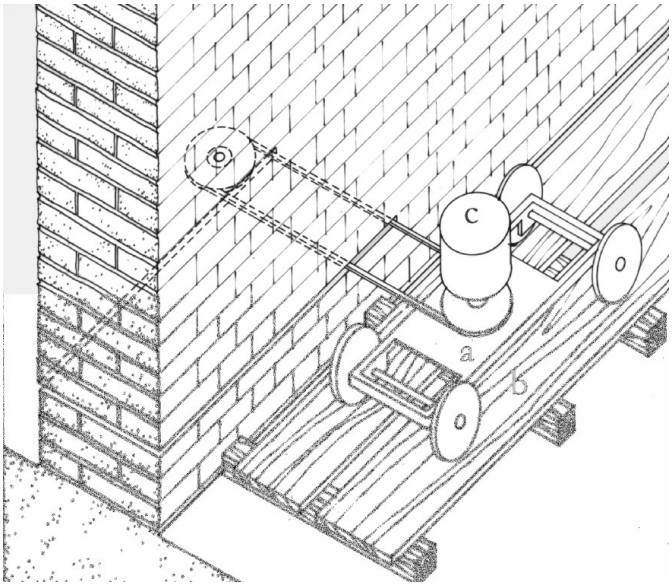


Fig. 27 | Taglio meccanico della muratura con sega a catena [Fonte: Musso, S. F. (a cura di). (s.d.). Banca dati: Tecniche di restauro. UTET Scienze Tecniche]

Il primo metodo storicamente documentato è il ***taglio manuale***, eseguito con mazzetta e scalpello. Sebbene oggi sia tecnicamente superato, rappresenta il riferimento storico da cui hanno avuto origine le tecniche moderne.

La lavorazione era estremamente faticosa e rischiosa, poiché l'assenza di controllo sulla linearità e sulla profondità del taglio generava vibrazioni e sollecitazioni incontrollate sulla muratura.

Un decisivo passo avanti è stato introdotto da Massari con l'impiego della ***carotatrice ad asse orizzontale***, considerata la prima vera forma di taglio meccanico in senso moderno [Guolo (2024); Lombardi (2005); Musso].

La macchina, montata su un carrello scorrevole, opera in due fasi:

- Esecuzione di una prima serie di fori ravvicinati (Ø 30–35 mm) lungo la linea di taglio
- Rimozione dei setti residui tra i primi fori

Il risultato è taglio continuo idoneo all'inserimento dei materiali impermeabili. Il

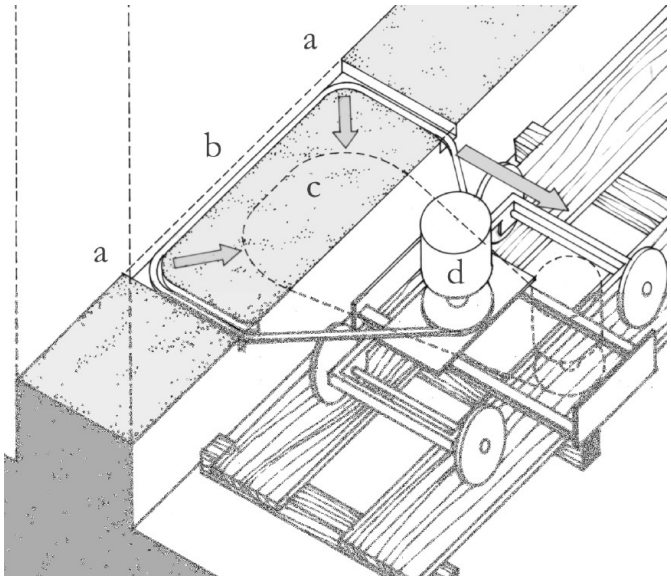


Fig. 28 | Taglio meccanico della muratura con filo a sferette di acciaio diamantato [Fonte: Musso, S. F. (a cura di). (s.d.). Banca dati: Tecniche di restauro. UTET Scienze Tecniche]

movimento rotatorio continuo, privo di urti, riduce notevolmente le vibrazioni. Tuttavia l'operazione è lenta e laboriosa e richiede un immediato risarcimento dei tratti tagliati per evitare cedimenti localizzati.

Successivamente si è diffuso l'impiego di ***seghe a motore con lama a catena dentata*** [Guolo (2024); Lombardi (2005); Lopez-Arce (2009); Musso; Stastny (2021)], che ha segnato un'importante evoluzione in termini di rapidità, precisione e controllo operativo (Fig. 27).

Il sistema è particolarmente adatto a murature in laterizio o pietra tenera con giunti regolari.

Il macchinario è montato su un carrello mobile che scorre su binari guida, consentendo la regolazione della profondità, dell'inclinazione e del parallelismo rispetto ai corsi murari.

Il taglio, dello spessore di circa 1 cm, può raggiungere una profondità massima di 130–150 cm.

Il taglio con ***filo diamantato*** rappresenta una successiva evoluzione, introdotta per affrontare murature di notevole spessore o con pietre dure (Fig. 28) [Guolo (2024); Lombardi (2005); Lopez-Arce (2009); Musso; Stastny (2021)].

Il principio deriva dalle tecniche di escavazione nelle cave di pietra: un cavo flessibile dotato di sferette abrasive in acciaio o diamante viene fatto passare attraverso la muratura e messo in rotazione da una puleggia motrice con tensionamento idraulico.

Il taglio avviene in direzione centripeta, procedendo dagli estremi verso il centro della muratura, e deve essere passante.

Il sistema consente di lavorare su materiali molto resistenti, ma presenta una minore precisione rispetto alla sega.

Tra le soluzioni sperimentate ma poi abbandonate, si annoverano i sistemi a ***trefoli metallici*** combinati con acqua e sabbia ad alta pressione, mutuati anch'essi alle tecniche di taglio del marmo. Sperimentati a partire dagli anni '50, si sono rivelati poco maneggevoli e scarsamente controllabili, risultando inadatti al contesto edilizio.

Materiali utilizzati per la realizzazione delle barriere impermeabili

L'evoluzione delle tecniche di taglio meccanico è strettamente legata allo sviluppo dei materiali impiegati per la barriera impermeabile. Nel tempo, le soluzioni si sono diversificate per rispondere a esigenze di durabilità, compatibilità, resistenza meccanica e facilità di messa in opera [EMERISDA (2014); Kportufe (2015); Lopez-Arce (2009); Musso].

Le prime applicazioni, risalenti alla seconda metà dell'Ottocento, facevano uso di ***materiali rigidi a bassa porosità***, come mattoni smaltati (o ***engineering bricks***), cotti ad alte temperature e trattati con smalto vetroso. Questi elementi garantivano un'elevata impermeabilità e una buona resistenza alla compressione, ma richiedevano una posa estremamente accurata e l'assenza di sigillatura nei giunti verticali ne limitava l'efficacia [Delgado (2016); Lombardi (2005); Lopez-Arce (2009); Seidu (2019)].

Parallelamente, si sono diffuse soluzioni più economiche e versatili, come le ***barriere bituminose a caldo***, ottenute dalla colata di catrame miscelato con sabbia. Tuttavia, studi diagnostici successivi hanno evidenziato un degrado progressivo di tali sistemi: il catrame

tende a ossidarsi, fessurarsi e perdere coesione. Più performanti si sono dimostrate le varianti con catrame e calcite, caratterizzate da una porosità molto fine (<2%). [Lopez-Arce (2009)]

Con l'avanzare della tecnologia, si è assistito all'introduzione di ***lamiere metalliche***, in particolare in acciaio inox al cromo [Diaz Goncalves (2024); Moller (2011)]. L'ondulazione del profilo contribuisce alla stabilità meccanica, anche in presenza di lievi assestamenti o movimenti sismici. La resistenza alla corrosione è assicurata dallo strato di ossido di cromo che protegge la superficie metallica.

Negli ultimi decenni, le soluzioni più adottate sono rappresentate da ***fogli impermeabili in materiali compositi o plastici*** (es. vetroresina sabbiata, ovvero un laminato in resina poliestere rinforzata con fibra di vetro) [Delgado (2016); Lombardi (2005); Lopez-Arce (2009); Seidu (2019)].

Questo materiale, dielettrico e chimicamente inerte, non subisce alterazioni in presenza di correnti vaganti ed è caratterizzato da elevate prestazioni meccaniche (resistenza a compressione 1200–2000 kg/cm², trazione 660–850 kg/cm², flessione 1800–2000 kg/cm²) e buona resistenza termica. La doppia sabbiatura superficiale migliora sensibilmente l'adesione con la malta di riempimento e consente di ottenere valori di resistenza muraria comparabili a quelli originali. [Musso]

Un'alternativa molto diffusa sono le ***bande in PVC nervato***, realizzate con una miscela additivata con sali di piombo e calcio.

Il materiale, anch'esso dielettrico e chimicamente stabile, presenta ottime caratteristiche meccaniche (carico di rottura a trazione di circa 400–500 kg/cm², snervamento a 450–550 kg/cm², modulo elastico a flessione di circa 30.000 kg/cm²) e un punto di rammollimento relativamente contenuto (70–80 °C). Prove distruttive su murature trattate con profilati in PVC e malte espansive hanno dimostrato che i parametri di resistenza non risultano inferiori a quelli preesistenti, rendendo questo sistema idoneo anche in zone a rischio sismico. [Musso]

Altri materiali comprendono: piombo, rame, ardesie naturali, polietilene, membrane bituminose prefabbricate, feltri sintetici o combinazioni multistrato.

Sebbene molti di essi garantiscano buone prestazioni impermeabilizzanti, la loro applicazione deve essere valutata con cautela per possibili problematiche legate a tossicità, rilascio di sali, invecchiamento precoce o instabilità meccanica.

La scelta del materiale impermeabilizzante costituisce un passaggio cruciale. Una barriera realmente efficace deve garantire [Kportufe (2015)]:

- Tenuta all'acqua anche in presenza di lievi deformazioni
- Continuità strutturale e adesione alla muratura
- Compatibilità fisico-chimica con i materiali originali
- Durabilità nel lungo periodo senza necessità di manutenzioni invasive

Infine, il riempimento della fessura viene eseguito con malte cementizie antiritiro o con malte a base di resina poliestere o epossidica. Le prime più economiche, presentano una minore adesione e deformabilità rispetto alle resine. Le malte poliestere, costituite da resina pura e filler anticavillanti (polvere di quarzo, carbonato di calcio superventilato), sono impiegate per fessure superiori ai 14 mm.

Le malte epossidiche, più costose, si adattano invece a tagli di qualsiasi spessore, garantendo una migliore adesione e un'elevata durabilità.

In entrambi i casi, l'inerte costituisce oltre l'85% del volume del riempimento. Il volume di riempimento è generalmente parziale (intorno al 70%) per compensare eventuali movimenti della muratura.

4.3.1.4.2 VANTAGGI

Il principale punto di forza del taglio meccanico risiede nella sua efficacia immediata. Una volta inserita correttamente la barriera impermeabile, il fenomeno della risalita capillare viene interrotto in modo netto e definitivo al di sopra della linea di taglio. [EMERISDA (2014); Moller (2011); Stastny (2021)].

Un ulteriore vantaggio è rappresentato dalla rapidità esecutiva dell'intervento, favorita dall'impiego di tecnologie avanzate e macchinari ad alta efficienza. In contesti dove è richiesto un risanamento tempestivo (es. edifici pubblici o ambienti ad uso continuo) la velocità di esecuzione costituisce un elemento decisivo nella scelta della tecnica più idonea.

Dal punto di vista conservativo, il taglio meccanico si configura come una soluzione fisica che non introduce sostanze estranee o potenzialmente alteranti nelle murature. Questo aspetto lo rende preferibile rispetto a metodi basati su iniezioni chimiche, le cui conseguenze a lungo termine sui materiali storici possono risultare difficili da prevedere.

Inoltre, la possibilità di ispezionare visivamente la linea di taglio e la continuità della barriera impermeabile offre un controllo diretto sull'esito dell'intervento, riducendo il margine di errore.

4.3.1.4.3 LIMITI E CRITICITÀ

Nonostante l'efficacia immediata nella creazione di una barriera contro la risalita capillare, il taglio meccanico presenta una serie di limiti strutturali e conservativi che ne rendono l'applicazione controversa [Castelluccio, Vitiello (2016); Fragata (2016); Guolo (2024)].

Tra gli aspetti più problematici figura il carattere fortemente invasivo dell'intervento che comporta la formazione di una discontinuità strutturale permanente.

Dal punto di vista sismico, la presenza di un piano di taglio può agire come cerniera o piano preferenziale di rottura, incrementando il rischio di scorrimenti orizzontali sotto sollecitazioni dinamiche. [Aiello (2022); Diaz Goncalves (2024); EMERISDA (2014)]

La natura irregolare e composita di molte murature tradizionali rende la precisione dell'intervento particolarmente difficile [EMERISDA (2014); Lombardi (2005)]. L'impossibilità di garantire uniformità alla barriera impermeabile si traduce in risultati incerti.

Un ulteriore limite riguarda l'irreversibilità dell'intervento [Delgado (2016)].

Sul piano funzionale, la discontinuità non interessa solo la zona del taglio. La parte di muratura sottostante alla barriera impermeabile rimane soggetta alla risalita capillare, continuando ad assorbire acqua senza possibilità di asciugarsi. Ne consegue un progressivo degrado dei materiali, mentre la superficie del taglio stesso può trasformarsi in un punto di accumulo dell'umidità residua, favorendo fenomeni di condensazione e indebolimento materico. [EMERISDA (2014); Moller (2011); Stastny (2021)]. Ciò comporta rischi di danni ulteriori, come la perdita di stabilità dovuta a fenomeni di gelo o alla presenza di sali.

Allo stesso tempo, la parte di muratura sopra la barriera può subire un'asciugatura troppo rapida, con conseguente perdita di resistenza meccanica e rischio di sfarinamento dei materiali.

Non vanno, infine, trascurate le implicazioni estetiche e culturali: la linea di taglio, visibile sul paramento, altera il valore storico e architettonico dell'edificio. [EMERISDA (2014)]

A completamento del quadro, il costo elevato, e la complessità esecutiva costituiscono ulteriori fattori che ne riducono l'applicabilità [Seidu (2019); Stastny (2021)].

4.3.2 Interventi chimici

La tecnica delle iniezioni chimiche, conosciuta anche come impermeabilizzazione chimica, barriera chimica o interruzione chimica, è stata introdotta negli anni '60 come soluzione per arrestare l'umidità da risalita capillare in murature prive di barriera fisica.

Nel tempo si è affermata come metodo applicato soprattutto in contesti in cui l'installazione di membrane continue risulta tecnicamente complessa o poco economica.

Alcuni organismi normativi internazionali (es. *British Board of Agrément*, il *Building Research Establishment* e la *British Standards Institution*) riconoscono l'interruzione chimica come unica alternativa alla barriera fisica tradizionale [Seidu (2019); Stastny (2021)]. Tuttavia, il metodo è oggetto di un costante e acceso dibattito in

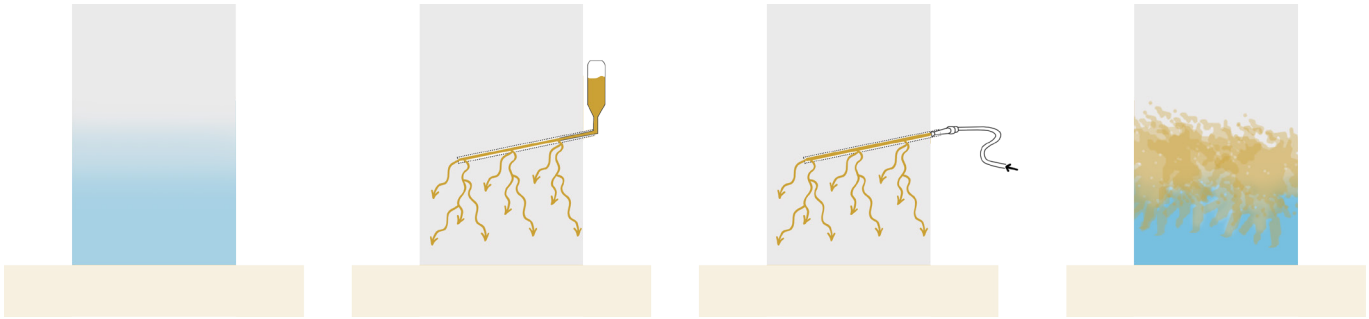


Fig. 29 | Meccanismo di funzionamento delle iniezioni chimiche

ambito tecnico-scientifico, in relazione alla variabilità delle condizioni di applicazione e all'effettiva efficacia nel medio-lungo periodo. [EMERISDA (2014); Franzoni (2014); Franzoni (2018)]

Il principio tecnico-funzionale alla base dell'interruzione chimica risiede nell'interruzione della continuità capillare (Fig. 29). Questo sbarramento, ottenuto attraverso l'iniezione di specifici formulati liquidi che penetrano nei pori e nei capillari della muratura, agisce su due fronti: occlude fisicamente i capillari e/o idrofobizzazione dei capillari. In termini fisici, questo comportamento si comprende considerando le murature come sistemi porosi saturabili in cui l'acqua si muove per capillarità (legge di Jurin). [Castelluccio, Vitiello (2016); Lombardi (2005); Musso; Premoli (2015)]

A differenza dei sistemi meccanici, l'interruzione chimica può essere applicata in diverse tipologie murarie.

L'interruzione chimica può essere realizzata sia alla base della muratura per creare una barriera orizzontale, sia lungo le pareti verticali in contatto diretto con il terreno umido, come nel caso di strutture controterra. In quest'ultima configurazione, è spesso integrata da ulteriori barriere orizzontali esterne o da rivestimenti superficiali traspiranti, al fine di contenere ulteriormente i fenomeni di migrazione dell'umidità.

4.3.2.1 Metodo Di Applicazione

La realizzazione di uno sbarramento chimico richiede una diagnosi preliminare rigorosa, propedeutica a tutte le scelte progettuali: selezione del formulato, modalità di iniezione, profondità e passo dei fori, nonché eventuali interventi preparatori o complementari.

La natura del materiale costituente e la sua struttura porosa incidono in modo determinante sull'efficacia dell'intervento. Nello specifico, la distribuzione e le dimensioni dei pori condizionano la velocità e l'ampiezza di diffusione del prodotto e ne influenzano la durabilità: in materiali altamente porosi o malte degradate gli agenti idrofobizzanti risultano sviluppare prestazioni inferiori rispetto a supporti più compatti. E, affinché lo sbarramento risulti realmente efficace, è necessario che il trattamento interessi in anche la malta di allettamento, non solo gli elementi pieni della muratura.

La compatibilità tra formulato e supporto è un altro fattore critico: il principio attivo, il solvente e le modalità di reazione/diffusione determinano i tempi di penetrazione, il comportamento nel sistema capillare e la stabilità del trattamento. [Guolo (2024); Premoli (2015)]

4.3.2.1.1 MATERIALI IMPIEGATI

I formulati impiegati nelle barriere chimiche costituiscono l'elemento funzionale centrale del trattamento e la loro efficacia è il risultato dell'interazione tra proprietà del prodotto, caratteristiche fisico-meccaniche della muratura e condizioni ambientali al momento dell'intervento [Castelluccio, Vitiello (2016); EMERISDA (2014); EMERISDA (2015); Lombardi (2005); Musso].

I prodotti si presentano in forma liquida (bassa viscosità, simile a quella dell'acqua) o in crema (maggiore viscosa e rilascio controllato) e sono veicolati con solventi a base acquosa o organici

[EMERISDA (2014); Musso]. I primi risultano generalmente più compatibili con supporti saturi, mentre i secondi, non essendo miscibili con l'acqua, richiedono condizioni di umidità controllata o pre-essiccamento per una buona penetrazione.

Dal punto di vista funzionale, i formulati operano tramite due meccanismi principali, talvolta combinati [EMERISDA (2014)]: (i) occlusione dei capillari mediante polimerizzazione/cristallizzazione che crea reticoli solidi all'interno dei pori; (ii) idrofobizzazione delle superfici capillari mediante film molecolari che riducono la tensione superficiale e l'adesione dell'acqua.

La scelta del prodotto deve basarsi su prove preliminari e su una valutazione puntuale dei seguenti parametri, richiamati anche dalle Raccomandazioni Normal 20/85 (Interventi conservativi: progettazione esecuzione e valutazione preventiva) [EMERISDA (2014)]:

- Composizione chimica: influenza le modalità di reazione del formulato con i materiali della muratura e con l'umidità presente;
- Viscosità: una bassa viscosità favorisce la penetrazione, ma può determinare dispersioni in murature fessurate o eterogenee;
- Velocità di polimerizzazione: tempi più lenti permettono una migliore diffusione, ma possono comportare maggiori rischi di evaporazione o degrado del principio attivo;
- Contenuto e natura del solvente: da valutare in funzione della compatibilità con l'umidità residua e con i materiali lapidei;
- Compatibilità chimico-fisica: essenziale per evitare reazioni secondarie dannose (ad es. formazione di efflorescenze saline);
- Modulo elastico e coefficiente di dilatazione: un formulato troppo rigido o non coerente con il supporto può causare microfessurazioni a seguito di sbalzi termici;
- Tensione superficiale: bassa tensione favorisce l'effetto idrofobizzante e la diffusione capillare;
- Traspirabilità residua: nei trattamenti a base di resine idrofobizzanti, è fondamentale che i pori non vengano occlusi totalmente, mantenendo la permeabilità al vapore.

Formulati con effetto occludente

I formulati occludenti penetrano nella matrice porosa della muratura e, attraverso reazioni di cristallizzazione o polimerizzazione, creano all'interno dei capillari un reticolo solido che blocca fisicamente il passaggio dell'acqua.

Questo meccanismo riduce la porosità efficace e produce un effetto immediato di contenimento dell'umidità. Tuttavia, la durabilità della barriera dipende da diverse condizioni ambientali: fenomeni di microfessurazione dovuti a shock termici, incompatibilità chimica con i sali presenti nella muratura o instabilità in presenza di pH estremi possono compromettere nel tempo la continuità della barriera.

Le principali famiglie di prodotti occludenti impiegati nella pratica conservativa sono [EMERISDA (2014); EMERISDA (2015); Guolo (2024); Lombardi (2005); Musso]:

- ***Resine epossidiche:*** elevata adesione, stabilità dimensionale (assenza di ritiri significativi) e resistenza chimica. Il processo di indurimento avviene anche a basse temperature, e i tempi di lavorabilità possono essere modulati in funzione della stagione. L'elevata viscosità limita la capacità di penetrazione nei supporti a tessitura compatta o scarsamente porosa
- ***Resine poliuretaniche:*** maggiore elasticità (adatte a supporti soggetti a micro-movimenti o microfessurazioni). Scarsa efficacia in ambienti ad alta concentrazione salina
- ***Silicati di sodio e potassio:*** efficaci su supporti ricchi di calcio in quanto reagiscono con questo elemento formando sali insolubili che occludono i pori. L'efficacia dell'occlusione dipende

dalla corretta attivazione della reazione, che richiede un pH elevato e può essere ostacolata dalla presenza di sali solubili. L'abbinamento con siliconati (idrofobizzanti) può migliorarne la stabilità in presenza di umidità.

- ***Gel acril-ammidici:*** bassa viscosità e ottima capacità di penetrazione anche in murature molto spesse o caratterizzate da una porosità discontinua. Richiedono iniezioni a bassa pressione per garantire una distribuzione omogenea del formulato. Sono sensibili ad elevati livelli di sali e umidità che ne compromettono il processo di gelificazione e ne alterano le proprietà e la stabilità nel tempo
- ***Paraffine:*** miscele cerose a base di alcani purificati, possono essere arricchite con additivi inorganici che ne migliorano le proprietà plastiche, la resistenza all'ossidazione e la fluidità in fase liquida. Agiscono per colatura a caldo ≥100°C (possono provocare stress termici alla muratura), sono chimicamente stabili e atossiche, ma durante la fase di raffreddamento possono subire una lieve contrazione volumetrica che ne riduce l'efficacia [Musso]
- ***Lattice siliconato:*** costituito da una dispersione di gomma sintetica (es. butadiene e stirene) in una matrice di resine siliconiche. L'occlusione avviene per coagulazione delle particelle di gomma all'interno dei capillari e per successiva polimerizzazione della fase siliconica. L'efficacia della barriera è influenzata dalle condizioni di umidità e dalla morfologia del sistema poroso: pori troppo fini o irregolari possono compromettere la coagulazione uniforme del materiale.
- ***Cementi osmotici:*** composti da leganti idraulici ad alta reattività, inerti silicei a granulometria finissima e additivi. La loro azione si basa su un meccanismo osmotico: reagiscono con la calce libera e con i sali solubili generando cristalli insolubili e voluminosi che occludono i pori. Efficace su supporti cementizi, potrebbero generare fenomeni di cristallizzazione espansiva in presenza di determinate specie saline.

Formulati con effetto idrofobizzante

I formulati idrofobizzanti non alterano dimensionalmente il reticolo poroso, ma ne modificano il comportamento superficiale: formando film molecolare sulle pareti dei capillari, riducono la tensione solido-liquido e ostacolano la risalita dell'acqua.

Questo fenomeno, che si traduce in un aumento dell'angolo di contatto >90°, mantiene la traspirabilità al vapore della muratura.

Tuttavia, l'efficacia dipende dalla corretta penetrazione del prodotto; un'elevata umidità residua, una diffusione disomogenea o l'esposizione prolungata a luce, agenti chimici e cicli termici possono comprometterne l'efficacia.

Tra le principali categorie di formulati idrofobizzanti si annoverano [EMERISDA (2014); EMERISDA (2015); Guolo (2024); Lombardi (2005); Moller (2011); Musso]:

- ***Silani:*** i più diffusi per la realizzazione di barriere chimiche. Caratterizzati da bassa viscosità, la loro volatilità li rende sensibili in condizioni eccessivamente secche, calde o ventilate. Inoltre, la loro efficacia può essere ridotta in presenza di un elevato contenuto d'acqua che ne impedisce un'adeguata penetrazione e distribuzione nei pori. [Delgado (2016); Sardella (2018); Stastny (2021)]
- ***Silossani:*** affini ai silani, ma con una maggiore complessità molecolare e minore volatilità. Spesso veicolati in micro-emulsione per migliorarne la penetrazione nei supporti umidi e garantire una distribuzione uniforme. A differenza dei silani, hanno maggiore efficacia in presenza di sali solubili. [Delgado (2016); Lopez-Arce (2009); Sardella (2018)]
- ***Siliconi:*** resistenti agli agenti chimici e al calore ma con viscosità elevata

che ne limita la profondità d'azione. La polimerizzazione è influenzata dalla presenza di umidità se i siliconi non sono adeguatamente additivati o veicolati in solventi idonei

- ***Micro-emulsioni siliconiche:*** veicolate in fase acquosa, offrono una diffusione e distribuzione più uniforme anche in murature parzialmente sature
- ***Siliconati:*** reagiscono con l'umidità presente nella muratura, generando composti insolubili con parziale effetto occludente. La loro reattività è favorita da un ambiente sufficientemente umido e alcalino, mentre risulta limitata in supporti poco porosi o a basso pH.
- **Formulazioni a base di stearati o poliesteri fluorurati:** compatibili anche in presenza di forti concentrazioni saline. Buone qualità di diffusione e idrorepellenza, ma con costi elevati. La loro applicazione è ancora circoscritta a interventi specialistici a causa dei vincoli normativi e della mancanza di linee guida consolidate per l'utilizzo in ambito storico-monumentale.

Formulati ibridi

La ricerca si concentra sempre più su solventi a base acquosa per ragioni normative e operative: maggiore compatibilità ambientale, maggiore sicurezza per gli operatori e maggiore compatibilità con murature caratterizzate da elevata umidità e concentrazione di sali solubili. [EMERISDA (2014); EMERISDA (2015); Musso]

Parallelamente, si sta diffondendo l'impiego di formulati in crema [Stastny (2021)], perchè permettono maggiore controllo in fase applicativa: dosaggio preciso e localizzato, minori dispersioni in cavità o fessure non visibili, semplicità di chiusura dei fori, tempi e costi contenuti.

Una tendenza particolarmente significativa riguarda l'affermazione di sistemi combinati, ovvero formulati che uniscono l'effetto occludente a quello idrorepellente (es. silicati + siliconati), sfruttando sinergicamente meccanismi fisici e chimici per interrompere la risalita capillare. Questa strategia si dimostra particolarmente efficace in murature eterogenee o complesse, dove la sola occlusione meccanica o l'idrofobizzazione superficiale risulterebbero insufficienti.

4.3.2.1.2 PREPARAZIONE DELLA MURATURA

Per la corretta esecuzione delle iniezioni chimiche occorre un'adeguata preparazione della muratura.

Si procede con la rimozione degli eventuali strati di finitura per un'altezza di almeno 80–100 cm sopra la linea visibile dell'umidità di risalita. Questa operazione favorisce la successiva asciugatura della muratura e riduce la concentrazione di sali igroscopici accumulati in superficie, migliorando anche l'apporto di ossigeno necessario alla polimerizzazione di alcuni prodotti (es. siliconati). [Lombardi (2005); Musso]

Le superfici devono essere pulite da efflorescenze, residui organici e materiali incoerenti. In presenza di elevate concentrazioni saline può rendersi necessaria una fase di desalinazione. Inoltre, è importante sigillare le fessure più ampie per evitare percorsi preferenziali che possano alterare la diffusione del formulato.

Se la muratura present un elevato tasso di umidità, è opportuno favorire una parziale asciugatura per agevolare la diffusione capillare del prodotto.

Prima della perforazione è necessario verificare la presenza di impianti sottotraccia. I fori vengono praticati a un'altezza di 15-20 cm sopra la quota dei pavimenti, con una distanza di 10-15 cm tra loro.

Nei muri di spessore inferiore a 45-60 cm è sufficiente operare da un solo lato, raggiungendo circa ¾ dello spessore murario. Oltre tale limite si interviene da entrambi i lati. [Lombardi (2005)]

Per murature fino a 2m di spessore si impiegano trapani a rotopercussione con punte lunghe; oltre tale misura si utilizzano perforatori pneumatici o carotatrici elettriche.

Il diametro dei fori varia in funzione del sistema di immissione: da circa 10 mm per trasfusori a bassa pressione fino a 24-30 mm per sistemi a diffusione [Lombardi (2005); Musso]. I fori possono essere praticati con diverse inclinazioni: orizzontale per prodotti viscosi iniettati a bassa pressione e con inclinazione compresa tra 30° e 45° verso il basso per formulati liquidi a lenta trasfusione.

La distribuzione dei fori deve essere modulata in funzione della natura costruttiva della muratura. Nei muri in mattoni pieni, i fori possono essere praticati nei giunti di malta se i mattoni risultano asciutti, oppure direttamente nel laterizio, seguendo uno schema che prevede un foro nei mattoni posti di testa e due nei mattoni posti di piatto, disposti su una sola linea. Nei muri in calcestruzzo si realizza una sola fila di fori, mentre nei muri misti o in ciottoli si interviene esclusivamente sul legante e su doppia fila, rispettivamente a 10 e 20 cm dal piano di calpestio.

Le murature in pietra naturale, soprattutto se di tipo irregolare o di grande pezzatura, pongono sfide particolari. Nei casi in cui il materiale lapideo non sia assorbente, i fori vengono eseguiti solo nel legante. Per murature in pietra con elementi di varie dimensioni, è opportuno distribuire i fori nella malta attorno a ciascun elemento, saturando una fascia superiore alla pietra di dimensione maggiore. Analogamente, nelle murature a sacco occorre distinguere tra il paramento esterno e il riempimento interno, trattandoli con prodotti e tecniche differenti. Gli angoli, le giunzioni e gli incroci murari, essendo aree in cui l'umidità tende ad accumularsi con maggiore intensità, richiedono una densità maggiore di perforazioni.

In casi in cui i fori vengano disposti su più linee, è raccomandabile sfalsarli verticalmente, creando una sorta di maglia triangolare. Questa configurazione garantisce una copertura più continua e omogenea, particolarmente efficace in presenza di fessurazioni o disomogeneità nel tessuto murario.

A conclusione delle operazioni, i fori devono essere puliti con acqua o aria compressa per eliminare il materiale incoerente che potrebbe ostacolare la diffusione del formulato.

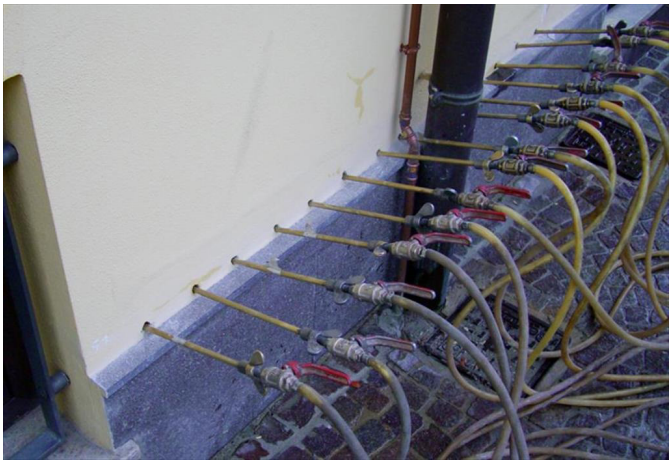


Fig. 30 | Iniezioni a bassa pressione [Fonte: Edile Zanola, "Iniezione per umidità da risalita con garanzia ventennale", https://www.edilezanola.it/it/servizi/risanamenti-da-umidita-e-isolamento/iniezioni-per-barriera-contro-umidita.html (consultato il 24/09/2025)]

4.3.2.1.3 TIPOLOGIE E MODALITÀ DI INIEZIONE

Le tecniche di iniezione si distinguono principalmente in base alla pressione di applicazione e al conseguente meccanismo di diffusione del prodotto all'interno del sistema poroso della muratura. In genere, si riconoscono due approcci principali [Castelluccio, Vitiello (2016); EMERISDA (2014); Lombardi (2005); Lopez-Arce (2009); Musso]: l'iniezione a lenta trasfusione e l'iniezione a pressione.

La scelta del sistema più idoneo deriva dal confronto tra le proprietà del prodotto (viscosità, tipo di solvente, tempi di polimerizzazione) e i parametri del supporto (spessore, porosità, grado di saturazione, contenuto salino) [Musso].

Iniezioni a pressione

L'iniezione a pressione è particolarmente indicata per murature omogenee di spessore contenuto.

Il principio operativo si basa sull'immissione controllata del formulato all'interno mediante pompe pneumatiche, collegate a più iniettori (generalmente da 1 a 10) fissati nei fori eseguiti alla base della parete (Fig. 30). [Castelluccio, Vitiello (2016); Lombardi (2005); Lopez-Arce (2009)]

Gli iniettori, spesso costituiti da tubicini in rame del diametro di 10 mm, sono dotati di valvole di tenuta e manometri per il controllo della



Fig. 31 | Impregnazione a lenta diffusione [Fonte: IdeeGreen, "Barriera chimica contro l'umidità di risalita", https://www.ideegreen.it/barriera-chimica-umidita-48667.html (consultato il 24/09/2025)]

pressione. Il loro posizionamento segue una sequenza calibrata, sia in termini di interasse che di profondità progressiva (da 9–10 cm fino a 20–22 cm o più, in funzione dello spessore murario).

Durante la fase iniziale, la pressione viene mantenuta al di sotto di 1 atm per evitare stress meccanici sul paramento; successivamente può essere gradualmente incrementata fino a 4–7 atm. La durata di ciascun ciclo di iniezione è generalmente limitata a 35–40 secondi.

L'iniezione, fino a rifiuto (ovvero fino a quando il prodotto fuoriesce dal foro), è seguita da sigillatura e prolungamento dei fori con una seconda serie di immissioni a profondità maggiore.

Rispetto alla trasfusione per gravità, la tecnica a pressione presenta una maggiore rapidità esecutiva.

Impregnazione a lenta diffusione

L'impregnazione a lenta diffusione sfrutta il principio della capillarità per veicolare il formulato chimico in modo graduale e controllato all'interno della muratura.

Il sistema si basa sull'impiego trasfusori, dispositivi a rilascio lento costituiti da spugne o materiali porosi saturi di soluzione attiva, inseriti nella muratura in fori orizzontali. Il formulato penetra nel materiale da costruzione grazie alla combinazione tra capillarità e gravità (Fig. 31). [Castelluccio, Vitiello (2016); Lombardi (2005);Lopez-Arce (2009)]

Il meccanismo opera a pressione atmosferica, con una lieve spinta idrostatica generata dal dislivello tra il livello del liquido nel trasfusore e il foro d'immissione. Tale pressione, seppur minima, può gnerare fenomeni di dispersione del prodotto in murature degradate, fessurate o incoerenti. Pertanto, per evitare l'accumulo di eccessiva pressione idrostatica, è consigliato mantenere basso il livello del liquido nei trasfusori e reintegrarlo manualmente in più riprese.

La durata del processo varia sensibilmente in funzione della porosità del materiale e delle condizioni ambientali.

Questa tecnica tende a saturare in modo omogeneo i pori del materiale, minimizzando il rischio di sacche d'aria o di zone non trattate.

Sistemi di trasfusione per paraffine

Tra le soluzioni meno diffuse rientra l'immissione di paraffine fuse nella muratura. Questa tecnica rappresenta una variante non convenzionale di iniezione chimica che si distingue sia per il principio fisico di funzionamento che per le ondizioni operative richieste.

L'intervento prevede innanzitutto il riscaldamento controllato della muratura, mediante condotti elettrici inseriti nei fori praticati alla base della parete. Le resistenze, collegate a centraline a bassa tensione (24 o 48 V), innalzano la temperatura interna fino a circa 80 °C, valore necessario per garantire la fluidità della paraffina. [Musso]

Parallelamente, la paraffina viene riscaldata in recipienti metallici e mantenuta allo stato liquido con resistenze integrate. Il materiale viene quindi immesso nei fori riscaldati per capillarità e gravità; la formazione di aureole scure sulla superficie muraria segnala l'avvenuta diffusione in profondità. Al termine del processo, la paraffina solidifica formando una barriera impermeabile continua.

L'applicazione di questo sistema presenta

criticità rilevanti, sia sotto il profilo operativo che conservativo.

I tempi di trattamento risultano lunghi e le alte temperature possono generare stress termici potenzialmente dannosi per l'organismo edilizio. Inoltre, essendo una soluzione di nicchia, la sua applicazione richiede una supervisione tecnica esperta.

Iniezioni sottovuoto

L'iniezione sottovuoto è adottata in casi in cui è necessario potenziare la capacità di penetrazione del formulato all'interno della muratura e si basa sulla creazione di una pressione negativa controllata (vuoto dinamico del 90–95%).

Per ottenere questo effetto, la porzione di muratura interessata viene sigillata con fogli di polietilene e sottoposta a depressurizzazione attraverso appositi dispositivi. In questo modo, viene rimossa l'aria intrappolata nei vuoti capillari, riducendo la resistenza opposta all'infiltrazione del formulato e favorendone una distribuzione più omogenea e profonda.

Sebbene l'iniezione sottovuoto offra potenzialità elevate in termini di profondità e uniformità di penetrazione, la sua applicazione è confinata a interventi sperimentali e risulta adatta a murature poco porose e parzialmente sature. La tecnica richiede, inoltre, strumentazione specifica, personale qualificato e un rigoroso controllo dei parametri di applicazione (pressione, tempo di mantenimento del vuoto, tempi di iniezione), elementi che ne aumentano la complessità operativa e i costi. [Lombardi (2005); Musso]

4.3.2.1.4 TEMPO DI ATTIVAZIONE E FINITURE

Dopo l'introduzione del formulato nella muratura, è fondamentale considerare il tempo di attivazione o polimerizzazione, variabile in funzione della natura chimica del prodotto e delle condizioni ambientali in cui si opera.

Temperature basse e livelli elevati di umidità relativa tendono a rallentare sensibilmente la reazione chimica, prolungando i tempi fino al 50–60% in più rispetto alle condizioni ideali. [Lombardi (2005)]

Durante e dopo la fase di polimerizzazione, la muratura rimane comunque carica di umidità residua, che deve essere gestita con attenzione per assicurare la durabilità complessiva del trattamento, ad esempio mediante l'impiego di intonaci macroporosi.

Al termine della fase di polimerizzazione, si procede con una serie di operazioni tecniche di completamento:

- Rimozione del formulato in eccesso
- Estrazione degli iniettori o trasfusori
- Sigillatura dei fori con stucco o malta a presa rapida, per evitare perdite di prodotto e infiltrazioni
- Applicazione degli eventuali strati di finitura, da eseguire non prima di almeno 40 giorni dall'intervento

4.3.2.2 VANTAGGI

Nonostante il dibattito ancora aperto sull'efficacia in opera e sulla durabilità a lungo termine dei materiali impiegati, le iniezioni chimiche hanno visto una significativa diffusione grazie a una combinazione di fattori tecnici, economici e operativi che ne rendono spesso conveniente l'impiego [EMERISDA (2014); Stastny (2021)].

Uno dei principali punti di forza è la possibilità di intervenire in modo mirato e localizzato sulla porzione di muratura affetta da risalita capillare, evitando operazioni più distruttive come il taglio meccanico.

Dal punto di vista funzionale, molti prodotti moderni riducono l'assorbimento capillare dell'acqua mantenendo una parziale traspirabilità del supporto, favorendo l'evaporazione dell'umidità residua e riducendo il rischio di condensazioni interne. La riduzione del flusso capillare comporta, inoltre, una conseguente diminuzione del trasporto salino, con benefici sulla conservazione delle superfici. [Lopez-Arce (2009); Socoloski (2019); Stastny (2021); Vanhellemont (2018)]

Va tuttavia sottolineato che l'efficacia è

influenzata da variabili difficili da controllare e richiede una diagnosi preliminare accurata. Diversi casi studio, comunque, riportano riduzioni significative del contenuto idrico e miglioramenti delle condizioni igienico-sanitaria dopo il trattamento. [Sardella (2018); Stastny (2021); Vanhellemont (2018)]

4.3.2.3 Limiti e Criticità

Le iniezioni chimiche presentano limiti significativi da valutare in fase progettuale: compatibilità chimico-fisica tra formulato e supporto, capacità di penetrazione nelle murature, presenza di vuoti o fessurazioni che possono creare percorsi preferenziali e dispersione del prodotto. [Fragata (2016); Lombardi (2005); Lopez-Arce (2009); Moller (2011); Socoloski (2019)]

La variabilità della struttura porosa delle murature, unita alla natura e alla composizione chimica dei formulati, comporta un'elevata incertezza nell'effettivo comportamento in opera. La presenza di sali solubili rappresenta un ulteriore fattore che può interferire con le reazioni chimiche desiderate e favorire fenomeni di sub-efflorescenza, mentre un elevato grado di saturazione della muratura riduce la penetrazione dei prodotti chimici. [Diaz Goncalves (2024); Aiello (2022); Gebbia (2015); Lombardi (2005); Premoli (2015); Socoloski (2019)]

Inoltre, è frequente che le iniezioni non riescano a garantire un blocco totale dell'umidità di risalita capillare, rendendo spesso necessario integrare il trattamento con misure complementari per gestire l'umidità residua [Fragata (2016); Lombardi (2005); Sardella (2018); Seidu (2019)].

Dal punto di vista conservativo, le modifiche introdotte sono permanenti e possono comportare effetti estetici o meccanici indesiderati(alterazioni cromatiche, variazioni di texture...) [EMERISDA (2014); Stastny (2021)]. L'iniezione stessa, che richiede perforazione sistematica della muratura, risulta invasiva e in contrasto con i principi di reversibilità propri del restauro [Castelluccio, Vitiello (2016); EMERISDA (2014); Socoloski (2019)].

4.4

INTERVENTI EVAPORATIVI

4.4 Interventi evaporativi

Accanto alle strategie che interrompono fisicamente l'apporto idrico nella muratura, un secondo filone di interventi affronta la risalita capillare agendo sulla fase successiva dell'assorbimento.

Gli interventi evaporativi fanno parte delle strategie di tipo indiretto in quanto non agiscono sulla causa primaria del fenomeno, ma si basano sul principio di favorire l'evaporazione dai materiali da costruzione, con l'obiettivo di ridurre l'altezza del fronte umido. [Castelluccio, Vitiello (2016); Delgado (2016); EMERISDA (2014); Lombardi (2005)]

Dal punto di vista applicativo, queste soluzioni si propongono di aumentare l'area utile alla traspirazione o di creare condizioni microclimatiche favorevoli alla dispersione del contenuto umido, secondo la teoria che una maggiore capacità evaporativa può compensare, almeno in parte, il continuo apporto idrico proveniente dal suolo [Castelluccio, Vitiello (2016); Delgado (2016)].

4.4.1 Interventi di drenaggio

Gli interventi di drenaggio rappresentano una tecnica consolidata e versatile per il controllo dell'umidità negli edifici, essenziale quando le acque superficiali o di falda compromettono la durabilità e la funzionalità delle strutture, in particolare quelle interrate.

L'obiettivo principale è l'allontanamento controllato delle acque in eccesso dall'organismo edilizio, con conseguente riduzione della pressione idrostatica sulle murature e limitazione dei fenomeni patologici quali imbibizione capillare, infiltrazioni e condensazione superficiale.

È, però, importante non considerare il drenaggio come una soluzione autonoma, ma come componente di un progetto di risanamento integrato.

4.4.1.1 Drenaggio Perimetrale e Sistemi di Captazione Esterni

Il drenaggio perimetrale ha come obiettivo l'intercettazione e la deviazione dell'acqua meteorica e di falda mediante la predisposizione di sistemi di captazione e deviazione idraulica, progettati per ridurre la quantità d'acqua in prossimità delle fondazioni e convogliarla in collettori dedicati, sfruttando la gravità come forza motrice.

I sistemi più diffusi prevedono la realizzazione di trincee o fosse drenanti che costituiscono percorsi preferenziali per il deflusso idrico, in quanto caratterizzati da una sezione più profonda rispetto al terreno circostante e riempiti con materiali ad alta permeabilità (Fig. 32-33). [Diaz Goncalves (2024); Franzoni (2014); Franzoni (2018); Guolo (2024); Musso; Premoli (2015)]

La sezione delle trincee, il materiale filtrante e la presenza di una canalizzazione sono progettati per ridurre l'attrito dell'acqua e aumentarne la velocità di scorrimento rispetto al suolo naturale, consentendo una portata idraulica significativamente superiore a quella che si avrebbe nel terreno non modificato. Questo effetto si basa sul principio del gradiente idraulico e sulla differenza di conducibilità tra substrati: l'acqua, attratta dalla minore resistenza al moto, penetra nello scavo drenante, raggiunge un tubo di scarico posizionato sul fondo e viene indirizzata verso pozzetti assorbenti, collettori di raccolta o impianti di sollevamento.

La tecnica è versatile e modulabile per diversi tipi di terreno. In aree pianeggianti, caratterizzate da stratificazione alternata di strati saturi e assorbenti, può rendersi necessario realizzare pozzi assorbenti che intercettino banchi permeabili (es. ghiaia, sabbia). In questi casi, l'acqua penetra nella colonna verticale del pozzo e viene smaltita nel sottosuolo più

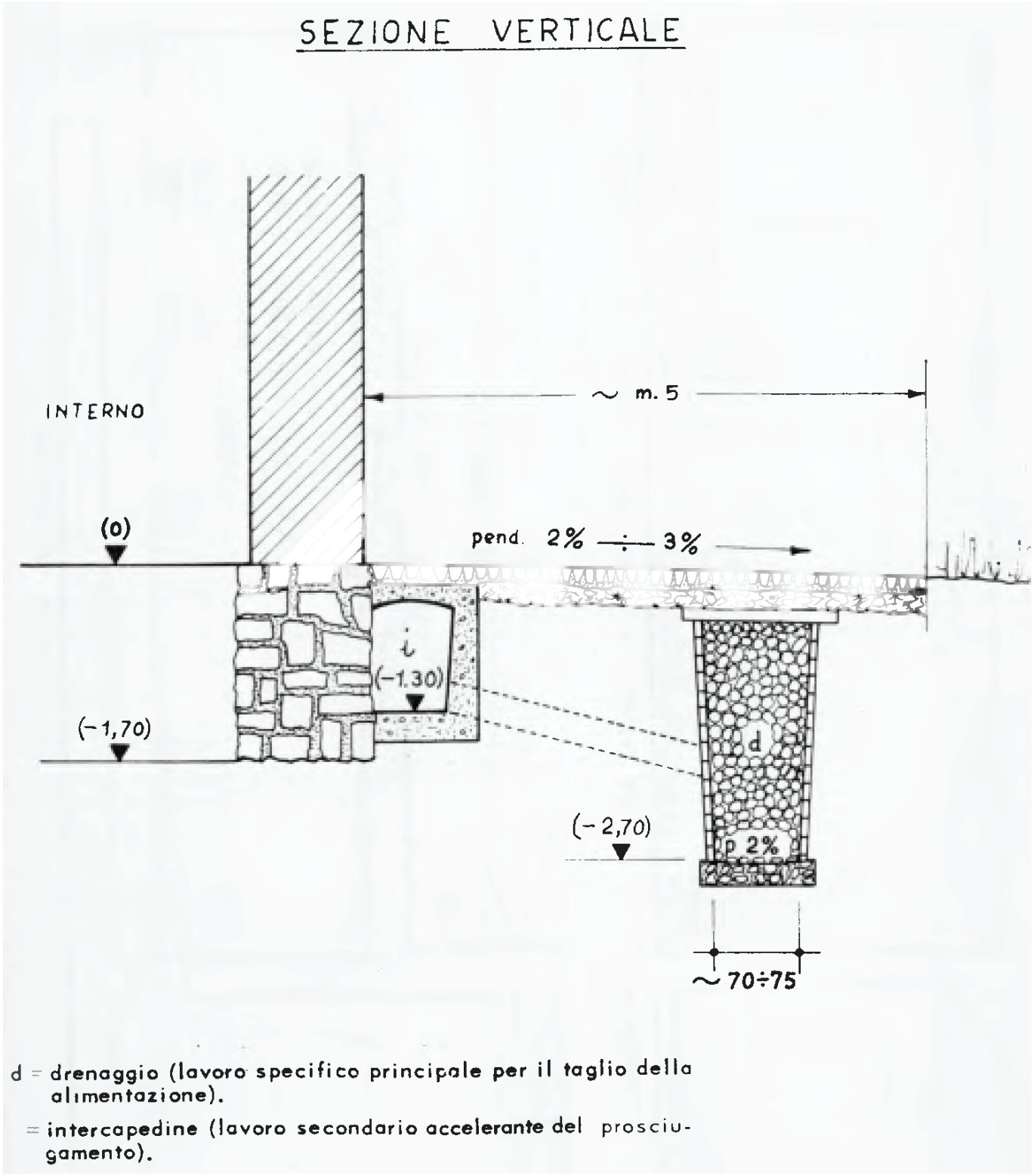


Fig. 32 | Esempio di drenaggio perimetrale in terreno argilloso [Fonte: Massari, G. (1969). L'umidità nei monumenti. Rome Centre]

permeabile per gravità.

La rete drenante perimetrale contribuisce anche alla riduzione delle escursioni stagionali del contenuto idrico nel terreno.

4.4.1.1 METODO DI APPLICAZIONE

L'intervento di drenaggio perimetrale si fonda su una progettazione accurata della rete di drenante, integrata da opere complementari che prevengono infiltrazioni e garantiscono la stabilità del terreno intorno alle fondazioni.

Il drenaggio può essere realizzato mediante lo scavo di trincee e la posa di tubazioni drenanti e pozzi assorbenti, in funzione delle caratteristiche geotecniche del sito.

La configurazione della rete varia in base al grado di compattezza e permeabilità del suolo. La distanza tra fosse drenanti è mediamente 8-12 m per suoli argillosi, 12-16 m per limi e 16-20 m per sabbie. In assenza di pendenza si impiegano collettori o condotti interrati, tipicamente con diametro dell'ordine di 50-70 cm, posizionati nelle zone di massima inclinazione. [Musso]

Lo scavo perimetrale si effettua a distanza dalla muratura in funzione della compattezza del terreno (circa 50-150 cm in suoli compatti; fino a circa 2 m o più su terreni instabili) e la trincea deve raggiungere almeno la base delle fondazioni. Alla base dello scavo viene posizionato un tubo drenante che convoglia le acque verso uno scarico controllato (es. pozzo pendente o fognatura). In presenza di strati profondi molto permeabili, come banchi di ghiaia, la posa del tubo può essere evitata prolungando lo scavo fino a tali livelli, sfruttando così un drenaggio naturale estremamente efficace. Il fondo della trincea viene sagomato con pendenza 2-4% e riempito a secco con ciottoli di granulometria decrescente, con l'adozione di membrane geotessili o geocompositi che impedisce la migrazione delle particelle più fini verso il basso, preservando la funzionalità drenante. [Guolo (2024); Lombardi (2005)]

Per limitare l'imbibizione del terreno adiacente alle murature si realizza un marciapiede impermeabile con adeguata pendenza e stratigrafia che allontani le acque meteoriche dalle fondazioni.

I pozzi assorbenti, utilizzati quando è necessario un abbassamento significativo della falda, possono raggiungere 10-15 m di profondità. Dotati di aperture per la captazione dell'acqua, le pareti sono rivestite con geotessili per mantenere nel tempo la capacità drenante. [Musso]

Il prosciugamento del terreno può ridurre temporaneamente la portanza del suolo, provocando cedimenti progressivi prima di un definitivo assestamento. Per questo motivo è necessario valutare l'impatto meccanico e, se necessario, prevedere interventi preventivi di consolidamento, limitando la velocità di *dewatering*.

Prima di qualsiasi modifica al sistema idrogeologico devono essere condotte indagini geologiche, litologiche e idrologiche.

4.4.1.2 VANTAGGI

Gli interventi di drenaggio offrono un vantaggio fondamentale: riducendo il contenuto idrico del terreno attorno all'organismo edilizio, abbassando la pressione idrostatica sulle murature, con conseguente diminuzione del rischio di imbibizione capillare delle murature. A livello di ambito urbano o lotti edilizi, soluzioni integrate su larga scala consentono un controllo efficace delle acque e migliorano la durabilità complessiva delle strutture.

Dal punto di vista tecnologico, l'uso di materiali tecnologicamente avanzati (geocompositi, tubazioni flessibili, sensori di monitoraggio) consente di migliorare l'affidabilità dell'intervento e semplificare la manutenzione programmata e preventiva.

La natura poco invasiva di questi sistemi li rende facilmente integrabili nei contesti esistenti, preservando l'estetica e la funzionalità degli edifici.

4.4.1.3 LIMITI E CRITICITÀ

I drenaggi perimetrali agiscono in modo parziale sull'apporto idrico e sulla pressione idrostatica

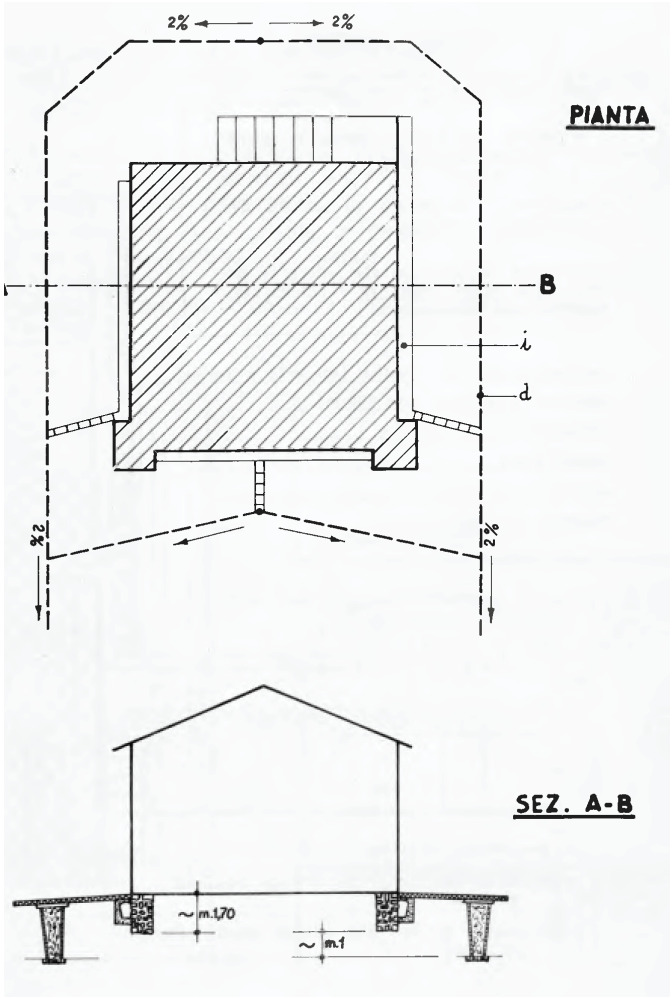


Fig. 33 | Esempio di drenaggio perimetrale del terreno realizzato intorno ad un'antica villa della Campagna Romana [Fonte: Massari, G. (1969). L'umidità nei monumenti. Rome Centre]

sulle murature: non risolvono la risalita capillare che si origina dal contatto diretto tra struttura e terreno sottostante le fondazioni e non incidono sulle murature interne o nei locali più lontani dal perimetro [Lombardi (2005); Moller (2011); Musso].

L'efficacia del sistema dipende dalla qualità progettuale e dalla manutenzione: occlusioni da sedimenti, assenza di valvole antiriflusso, malfunzionamento delle pompe di sollevamento, filtri inadeguati, possono vanificare i benefici del drenaggio e provocare ristagni con conseguente peggioramento delle condizioni igrometriche. [Guolo (2024)]

Infine, gli scavi sono spesso complessi e costosi e possono modificare temporaneamente la portanza del terreno con rischio di dissesti.

4.4.1.2 Vespaio Aerato e Soluzioni Orizzontali Di Drenaggio

In presenza di vincoli di accesso perimetrale o ad integrazione dei sistemi perimetrali di drenaggio, le soluzioni di drenaggio orizzontale mirano ad interrompere il contatto diretto tra terreno umido e struttura edilizia, creando una barriera fisica e una zona tecnica asciutta isolando la chiusura orizzontale di base della costruzione (Fig. 34). Questa soluzione riduce il trasferimento capillare di umidità e limita i fenomeni di condensa dovuti ad escursioni termo-igrometriche tra suolo e ambiente interno.

Il vespaio aerato è realizzato tramite una doppia struttura "pavimentale" che genera un'intercapedine ventilata. Tale intercapedine garantisce: continuità drenante, ventilazione, portanza e stabilità per il sovraccarico di esercizio; isolamento termico e può, inoltre, alloggiare gli impianti. [Musso; Premoli (2015)]

Elemento funzionale essenziale del vespaio orizzontale è il sistema di ventilazione, che consente la rimozione dell'umidità per diffusione e convezione. Il ricambio d'aria può essere naturale (bocche di aerazione perimetrali che sfruttano l'effetto camino) o forzato.

4.4.1.2.1 METODO DI APPLICAZIONE

La corretta realizzazione di un vespaio aerato richiede una sequenza operativa definita e la scelta dei giusti materiali. [Gebbia (2015); Premoli (2015)]

Nel metodo tradizionale la sequenza operativa prevede lo scavo del terreno, la preparazione e la compattazione del letto di posa e la suddivisione dell'area in settori (tipicamente 2x2 m) per agevolare la posa manuale del riempimento. Il materiale drenante è costituito da pietrame a granulometria decrescente verso l'alto, per uno spessore di circa 30 cm.

Sopra questo strato si esegue un massetto dello spessore di circa 10–12 cm, seguito dalla posa dello strato impermeabile. È buona

norma che l'impermeabilizzazione prosegua verticalmente per almeno 50 cm lungo le pareti perimetrali, superando di circa 10 cm la quota di calpestio. Infine, si realizza il pavimento con il relativo sottofondo, oppure si ricolloca quello preesistente, e si completano i lavori con l'apertura di bocche di ventilazione sui muri perimetrali. [Musso]

Una variante storica, nota anche in epoca romana, è il gattaiolato. Questo sistema prevede la realizzazione di una camera d'aria sostenuta da muretti paralleli in laterizio (30-80 cm di altezza ad interasse di almeno 40 cm). I muretti, posati su uno strato impermeabilizzante o piccoli plinti, sostengono il solaio in tavelloni, voltine o calcestruzzo armato.

Un'evoluzione di questo sistema impiega casseri a perdere (igloo) modulari con fianchi aperti per favorire la circolazione d'aria. Questi elementi vengono incastrati tra loro per formare una struttura stabile e al di sopra si colloca una rete elettrosaldata e si procede alla gettata di calcestruzzo, seguita dalla realizzazione della pavimentazione. [Musso]

Indipendentemente dal tipo di vespaio è opportuno realizzare le aperture per la ventilazione su pareti opposte per assicurare una corretta ventilazione. [Musso; Premoli (2015)]

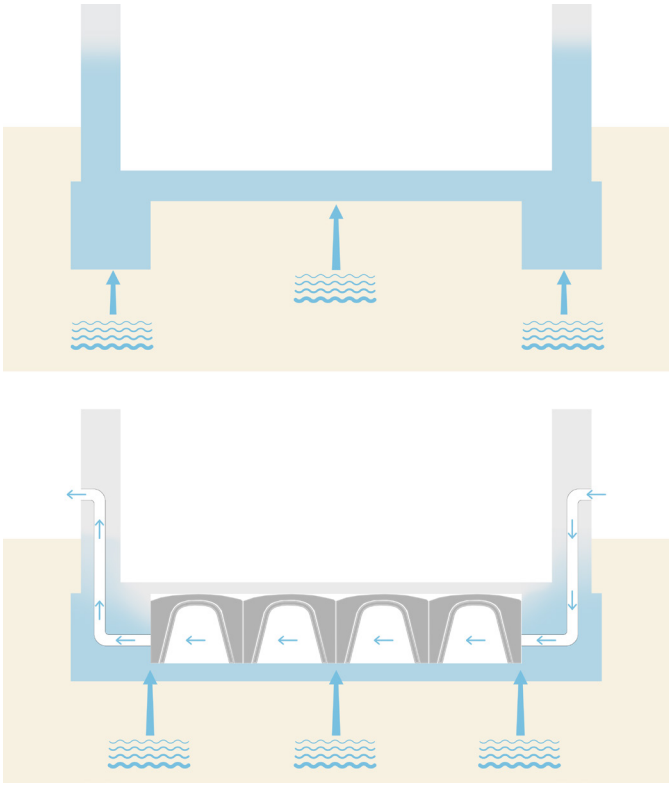


Fig. 34 | Funzionamento di un vespaio aerato

4.4.1.2.2 VANTAGGI

L'impiego di vespai aerati e soluzioni con intercapedini drenanti orizzontali rappresenta un approccio tecnico avanzato per il miglioramento delle condizioni igieniche e termoigrometriche degli ambienti a contatto diretto con il terreno. [Premoli (2015)]

La ventilazione dell'intercapedine, naturale o forzata, attiva processi di diffusione e convezione che mantengono asciutta la massa d'aria al di sotto del piano di calpestio. Ciò contribuisce a ridurre l'umidità relativa degli ambienti migliorandone il comfort termo-igrometrico e la salubrità.

Dal punto di vista energetico, la combinazione tra ventilazione e isolamento termico riduce, inoltre, le dispersioni di calore, incrementando l'inerzia termica dell'edificio e riducendo il fabbisogno energetico per la climatizzazione.

Un ulteriore vantaggio tecnico riguarda la possibilità di integrare, all'interno dell'intercapedine, impianti tecnologici.

Nei contesti storici, l'adozione di un vespaio aerato consente di intervenire senza modificare in modo significativo la struttura portante esistente, offrendo un'opportunità di riqualificazione compatibile con le esigenze conservative. La flessibilità dei sistemi modulari permette, infatti, di adattare l'intervento a una grande varietà di condizioni costruttive, sia nelle nuove costruzioni che nel patrimonio architettonico esistente.

4.4.1.2.3 LIMITI E CRITICITÀ

Sebbene il sistema rappresenti una soluzione efficace per la gestione dell'umidità negli ambienti interrati, ha diverse criticità.

Un primo limite è di natura morfologico-strutturale: si tratta di interventi invasivi, che

comportano modifiche alle quote interne e alla stratigrafia delle chiusure orizzontali esistenti. Negli edifici storici, dove la conservazione delle pavimentazioni originali e delle altezze architettoniche è spesso un vincolo imprescindibile, queste trasformazioni sono difficilmente compatibili.

Un ulteriore elemento di criticità è rappresentato dalla complessità impiantistica associata alla gestione delle acque drenate. In assenza di un sistema di drenaggio efficiente, l'intercapedine può trasformarsi in un punto di accumulo, esponendo l'ambiente a rischi di allagamento, specialmente in occasione di eventi meteorici intensi o di risalite di falda [Moller (2011)].

Dal punto di vista manutentivo, il sistema richiede interventi periodici per evitare l'occlusione dei canali di ventilazione.

Inoltre, come nel caso dei sistemi di drenaggio perimetrale, il sistema non risolve la risalita capillare che si origina dal contatto diretto tra struttura e terreno sottostante le fondazioni.

4.4.2 Sifoni atmosferici

I sifoni atmosferici (Fig. 35), comunemente noti come sifoni o tubi Knapen, sono dispositivi ideati nei primi decenni del '900 dal belga Achille Knapen per favorire l'asciugatura delle murature umide mediante ventilazione naturale [Agyekum (2019); EMERISDA (2014); Franzoni (2014); Franzoni (2018); Lombardi (2005); Musso; Seidu (2019); Torres (2018)].

Il principio teorico ipotizzato da Knapen si basava su una concezione intuitiva e semplificata dei fenomeni di scambio d'aria e di umidità tra muratura e atmosfera. Egli supponeva che, introducendo tubi porosi inclinati nei muri umidi, l'aria interna venisse spinta verso l'esterno generando un lento ricambio d'aria: il modello proposta stabiliva un parallelo tra il comportamento dei liquidi immiscibili, come acqua e olio, dove il fluido più pesante tende a spingere quello più leggero verso l'alto, e quello dell'aria umida rispetto a quella secca.

Tale analogia risulta tuttavia concettualmente errata, poiché a differenza dei liquidi, l'aria non possiede una densità costante, ma varia in funzione della temperature e del contenuto di vapore acqueo. [EMERISDA (2014); Lombardi (2005); Premoli (2015); Seidu (2019); Torres (2018)]

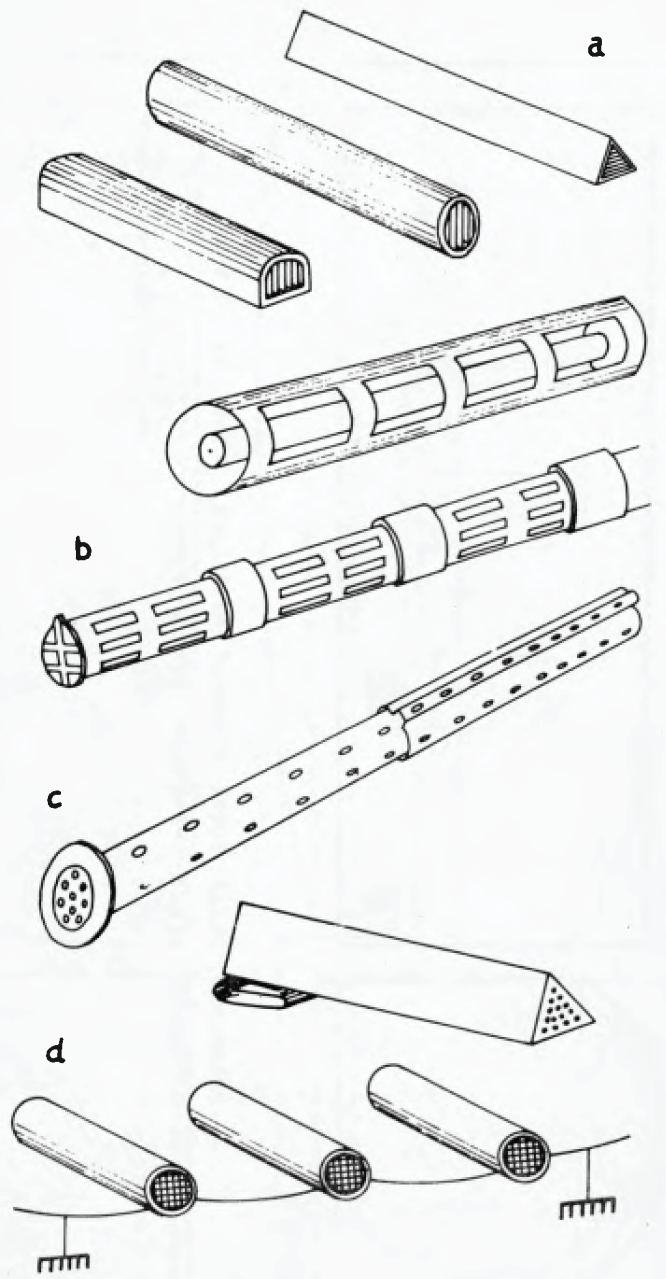


Fig. 35 | Esempi di sifoni atmosferici [Fonte: Massari, G. (1969). L'umidità nei monumenti. Rome Centre]

Infatti, affinché si verifichi l'ipotesi di Knapen è necessario che l'aria umida interna sia più fredda e densa di quella esterna, condizione raramente stabile nel tempo. Ciononostante, tali dispositivi sono stati ampiamente utilizzati fino agli anni '70, prima di essere progressivamente

sostituiti da interventi chimici ed elettrofisici. [Lombardi (2005)]

4.4.2.1 Metodo Di Applicazione

L'intervento prevede la realizzazione, nella parte esterna della muratura, di fori ad una quota compresa tra 15 e 30 cm dal piano di campagna (con maggiore concentrazione di umidità) con interasse variabile dai 20-30 cm, eseguiti sulla stessa linea orizzontale o con disposizione sfalsata. [Guolo (2024); Lombardi (2005)]

Ciascun foro è inclinato verso il basso con un'angolazione compresa tra 15° e 30°, e raggiunge una profondità pari a circa 2/3 dello spessore murario. [Guolo (2024); Lombardi (2005)]

Il diametro medio dei fori è di circa 3 cm, valore che consente l'inserimento dei sifoni, di lunghezza variabile tra 5 e 10 cm. I sifoni possono avere sezione triangolare, circolare o pentagonale e sono realizzate in materiali porosi come ceramica, plastica o metallo; in origine venivano impiegati elementi in argilla cotta, apprezzati per le loro proprietà igroscopiche. [Guolo (2024); Lombardi (2005); Premoli (2015)]

La foratura può essere eseguita manualmente nel caso di murature tenere e omogenee, o meccanicamente (trapano o carotatrice). In entrambi i casi è fondamentale che le pareti del foro siano regolari e prive di fratture per garantire un corretto accoppiamento tra i materiali.

Prima dell'inserimento del sifone, viene steso un letto di malta altamente porosa per favorire il passaggio dell'umidità dalla muratura all'interno del tubo. È, inoltre, essenziale che il contatto tra malta, tubo e muratura sia continuo e privo di cavillatura per evitare di compromettere la funzionalità del sistema.

All'estremità esterna, il sifone viene protetto mediante una griglia o rete metallica che impedisce l'ingresso di insetti, piccoli animali o corpi estranei che potrebbero ostruire il passaggio dell'aria. Infatti viene raccomandata una manutenzione periodica ogni 3-4 anni, finalizzata alla pulizia interna dei tubi e alla rimozione di eventuali ostruzioni.

Una variante del sistema, nota come ventilazione Knapen, prevede la disposizione dei fori su più livelli della muratura (inferiore, mediano e superiore), spesso su facce contrapposte, in modo da sfruttare le differenze di temperatura e pressione che si generano e favorire un modo convettivo naturale che incrementa la capacità traspirante dell'involucro e il controllo igrometrico complessivo.

4.4.2.2 Vantaggi

Un vantaggio del sistema a sifoni atmosferici risiede nella semplicità esecutiva e nell'assenza di componenti meccanici o impiantistici [Lombardi (2005)].

I sifoni Knapen non alterano il comportamento igroscopico dei materiali, ma si limitano a stimolare una ventilazione incentivando un lento e progressivo processo di asciugatura.

Dal punto di vista gestionale, il sistema offre vantaggi in termini di manutenzione periodica: le operazioni di pulizia sono semplici, localizzate e non invasive.

4.4.2.3 Limiti e Criticità

L'impiego dei sifoni atmosferici come sistema di deumidificazione è stato oggetto di numerose analisi, che ne hanno evidenziato la scarsa efficacia in contesti reali (Fig. 36).

Il principale limite risiede nella debolezza del presupposto teorico su cui si basa il sistema: la densità dell'aria dipende, infatti, dal complesso equilibrio tra temperatura e umidità relativa e non garantisce la formazione di un flusso stabile nella direzione auspicata. In molti casi, il modo d'aria all'interno del tubo è risultato nulla o addirittura inverso, annullando l'effetto previsto. [EMERISDA (2014); Lombardi (2005)]

Durante la stagione invernale, la muratura può risultare più calda dell'aria esterna, impedendo il deflusso dell'umidità; viceversa, nei mesi estivi, l'irraggiamento solare tende a riscaldare l'aria contenuta dei tubi, rendendola più leggera e incapace di fuoriuscire. In presenza di elevata umidità atmosferica, inoltre, si possono

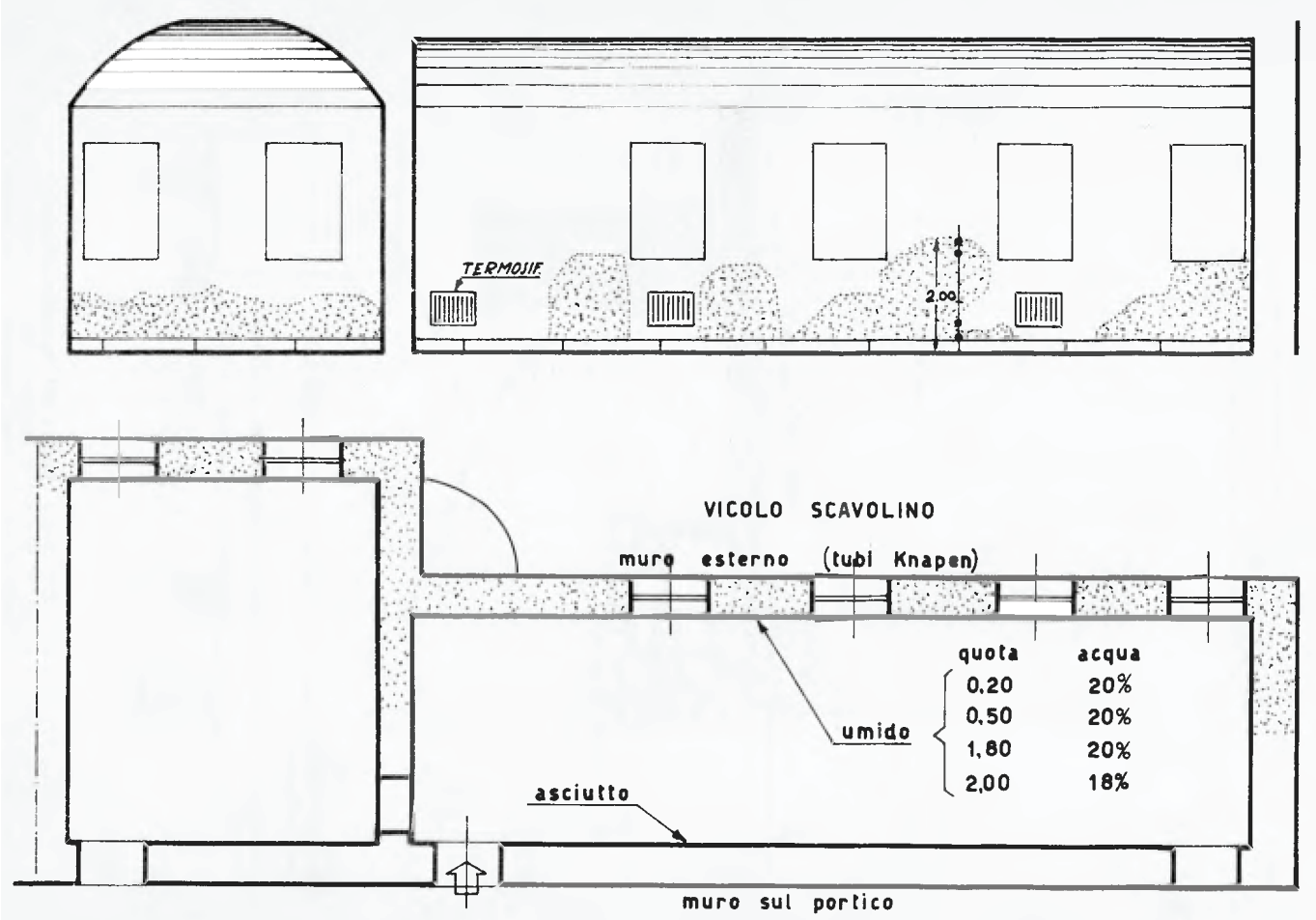


Fig. 36 | Inefficacia dei tubi Knapen nel Palazzo dell'Accademia di San Luca a Roma a distanza di trent'anni dalla loro applicazione [Fonte: Massari, G. (1969). L'umidità nei monumenti. Rome Centre]

verificare fenomeni di condensazione all'interno degli stessi sifoni, che contribuiscono in questo modo ad un aumento del contenuto umido delle murature. [EMERISDA (2014); Guolo (2024); Musso; Premoli (2015); Seidu (2019)]

Questo effetto è aggravato dall'accumulo di sali igroscopici che si depositano all'interno dei tubi, riducendone la porosità e favorendo ulteriori assorbimenti di vapore. [EMERISDA (2014); Musso; Premoli (2015); Seidu (2019)]

Infine, la compatibilità con il patrimonio edilizio storico costituisce un ulteriore limite. La foratura sistematica delle pareti compromette l'integrità materica delle murature e ne altera le caratteristiche estetiche.

4.4.2.4 Varianti

A partire dallo stesso principio fisico alla base dei sifoni di Knapen, sono state sviluppate alcune varianti che ne modificano materiali e geometrie.

Tra le più note si annoverano le pietre drenanti, il sistema Schrijver (particolarmente diffuso nei Paesi Bassi) e gli airbricks. [EMERISDA (2014)]

Le ***pietre drenanti***, elementi simili ai mattoni forati con geometrie aerodinamiche, vengono installate a intervalli regolari (in genere ogni 30 cm) alla base della muratura umida.

La forma dei fori è studiata per indurre una ventilazione naturale capace di favorire l'asciugatura della muratura, sfruttando le differenze di temperatura e umidità relativa tra

interno ed esterno.

Il ***sistema Schrijver*** (Fig. 37-38), concettualmente affine, è composto da elementi cavi originariamente realizzati in laterizio e oggi prodotti in materiale plastico personalizzabile. Secondo il principio dichiarato dai produttori, l'aria che attraversa i dispositivi raffredda le camere interne, provocando la condensazione dell'umidità al loro interno. Quest'acqua viene poi espulsa verso l'esterno grazie allo stesso flusso d'aria che ha generato il raffreddamento.

Tuttavia, la letteratura scientifica ha sollevato dei dubbi sull'efficacia di questa soluzione. Una campagna di monitoraggio condotta dal TNO ha confrontato per un anno murature trattate e non trattate all'interno dello stesso edificio, rilevando assenza di miglioramenti significativi e, in alcuni casi, un incremento del contenuto umido rispetto ai valori iniziali. [EMERISDA (2014)]

Gli ***airbricks***, invece, pur fondandosi anch'essi sul principio della ventilazione naturale, sono destinati principalmente all'aerazione di intercapedini e pavimentazioni galleggianti, prevenendo il ristagno di umidità in questi volumi. A differenza delle soluzioni precedenti, non agiscono direttamente sulla muratura umida e non sono concepiti per favorire l'evaporazione dell'umidità capillare nei materiali da costruzione. Il loro impatto sulla deumidificazione risulta pertanto indiretto e limitato. [EMERISDA (2014)]

Dal punto di vista conservativo e prestazionale, pietre drenanti, sistema Schrijver ed airbrick hanno criticità analoghe ai sifoni Knapen.

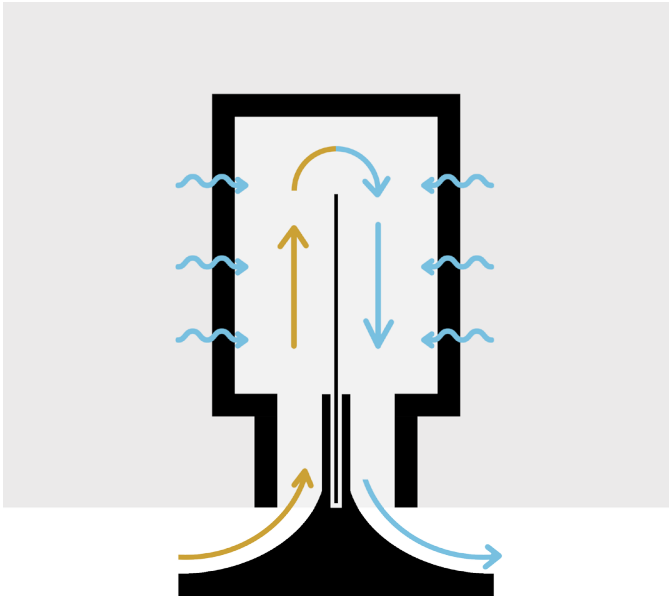


Fig. 37 | Meccanismo di funzionamento del sistema Schrijver



Fig. 38 | Esempio di sistema Schrijver [Fonte: Complete Preservation, "Schrijver System", https://www.completepreservation.co.uk/tag/schrijver-system/ (consultato il 24/09/2025)]

4.4.3 Ventilazione

La ventilazione, intesa come strumento di controllo microclimatico e igroscopico, è tra le soluzioni più diffuse per la gestione dell'umidità negli edifici. La sua efficacia deriva dalla capacità di favorire l'evaporazione dell'acqua contenuta nelle murature e di contenere l'UR interna, con benefici per il comfort abitativo e per la conservazione dei materiali. Tuttavia, non interviene sulle cause primarie dell'umidità, ma agisce come misura di mitigazione dei fenomeni secondari. Pertanto, come nel caso degli interventi di drenaggio, deve essere inserita in un progetto di risanamento più ampio. [Delgado (2016); Premoli (2015); Stastny (2021)]

4.4.3.1 Intercapedini Ventilate

La soluzione delle intercapedini ventilate, o scannafosso, si basa su un principio semplice ed efficace: impedire il contatto diretto tra muratura e terreno umido creando uno spazio vuoto adiacente alla muratura da proteggere. Questo volume intercetta l'umidità proveniente dal terreno prima che raggiunga la struttura, fungendo da barriera passiva e da camera di

compensazione climatica. [Franzoni (2014); Franzoni (2018); Lombardi (2005); Musso; Premoli (2015)]

La ventilazione, elemento essenziale del sistema, può essere garantita attraverso griglie, canalizzazioni o aperture superiori, configurando così differenti modalità di funzionamento a seconda delle esigenze progettuali e delle condizioni ambientali.

La tecnica è applicabile sia nelle nuove costruzioni, dove l'intercapedine può essere dimensionata in fase progettuale, sia negli edifici esistenti.

4.4.3.1.1 METODO DI APPLICAZIONE

La realizzazione di un'intercapedine ventilata deve tener conto delle condizioni tecniche del sito e delle implicazioni statiche, idrologiche e costruttive dell'edificio.

Scavo perimetrale

Si esegue lo scavo lungo il perimetro delle murature da risanare. La larghezza minima del vano è generalmente compresa tra 40-40 cm, in modo da garantire l'ispezionabilità e la ventilazione. In profondità occorre raggiungere almeno la quota di imposta delle fondazioni, o comunque risultare inferiore al piano di calpestio interno.

Lo scavo va condotto per brevi tratti e deve essere puntellato con idonei sistemi di armatura per evitare smottamenti del terreno e preservare la stabilità dell'edificio. [Guolo (2024); Lombardi (2005); Musso]

Realizzazione della muratura di contenimento

Terminato lo scavo occorre realizzare il muro di contenimento, inserendo controventi o setti trasversali ogni 20 m circa per evitare instabilità.

In questa fase occorre prestare attenzione alla connessione meccanica e geometrica con le strutture esistenti per evitare eventuali discontinuità strutturali

Sistema di drenaggio

Per captare e convogliare le acque verso punti di smaltimento sicuri ed evitare il ristagno all'interno dell'intercapedine, sul fondo dello scavo deve essere predisposto un sistema drenante continuo integrato da un canale con pendenza verso i pozzetti di raccolta delle acque.

Chiusura o copertura

La parte superiore può rimanere aperta (protetta da griglie pedonali/carrabili) o essere chiusa con un solaio leggero.

Nel caso di intercapedini chiuse, è obbligatorio prevedere dei fori di aerazione sul muro di contenimento esterno, eseguiti con carotatrici a intervalli regolari, al fine di garantire un adeguato ricambio d'aria e impedire la formazione di zone di condensazione.

4.4.3.1.2 VANTAGGI

L'intercapedine ventilata elimina il contatto diretto tra la muratura ed il terreno umido, interrompendo il percorso dell'acqua e riducendo l'assorbimento idrico da parte della muratura. [Lombardi (2005)]

Dal punto di vista termo-igrometrico, l'intercapedine favorisce la circolazione dell'aria e l'evaporazione dell'acqua, contribuendo a stabilizzare e abbassare l'UR degli ambienti confinanti e riduce la formazione di condensa. [Lombardi (2005); Musso; Premoli (2015); Vitiello, Castelluccio (2019)]

Un ulteriore vantaggio consiste nella sua capacità di agire come barriera meccanica alle vibrazioni esterne, in particolare quelle trasmesse da traffico stradale o da movimenti del terreno. La camera d'aria funge da isolante naturale, attenuando le trasmissioni sonore e meccaniche, con effetti positivi sulla vivibilità degli ambienti sottostanti e sul comfort acustico degli edifici. [Lombardi (2005)]

Dal punto di vista della manutenzione, il sistema è di semplice gestione: controlli e interventi (pulizia, verifica dei drenaggi, ispezioni dei pozzetti) sono localizzati e poco invasivi, e consentono il mantenimento delle prestazioni nel tempo se viene adottata una regolare

programmazione di manutenzione.

4.4.3.1.3 LIMITI E CRITICITÀ

Nonostante l'efficacia comprovata nella mitigazione delle infiltrazioni e nel miglioramento delle condizioni igrometriche, l'applicazione di questa tecnica presenta criticità analoghe ai sistemi di drenaggio perimetrale:

- Vincoli tecnici ed operativi legati allo scavo perimetrale [Guolo (2024); Musso; Premoli (2015)]
- Limitata efficacia contro l'umidità da risalita capillare: necessita di essere integrata con sistemi di sbarramento orizzontale o con tecnologie complementari [Lombardi (2005); Stastny (2021)]
- Richiede una conoscenza approfondita delle condizioni geologiche e idrologiche del terreno circostante

4.4.3.1.4 WALL-BASE VENTILATION

La ***Wall-Base Ventilation*** è una variante evolutiva delle intercapedini ventilate che concentra l'azione della ventilazione alla base delle murature [Agyekum (2019); Delgado (2016); Diaz Goncalves (2024); EMERISDA (2014); Guolo (2024); Torres (2018)].

Il sistema trova applicazione in contesti in cui la quota delle fondazioni è al di sopra del livello della falda freatica: in presenza di un livello piezometrico maggiore la tecnica risulta inefficace o non applicabile.

Un elemento distintivo di questa soluzione è l'impiego di sistemi di ventilazione meccanica igroregolata: sonde termo-igrometriche monitorano le condizioni locali e consentono di modulare l'intensità della ventilazione, prevenendo problemi di condensazione tipiche dei sistemi con ventilazione naturale.

Le ricerche condotte presso l'Università di Porto e l'Università di Coimbra, supportate da modelli numerici, simulazioni e sperimentazioni in laboratorio e in campo, hanno validato l'efficacia del sistema soprattutto in edifici storici, dove il controllo dell'umidità ascendente è particolarmente critico per la conservazione delle murature. Tali studi hanno dimostrato che la ventilazione alla base del muro riduce il livello raggiunto dal fronte umido e migliora le condizioni igrometriche, contribuendo a ridurre il degrado legato all'umidità. [Delgado (2016); EMERISDA (2014); Torres (2018)]

Nonostante i risultati incoraggianti e la validazione pratica, la tecnica non annulla la risalita capillare e presenta gli stessi limiti operativi delle intercapedini ventilate tradizionali. Pertanto sono ancora necessarie ulteriori indagini a lungo termine per approfondire l'efficacia del sistema su diverse tipologie di edifici e materiali, nonché per valutare le implicazioni legate all'accumulo di sali e al degrado dei materiali costruttivi. [Fragata (2016)]

4.4.4 Intonaci risananti

Gli intonaci risananti rappresentano una famiglia di rivestimenti studiati per gestire in modo controllato l'umidità da risalita capillare, mitigandone gli effetti meccanici e chimici e facilitando la migrazione del contenuto umido verso l'esterno della muratura. [Castelluccio, Vitiello (2016); Franzoni (2014); Franzoni (2018); Lombardi (2005); Musso].

Il principio tecnico-funzionale si basa su un bilancio dinamico tra imbibizione ed evaporazione: affinché si verifichi un flusso netto di umidità dall'interno verso l'esterno, è necessario che la velocità di evaporazione superi quella della risalita capillare.

A differenza degli intonaci tradizionali, questi sistemi impiegano malte a porosità controllata, capaci di facilitare il trasporto del vapore e offrire spazio per la cristallizzazione controllata dei sali solubili. Questi meccanismi agiscono in modo complementare, contribuendo alla protezione della muratura senza ostacolare il naturale comportamento igroscopico dei substrati.

La loro funzione deumidificante è legata alla distribuzione equilibrata tra macropori (da 50 a 500 mm di diametro) e micropori (pori di gel di diametro inferiore a 0,5 mm e pori capillari 0,5-50 mm), opportunamente interconnessi.

Dal punto di vista compositivo, gli intonaci risananti possono essere formulati con leganti idraulici naturali, additivi aeranti o porogeni, aggregati minerali leggeri o speciali (come polvere di mattone o sughero), e talvolta anche con componenti idrofobizzanti, destinati a modulare ulteriormente la risposta del materiale all'umidità. La scelta e la combinazione di questi elementi incidono non solo sulla capacità di trasporto e accumulo dell'umidità, ma anche su aspetti cruciali quali la compatibilità con i substrati esistenti, la durabilità del sistema nel tempo e la risposta meccanica ai cicli termo-igrometrici.

Negli ultimi anni sono state sviluppate formulazioni multistrato che combinano traspirazione, idrorepellenza e controllo della cristallizzazione [Bartholdy (2025)].

L'efficacia di tali sistemi, spesso attestata da test su piccola scala o da dichiarazioni di prestazione fornite dai produttori, rimane oggetto di dibattito nella letteratura tecnico-scientifica. Gli studi più recenti suggeriscono che la reale capacità deumidificante degli intonaci risananti non possa essere considerata autonoma, ma debba essere intesa come parte di un intervento integrato, da affiancare ad altre strategie quali barriere chimiche, sistemi di drenaggio o ventilazione.

4.4.4.1 Tipologie

La classificazione degli intonaci risananti presenta un'elevata complessità, dovuta alla sovrapposizione di criteri normativi, funzionali e commerciali che ne rendono ambigua la definizione.

Il principale riferimento normativo è rappresentato dalla norma UNI EN 998-1 (Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni), che individua una categoria specifica "R - malte per intonaci di risanamento". Essa stabilisce i requisiti prestazionali minimi per gli intonaci destinati alla protezione di murature umide e contaminate da sali:

- Resistenza a compressione compresa nella classe CS II (1,5-5,0 N/mm^2)
- Aderenza al supporto conforme al valore dichiarato in laboratorio, con indicazione del tipo di frattura (*fracture pattern*)
- Assorbimento capillare ≥ 0,3 kg/m^2 dopo 24 ore
- Profondità di penetrazione dell'acqua a seguito della prova capillare ≤ 5 mm
- Coefficiente di permeabilità al vapore μ ≤ 15
- Densità apparente a secco (*dry bulk density*) dichiarata dal produttore secondo le modalità di prova normalizzate

Tali requisiti, sebbene forniscano un quadro minimo delle prestazioni meccaniche e fisiche, non descrivono in modo esaustivo il comportamento igrometrico degli intonaci, né la loro capacità di gestione dei sali solubili. Pertanto la norma risulta solo parzialmente rappresentativa delle prestazioni reali nel lungo periodo, specialmente in murature storiche o fortemente contaminate da sali.

A livello europeo, un ulteriore riferimento tecnico, pur non avente valore normativo, è fornito dalla WTA Merkblatt 2-9-04/D (*Sanierputzsysteme – Planung und Ausführung*, edizione 2004). Si tratta di una linea guida elaborata dalla "*Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege*", ampiamente diffusa nei paesi di area germanofona e spesso adottata come standard tecnico volontario anche in altri contesti europei.

In ambito pratico e industriale, la WTA viene comunemente utilizzato dai produttori europei per certificare la qualità funzionale degli intonaci risananti.

Una delle principali criticità riguarda la terminologia impiegata: espressioni come *intonaco deumidificante*, *risanante*, *traspirante* o *macroporoso* vengono spesso usati in modo intercambiabile, anche nella documentazione tecnica e commerciale.

In molti casi, la comunicazione dei produttori enfatizza l'effetto desiderato (deumidificazione), senza chiarire le reali proprietà funzionali del

materiale.

Per una trattazione più coerente è quindi opportuno introdurre una classificazione funzionale degli intonaci risananti, basata su proprietà fisiche, modalità di gestione dei sali e dell'umidità e comportamento nel tempo.

Intonaci deumidificanti e macroporosi

Gli ***intonaci*** comunemente definiti ***deumidificanti*** costituiscono una categoria molto ampia, spesso caratterizzata da una terminologia impropria o fuorviante. Il termine, infatti, suggerisce una presunta capacità autonoma del materiale di contrastare l'umidità muraria (in particolare quella di risalita capillare). In realtà tali prodotti non eliminano il fenomeno, ma si limitano a mitigarne gli effetti, migliorando temporaneamente l'aspetto superficiale della muratura.

In un'accezione più rigorosa, si dovrebbe riservare la definizione di ***intonaco deumidificante*** esclusivamente a quei materiali che favoriscono, in modo comprovato, il trasferimento del vapore acqueo verso l'esterno, contribuendo in modo misurabile al processo di asciugatura della muratura. Tuttavia, come osservato in diversi studi [EMERISDA (2014); EMERISDA (2015); Fragata (2016); Lombardi (2005); Sardella (2021)], questa "capacità deumidificante" raramente è verificata mediante prove sperimentali su sistemi murari reali, e le schede tecniche commerciali forniscono spesso dati parziali o non comparabili.

Gli intonaci deumidificanti agiscono, piuttosto, come sistemi tampone o sacrificabili: sono in grado di assorbire parte dell'umidità proveniente dal supporto murario e di ospitare i sali solubili all'interno della propria matrice porosa, riducendo le sollecitazioni meccaniche e chimiche che interessano lo strato superficiale della muratura.

In condizioni ordinarie, questi intonaci necessitano di una sostituzione periodica (ogni 10–15 anni) a causa della progressiva saturazione salina e del conseguente decadimento delle loro prestazioni.

Dal punto di vista compositivo, gli intonaci deumidificanti si distinguono per una porosità complessiva molto elevata, che può raggiungere il 45% in volume, e per un'ampia distribuzione dimensionale dei pori (0,01-100 µm).

Tra le diverse varianti presenti sul mercato, una sottocategoria particolarmente significativa è rappresentata dagli ***intonaci macroporosi***, sviluppati e normati in ambito europeo, soprattutto in riferimento alle WTA:

- Massa volumica (a secco): < 1400 kg/m³
- Contenuto d'aria: > 20–25%,
- Porosità totale: > 45%
- Assorbimento capillare: > 0,3–1 kg/m²
- Resistenza alla diffusione del vapore (µ): < 18

Le caratteristiche prestazionali di questi intonaci variano in base alla natura del legante (cementizio, calce idraulica, calce aerea) e alla presenza di additivi (aeranti, idrofobizzanti o porogeni).

In virtù della loro struttura leggera e porosa, essi offrono anche una moderata capacità isolante e fonoassorbente.

Prove di laboratorio hanno confermato che la porosità complessiva degli intonaci macroporosi può superare di oltre il 30% quella degli intonaci tradizionali, aumentando in modo significativo la capacità di trasporto e smaltimento dell'umidità.

Un parametro tecnico di riferimento è il coefficiente µ, il cui prodotto con lo spessore dell'intonaco (µ × s) fornisce indicazioni utili sulla capacità complessiva di diffusione del vapore.

Intonaci accumulatori di sali

Accanto agli intonaci deumidificanti, noti anche come *salt-accumulating plasters*, un'altra categoria funzionale è costituita dagli ***intonaci accumulatori di sali***.

A differenza degli intonaci deumidificanti, che mirano principalmente a favorire l'evaporazione dell'umidità e a migliorare la traspirabilità del sistema, gli intonaci accumulatori di sali sono stati concepiti per affrontare in modo più mirato

la problematica della cristallizzazione salina. [Fragata (2016)]

Sono caratterizzati da una struttura porosa e mineralogica attiva, in grado di trattenere selettivamente i sali all'interno della propria matrice e operano come "filtri" sacrificabili: raggiunta la saturazione salina, devono essere rimossi e sostituiti.

Sistemi ventilati multilayer

Un'evoluzione tecnologica recente è rappresentata dagli ***intonaci ventilati multilayer***, progettati per affrontare simultaneamente i problemi di umidità capillare e cristallizzazione salina.

Questi sistemi si distinguono per la combinazione di strati a funzionali diversi:

- Uno strato interno altamente poroso e ventilato, spesso dotato di scanalature verticali per favorire la circolazione dell'aria
- Uno strato esterno con proprietà idrofobiche o a bassa capillarità

Il principio operativo si basa sulla compartimentazione attiva del processo di cristallizzazione: lo strato interno assorbe e trattiene i sali, mentre quello esterno preserva l'integrità estetica e meccanica. In tal modo, la cristallizzazione avviene in un volume controllato e ventilato, riducendo l'insorgenza di efflorescenze e danni superficiali. [Fragata (2016)]

Studi comparativi hanno evidenziato che l'efficacia del sistema dipende dalla composizione del materiale e dalla presenza di componenti idrofobizzanti: nei sistemi privi di strato idrofobo, i sali tendono a migrare verso la superficie, comportandosi come intonaci tradizionali.

Nonostante le buone prestazioni nella gestione dei sali, i test igrometrici mostrano che tali sistemi non favoriscono una reale asciugatura della muratura: l'umidità interna tende a stabilizzarsi, senza una riduzione significativa.

Intonaci igroregolatori

All'interno della stessa classificazione, possono essere inclusi anche gli ***intonaci igroregolatori o igroattivi.***

Sebbene non siano progettati per gestire direttamente l'umidità di risalita o la presenza di sali — e non rientrino dunque nella categoria R secondo la norma EN 998-1 — questi intonaci offrono una valida azione risanante dal punto di vista microclimatico, specialmente in ambienti interni caratterizzati da umidità relativa elevata, scarsa ventilazione o rischio di condensa.

Essi agiscono attraverso un meccanismo di *buffering* igroscopico, assorbendo temporaneamente il vapore acqueo in eccesso e rilasciandolo gradualmente quando l'aria diventa più secca.

Questa proprietà, quantificata dal ***Moisture Buffer Value*** (***MBV***), consente di mitigare le fluttuazioni dell'UR, prevenendo la formazione di muffe e migliorando il comfort ambientale. [Liuzzi (2025)]

Gli intonaci igroregolatori sono generalmente costituiti da materiali naturali (calce, argilla, cocciopesto, fibre vegetali) e possono raggiungere valori di MBV superiori a 2,5–3 $g \cdot m^{-2} \cdot \%RH^{-1}$, comparabili a quelli dei sistemi in terra cruda e sono spesso impiegati anche nel restauro degli edifici storici. [Larcher (2025); Liuzzi (2025)]

Tuttavia, in presenza di risalita capillare o di forti concentrazioni saline, questi materiali risultano inadatti a causa della loro scarsa resistenza meccanica e chimica.

4.4.4.1.1 COMPOSIZIONE, PROPRIETÀ E PROGETTAZIONE

Gli intonaci risananti sono costituiti principalmente da una miscela di leganti, aggregati e additivi, la cui combinazione ne determina le proprietà.

Tra i leganti disponibili, la calce naturale rimane uno dei materiali più apprezzati nel restauro, grazie alla sua compatibilità chimica e fisica con le murature storiche, alla reversibilità e alle eccellenti proprietà igroscopiche [Bartholdy (2025); Larcher (2025); Lombardi (2005); Lubelli

(2021); Rirsch (2010)].

Gli intonaci a base di calce pura hanno valori di MBV comparabili a quelli delle malte in terra cruda (MBV ≈ 3,65). Al contrario, materiali sintetici o impermeabilizzanti hanno valori inferiori (≈ 0,40), risultando quindi inadatti al risanamento igrometrico. [Bartholdy (2025); Larcher (2025); Liuzzi (2025)]

Il rapporto legante/aggregato rappresenta un parametro determinante per la porosità totale, la distribuzione dimensionale dei pori e la capacità di assorbimento capillare dell'acqua. Un incremento del contenuto di legante tende a generare una matrice più densa, con aumento dei pori capillari piccoli (0,1–1 µm) e riduzione dei pori più grandi, da ritiro o da bolle d'aria. Questa correlazione con le proprietà del materiale, consente di calibrare la risposta del materiale in funzione della strategia progettuale. [Fragata (2016); Kushnierova (2024); Guolo (2024); Lombardi (2005)]

Anche la tecnica di miscelazione influenza la microstruttura: nel metodo WHM (*Wet Hot-Mixing*), un maggiore contenuto d'acqua favorisce la formazione di cristalli di calcite più piccoli e una struttura più compatta; nel DHM (*Dry Hot-Mixing*), al contrario, i cristalli risultano più grandi e la struttura più aperta. Tuttavia, alcuni studi evidenziano come le differenze nel coefficiente di assorbimento d'acqua tra i due metodi non sono statisticamente significative ed offrono flessibilità nella scelta esecutiva. [Bartholdy (2025); Fragata (2016)]

Per ottimizzare la porosità, vengono spesso introdotti additivi: le argille, grazie alla loro struttura lamellare, migliorano la capacità di assorbimento di acqua e vapore; il caolino offre un equilibrio tra assorbimento e resistenza ai sali; la bentonite, pur dotata di elevato potere assorbente, può causare rigonfiamenti e ridurre la durabilità in presenza di sali aggressivi; la perlite espansa migliora la traspirabilità e le proprietà igroscopiche, ma tende ad aumentare la capacità di ritenzione salina. [Kushnierova (2024)]

Negli ultimi anni, la ricerca sta sperimentando l'impiego di materiali riciclati di origine agricola o edilizia (gusci d'uovo, cenere da lolla di riso, cocciopesto) in combinazione con la calce naturale. Questi componenti, scelti per la compatibilità chimica e la disponibilità locale, migliorano la sostenibilità ambientale senza compromettere le prestazioni funzionali [Bartholdy (2025); Larcher (2025); Liuzzi (2025); Sardella (2021)]:

- La polvere di gusci d'uovo, ricca di carbonato di calcio, incrementa la reattività della matrice
- La cenere di lolla di riso agisce come pozzolana, migliorando stabilità meccanica e proprietà igroscopiche
- Il cocciopesto contribuisce alla regolazione dell'umidità e alla compatibilità con murature storiche

4.4.4.2 Metodo di Applicazione

L'applicazione di un intonaco risanante richiede un approccio metodico basato su una diagnosi preliminare accurata e sul rispetto scrupoloso delle fasi esecutive, nonché delle condizioni ambientali e dei tempi di maturazione dei materiali. L'efficacia dell'intervento dipende tanto dalle proprietà chimico-fisiche del prodotto, quanto dalla corretta posa in opera e dalla compatibilità tra gli strati applicati e il supporto murario. [Vitiello, Castelluccio (2019)]

Rimozione dell'intonaco degradato

La rimozione dell'intonaco degradato deve essere estesa oltre il limite visibile del degrado (80-100 cm) così da intercettare l'intera fascia di imbibizione attiva: la determinazione corretta del "limite sano" è fondamentale per evitare problemi di umidità residua. [Lombardi (2005); Musso]

Pulizia e preparazione del supporto

Il supporto va liberato da polveri, efflorescenze e materiali incoerenti, manualmente o meccanicamente, evitando detergenti chimici che possano compromettere la presa della malta. Eventuali irregolarità o cavità devono essere regolarizzate per ottenere una superficie omogenea. È, inoltre, buona pratica garantire

una ventilazione adeguata per favorire l'evaporazione dell'umidità durante le fasi di maturazione.

Stratigrafia e posa in opera

Il sistema risanante si articola, tipicamente, in tre strati funzionali:

- Rinzaffo d'aggrappo: applicato su un fondo leggermente umido, ha lo scopo di garantire una buona adesione tra muratura e malta. Si tratta di una malta povera e porosa, solitamente a base di calce idraulica naturale, con uno spessore contenuto (circa 2-5 mm), che deve stagionare almeno 24 ore prima di procedere con il successivo strato.
- Strato principale (intonaco risanante): applicato in una o più mani evitando costipazioni eccessive o lisciature che possano comprometterne la porosità. Lo spessore complessivo varia tra i 2 e i 3 cm, in funzione della natura del supporto e delle condizioni igrometriche della muratura [Lombardi (2005); Musso]

Condizioni ambientali

È necessario evitare la posa con temperature inferiori a 5 °C o superiori a 30 °C, in presenza di vento, soleggiamento diretto o forti escursioni termiche. La muratura deve essere leggermente umida, ma non satura, per prevenire anomalie nella presa della malta.

Finitura e trattamenti superficiali

Dopo la fase di stagionatura, generalmente 15-20 giorni, si esegue la finitura con materiali minerali e traspiranti (es. rasature a base di calce naturale, intonachini leggeri, pitture ai silicati o silossaniche).

L'impiego di rivestimenti filmogeni o pellicolari (es. vernici acriliche, pitture polimeriche, rivestimenti plastici continui) è fortemente sconsigliata in quanto ostacola la diffusione del vapore e compromette la traspirabilità del sistema. [Lombardi (2005); Musso]

L'applicazione della scialbatura è particolarmente indicata per la sua capacità di regolare l'umidità superficiale.

4.4.4.3 Vantaggi

Sebbene non costituiscano una soluzione definitiva al problema dell'umidità, gli intonaci risananti offrono vantaggi significativi che ne giustificano l'ampia diffusione nel restauro e nel risanamento edilizio.

Innanzitutto comportano un miglioramento del microclima interno attraverso la regolazione passiva dell'umidità superficiale delle murature: l'elevata traspirabilità e la porosità controllata favoriscono l'evaporazione del contenuto umido, riducendo la formazione di condense e la proliferazione di muffe, con conseguenti benefici per comfort e salubrità degli ambienti.

La loro struttura macroporosa può, inoltre, accogliere e confinare i sali cristallizzati, limitando i danni all'interno delle murature e contribuendo ad una maggiore durabilità rispetto alle soluzioni tradizionali.

Dal punto di vista operativo, la diffusione di sistemi integrati e preconfezionati, corredati da certificazioni prestazionali e istruzioni di posa in opera, facilita la standardizzazione del processo esecutivo e riduce il margine di errore esecutivo.

Infine, in un'ottica di sostenibilità, molte formulazioni impiegano leganti naturali, aggregati riciclati e componenti a basso impatto ambientale, contribuendo a ridurre l'impronta ecologica degli interventi e ad allinearsi ai principi del restauro sostenibile.

4.4.4.4 Limiti e Criticità

Nonostante i benefici, gli intonaci risananti presentano limiti e criticità che ne riducono l'efficacia nel medio-lungo periodo [Guolo (2024)].

Innanzitutto, le prestazioni osservate in cantiere risultano spesso inferiori rispetto ai dati sperimentali, soprattutto in presenza di alte concentrazioni saline, ripetuti cicli di imbibizione-asciugatura o in ambienti

scarsamente ventilati.

L'eccessivo accumulo di sali, inizialmente confinata nell'intonaco risanante, può generare nel tempo pressioni interne tali da causare microfessurazioni, perdita di coesione e distacchi. Pertanto l'intonaco risanante non va considerato una soluzione permanente, ma parte integrante di una strategia ciclica di manutenzione, o meglio ancora, di un progetto di risanamento che risolva le cause primarie dell'umidità: in assenza di misure complementari, la funzione risanante si esaurisce rapidamente e i fenomeni di degrado tendono a ripresentarsi.

La scarsa applicazione di controlli sistematici in cantiere e l'assenza di protocolli diagnostici e di monitoraggio post-intervento limitano la capacità di valutare l'efficacia degli interventi e aumentano il rischio di insuccesso. Inoltre, la grande eterogeneità dei prodotti disponibili sul mercato, pur conformi alla normativa UNI EN 998-1, rende ancora più difficile una valutazione del reale comportamento in opera: le diverse formulazioni variano significativamente in termini di leganti, additivi e granulometria degli inerti.

Dal punto di vista funzionale, gli intonaci risananti mostrano limiti evidenti in presenza di acqua in pressione, stagnante o percolante, e su murature con tassi di umidità molto elevati. La discontinuità compositiva o granulometrica tra il nuovo intonaco e il substrato può indurre lesioni superficiali e accelerare il degrado.

4.5

INTERVENTI ELETTROFISICI

4.5 Interventi elettrofisici

Nell'ampio panorama degli interventi contro l'umidità da risalita capillare, accanto alle soluzioni più consolidate di tipo meccanico, chimico o evaporativo, si colloca un insieme eterogeneo di tecnologie che si propone di contrastare il fenomeno mediante l'impiego di forze fisiche associate alla presenza di campi elettrici, magnetici o elettromagnetici [Desarnaud (2021); Guolo (2024); Lubelli (2018)].

Questi sistemi vengono comunemente identificati, in ambito tecnico-commerciale, con un'ampia varietà di definizioni: metodi elettrosmotici, elettromagnetici, elettrocinetici, elettrofisici, elettrocibernetici, elettrochimici o persino sistemi a risonanza o a compensazione del potenziale.

Questa proliferazione terminologica riflette non solo la pluralità dei principi teorici evocati dai produttori, ma soprattutto una profonda incertezza concettuale e classificatoria, che rende estremamente difficile, sia per il tecnico specialista sia per il decisore non esperto, la valutazione oggettiva dell'efficacia, della coerenza scientifica e della compatibilità tra sistemi [EMERISDA (2014)].

Nel presente lavoro si propone di utilizzare la denominazione "metodi elettrofisici" per indicare l'insieme delle tecnologie che, in forme diverse, agiscono sul fenomeno della risalita capillare attraverso l'interazione tra campi fisici (elettrici, elettromagnetici, geomagnetici...) e le molecole d'acqua contenute nella muratura. l termine "metodi elettrofisici" è stato scelto perché più ampio e inclusivo rispetto a "elettrostatici": esso permette di raggruppare tutte le tecnologie che agiscono attraverso interazioni fisiche tra campi elettrici, magnetici, elettromagnetici o geomagnetici, evitando di limitare la definizione a sistemi basati esclusivamente su campi elettrici statici e consentendo una classificazione coerente e fenomenologicamente significativa dei diversi approcci presenti in letteratura e sul mercato.

La scelta del termine "elettrofisici" risponde a due obiettivi principali:

- Superare la confusione semantica scaturita dall'uso improprio e intercambiabile dei vari termini commerciali
- Evidenziale la dimensione fenomenologica di tali metodi, riconducendoli a principi fisici noti e formalizzabili, anche quando la loro riproducibilità sperimentale o la validità dei risultati non siano sempre dimostrabili

È importante sottolineare che, con il termine "metodi elettrofisici", non si intende legittimare o equiparare tutti gli approcci presenti sul mercato, ma fornire una cornice epistemologica e classificatoria che consenta di distinguere le diverse tecnologie in base al principio fisico su cui dichiarano di fondarsi.

L'analisi della documentazione tecnica e della letteratura commerciale mette in evidenza tre ordini principali di criticità.

Il primo ordine riguarda l'ambiguità terminologica: termini come elettrosmosi attiva, wireless, magneto-osmosi, elettro-cibernetica, deumidificazione a risonanza, neutralizzazione di carica sono spesso utilizzati in modo intercambiabile o improprio, senza che venga chiarito il tipo di campo impiegato (elettrico, magnetico, elettromagnetico..) né la modalità di applicazione (campo continuo, pulsato, contatto diretto, trasmissione remota...).

Il secondo ordine riguarda l'assenza di fondamento teorico condiviso [Desarnaud (2021); EMERISDA (2014); Lubelli (2018)]: molti produttori non forniscono né una descrizione scientifica verificabile del principio di funzionamento, né evidenze sperimentali

indipendenti. Alcuni dispositivi si limitano a dichiarare genericamente un'azione contro la risalita capillare senza specificare né l'entità del campo generato, né le proprietà fisiche modificate nei materiali.

Il terzo ordine è rappresentato dalla confusione tra metodo e dispositivo [Desarnaud (2021); EMERISDA (2014); Lubelli (2018)]: spesso i documenti tecnici e pubblicitari confondono la descrizione del metodo fisico con la specificità tecnologica del dispositivo, alimentando l'illusione che ogni dispositivo rappresenti una tecnologia a sé stante, quando spesso si tratta di varianti marginali all'interno di famiglie metodologiche comuni.

Per superare tali ambiguità, si propone una classificazione non basata sul nome commerciale o sull'approccio costruttivo, bensì sul principio fisico dominante che governa l'interazione tra il sistema e l'umidità presente nella muratura. Sono state individuate cinque macrocategorie di metodi elettrofisici, basate su principi fisici formalizzabili:

- Metodi elettrocinetici
  - Elettrocinetica
  - Elettrochimica
  - Elettroforesi
- Metodi elettromagnetici
  - Elettromagnetismo
- Metodi geomagnetici
  - Geomagnetismo
- Metodi a energia potenziale naturale
  - Energia potenziale

Accanto a queste, è opportuno menzionare i cosiddetti metodi privi di fondamento scientifico riconosciuto, che compaiono in letteratura e nel mercato ma non rientrano nella categoria dei metodi elettrofisici. Tra questi figurano metodi definiti dai produttori "elettrocibernetici" e metodi che sfruttano la radiazione terrestre [Seidu (2019)]. La loro inclusione in questa trattazione ha una finalità esclusivamente critica e descrittiva, volta a evidenziare la diffusione di tali dispositivi, la mancanza di un fondamento teorico verificabile e l'assenza di evidenze sperimentali indipendenti, mettendo in guardia il lettore sulla loro inaffidabilità e sulla possibilità che vengano presentati in modo fuorviante come tecnologie "efficaci".

4.5.1 Metodi elettrocinetici

I metodi elettrocinetici si basano sull'analisi e sull'applicazione controllata del movimento di particelle o aggregati di particelle all'interno di un fluido sottoposto a un campo elettrico esterno. In termini più rigorosi, l'elettrocinetica è definita come lo studio del movimento di particelle in un fluido sotto l'influenza di un campo elettrico.

Questi fenomeni emergono principalmente dall'interazione tra superfici solide e fasi liquide in materiali porosi, dove l'applicazione di un potenziale elettrico può modificare la distribuzione di cariche all'interfaccia solido-liquido, alterando il comportamento migratorio delle molecole d'acqua e degli ioni disciolti. Il meccanismo di base è strettamente legato alla formazione del doppio strato elettrico di Helmholtz, una struttura ordinata di cariche che si instaura spontaneamente all'interfaccia tra il materiale solido e il fluido, e che regola la mobilità elettrosmotica del liquido nei pori.

Nel contesto della conservazione e del restauro edilizio, i processi elettrocinetici trovano impiego soprattutto per contrastare l'umidità di risalita capillare. L'obiettivo è modulare o invertire il flusso capillare mediante campi elettrici costanti o variabili, generati da coppie di elettrodi inseriti nella muratura.

Questi campi restano confinati tra gli elettrodi e non si propagano nello spazio come onde elettromagnetiche, distinguendo tali sistemi dalle tecnologie wireless basate su interazioni elettromagnetiche. Le tecniche differiscono per principio fisico, configurazione impiantistica, intensità del campo applicato e finalità secondarie, come la veicolazione di agenti consolidanti o deumidificanti.

I materiali da costruzione tradizionali sono costituiti da cristalli di carbonati, silicati, alluminati e ossidi, le cui superfici presentano atomi di ossigeno caricati negativamente. Queste superfici, idrofile, attraggono le molecole

d'acqua, che tendono a disporsi in un reticolo ordinato mediante legami a idrogeno.

In presenza di un campo elettrico esterno, la polarizzazione delle molecole d'acqua e la separazione delle cariche nei pori del materiale favoriscono uno spostamento netto del fluido dal polo positivo verso quello negativo. La mobilità del liquido è ulteriormente influenzata dalla presenza di ioni disciolti: gli ioni positivi, più piccoli e con carica concentrata, aggregano un maggior numero di molecole d'acqua rispetto agli ioni negativi, determinando così un trasporto complessivo di acqua verso il catodo.

Questo meccanismo è energeticamente efficiente e rappresenta la base della traslazione elettrosmotica dell'acqua nei materiali porosi, fenomeno che verrà approfondito nelle sezioni successive dedicate all'elettrosmosi e alle sue varianti attive.

Il limite principale degli interventi elettrici risiede nella variabilità delle caratteristiche dei materiali murari, della concentrazione di sali e del grado di umidità, oltre alle correnti vaganti nel sottosuolo, fattori che possono alterare l'efficacia del campo elettrico naturale. Tuttavia, questi studi hanno aperto la strada allo sviluppo di tecniche capaci di intervenire sulla causa della risalita capillare, fornendo strumenti non invasivi per il risanamento delle murature umide che le attuali ricerche e sperimentazioni stanno cercando di integrare con sistemi di controllo basati su sensori intelligenti e analisi avanzata dei dati, promossi dalle tecnologie di *smart building* dell'industria 4.0 [Aiello (2022)].

Elettrosmosi

L'elettrosmosi è il fenomeno cardine dei metodi elettrocinetici impiegati per mitigare l'umidità di risalita capillare nelle murature e consiste nello spostamento netto di un fluido contenuto nei pori di un materiale solido sotto l'azione di un campo elettrico applicato tra due elettrodi. [Castelluccio, Vitiello (2016); Chen (2008); Desarnaud (2021); Di Fraia (2016); EMERISDA (2014); Eslami, Ottosen (2024); Eslami (2024); Firnkes (2010); Franzoni (2014); Koka (2022); Torres (2018)] A differenza del flusso capillare spontaneo, guidato da differenze di pressione e tensione superficiale, l'elettrosmosi consente un controllo attivo della direzione e della velocità del flusso, offrendo la possibilità di intervenire direttamente sulla causa della risalita dell'acqua.

Il meccanismo microscopico dell'elettrosmosi è strettamente connesso alla formazione del doppio strato elettrico di Helmholtz lungo le superfici solide dei materiali da costruzione. Queste superfici, tipicamente costituite da cristalli di carbonati, silicati, alluminati e ossidi, presentano atomi di ossigeno caricati negativamente che attraggono ioni positivi e molecole d'acqua, generando uno strato mobile di fluido elettricamente attivo all'interno dei pori. Questo strato viene trascinato dal campo elettrico, producendo un flusso macroscopico la cui direzione è generalmente verso il catodo, poiché nelle murature il potenziale zeta (ζ) è negativo in acqua neutra o leggermente basica. Il segno e il modulo di ζ dipendono da mineralogia, pH e salinità della soluzione, con valori caratteristici che per materiali da costruzione variano tra circa 25 e 150 mV. La conducibilità della soluzione interstiziale (κ) e la viscosità del fluido ($\eta \approx 1 \cdot 10\text{-}3$ Pa·s per acqua a 20°C) modulano ulteriormente il trasporto elettrosmotico, così come la geometria dei pori e la saturazione idrica del materiale.

La velocità media del flusso elettrosmotico può essere stimata dall'***equazione di Smoluchowski***:

$$v_{eo} = \frac{\varepsilon \zeta}{\eta} E$$

Dove:

- v_{eo} [m/s] è la velocità media del flusso elettrosmotico e rappresenta la velocità con cui l'acqua si muove attraverso i pori della muratura sotto l'azione del campo elettrico
- ε [F/m – farad per metro] è la permittività del fluido che misura la capacità del mezzo di polarizzarsi in risposta al campo elettrico; per l'acqua a temperatura ambiente $\varepsilon \approx 7 \cdot 10\text{-}10$ F/m

- ζ [V] è il potenziale zeta che caratterizza la differenza di potenziale elettrico tra lo strato mobile di fluido e la superficie solida
- η [Pa·s] è la viscosità del fluido che determina la resistenza al movimento
- $E=(\Delta V/L)$ [V/m] è l'intensità del campo elettrico, definita come la differenza di potenziale ΔV tra i due elettrodi divisa per la distanza L tra essi

Questa relazione evidenzia come la velocità elettrosmotica non dipende esclusivamente dal campo elettrico applicato, ma anche dalle proprietà intrinseche del fluido e del materiale poroso.

Nelle applicazioni reali, la complessità aumenta a causa dell'eterogeneità della muratura, della presenza di sali solubili e della distribuzione irregolare dei pori [Castelluccio, Vitiello (2016); Koca (2024); Lombardi (2005)]. La conducibilità elettrica della soluzione interstiziale, la saturazione idrica dei pori e la dimensione dei pori stessi influenzano la mobilità degli ioni e la viscosità apparente del fluido, modulando di conseguenza il trasporto elettrosmotico. Inoltre, la temperatura e l'umidità ambientale possono alterare la polarizzazione molecolare dell'acqua e la mobilità ionica, rendendo la valutazione dell'elettrosmosi un processo altamente specifico per ciascuna muratura.

Dal punto di vista pratico, il flusso elettrosmotico determina non solo la riduzione dell'umidità residua, ma influisce anche sulla distribuzione dei sali e sulla stabilità chimico-fisica dei materiali. I cationi maggiormente idratati, trascinati verso il catodo, possono accumularsi localmente, mentre gli anioni si muovono in direzione opposta, modificando gradualmente la composizione salina della muratura. Questo aspetto è cruciale nella progettazione di interventi elettrochimici, poiché l'efficacia del trattamento dipende dall'equilibrio tra spostamento dell'acqua e gestione dei Sali.

4.5.1.1 Elettrosmosi attiva

L'elettrosmosi attiva è una tecnica di risanamento edilizio che applica in modo controllato il principio fisico dell'elettrosmosi per contrastare l'umidità di risalita capillare [Agyekum (2019); Castelluccio, Vitiello (2016); Delgado (2016); Desarnaud (2021); EMERISDA (2014); Feijoo (2020); Franzoni (2014); Koca (2024); Lombardi (2005); Musso; Premoli (2015); Torres (2018); Vitiello, Castelluccio (2019)].

A differenza del flusso capillare spontaneo, governato da pressioni e tensioni superficiali, l'elettrosmosi attiva impiega un campo elettrico artificiale che inverte il naturale movimento dell'acqua nei capillari, spingendola verso il terreno e riducendo la saturazione della muratura (Fig. 39-40).

Il fenomeno dell'elettrosmosi fu osservato per la prima volta nel XIX secolo da F.F. Reuss, e già nei primi decenni del XX secolo trovò applicazioni in geotecnica per il consolidamento dei terreni argillosi saturi e per la bonifica di suoli instabili. Negli anni '30 e '40 esperimenti pionieristici dimostrarono che un campo elettrico continuo poteva modificare la distribuzione dei fluidi nei suoli.

Solo in seguito la tecnica venne trasferita all'edilizia, con le prime sperimentazioni mirate al contrasto dell'umidità da risalita capillare nelle murature storiche. Tuttavia, gli esiti non furono sempre positivi: in alcuni paesi, come il Regno Unito e l'Australia, fallimenti applicativi negli anni '60–'70 determinarono un temporaneo discredito del metodo.

A partire dagli anni '80 e '90, lo sviluppo di materiali elettrodici resistenti alla corrosione e di centraline elettroniche capaci di erogare e monitorare campi elettrici stabili ha determinato un rinnovato interesse verso la tecnica. Studi più recenti, condotti in Europa, Australia, Stati Uniti e Danimarca, hanno documentato casi di successo, pur sottolineando come l'efficacia dipenda dalle condizioni specifiche della muratura. [Lombardi (2005); Seidu (2019)]

Il sistema consiste nell'installazione di una coppia di elettrodi collegati a una centralina in corrente continua. Gli anodi vengono inseriti nella fascia muraria soggetta a risalita capillare, tipicamente in prossimità della zona di evaporazione, mentre i catodi vengono collocati nel terreno o nelle fondazioni, in

contatto con la porzione più umida e con il bacino di alimentazione idrica. L'alimentazione in corrente continua crea una differenza di potenziale artificiale che si sovrappone e si oppone al campo naturale responsabile della risalita. In questo modo, lo strato fluido mobile del doppio strato elettrico viene trascinato verso il catodo, e l'acqua che normalmente risalirebbe in capillarità viene invece spinta verso il basso, riducendo progressivamente la saturazione della muratura.

Dal punto di vista tecnico, i sistemi attivi operano a basso voltaggio (in genere tra 2 e 6 V) e correnti iniziali che decrescono progressivamente man mano che l'umidità diminuisce. I consumi energetici sono molto contenuti, stimati in circa 1 kWh per chilogrammo d'acqua rimossa, e l'asciugatura completa richiede in media dai 9 ai 12 mesi, con tempi variabili in funzione delle caratteristiche murarie e ambientali. Una volta raggiunto l'equilibrio, l'impianto resta comunque in funzione permanente per mantenere la barriera di potenziale ed evitare nuove risalite. Per assicurare durabilità, vengono impiegati materiali resistenti alla corrosione (ad esempio titanio rivestito di ossidi nobili o conduttori in grafite), mentre le centraline più avanzate includono dispositivi di controllo e registrazione che permettono di adattare il sistema alle condizioni reali.

Dal punto di vista critico, l'elettrosmosi attiva rappresenta una traduzione tecnologica di un principio fisico ben noto, adattato alle complessità dei materiali da costruzione.

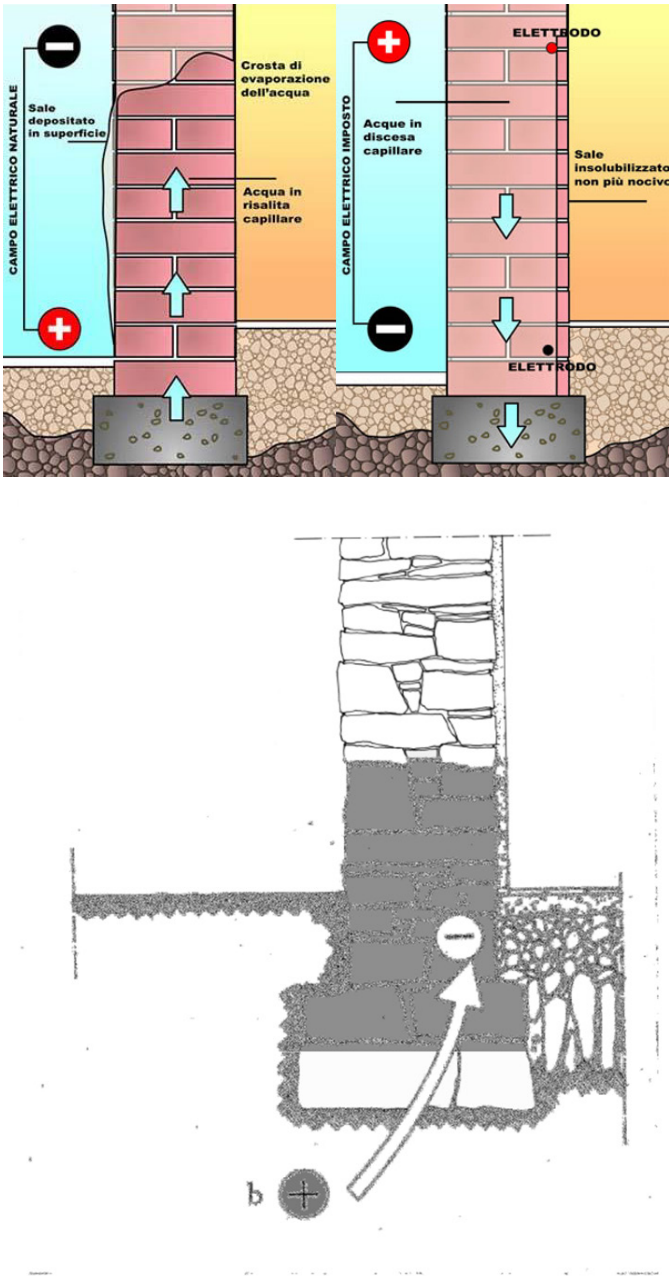


Fig. 39 | Meccanismo di funzionamento dell'elettrosmosi attiva [Fonte: https://www.elosystem.it/elo-system-soluzione-definitiva-all-umidita-di-risalita/]

4.5.1.1.1 METODO DI APPLICAZIONE

L'applicazione dell'elettrosmosi attiva in edilizia non si riduce alla semplice posa di elettrodi e alla connessione di una centralina, ma richiede una procedura accurata e metodica, in grado di tenere conto delle specificità di ogni muratura. Un intervento efficace si articola in più fasi, dalla diagnosi preliminare al monitoraggio a lungo termine, ognuna delle quali è determinante per il successo complessivo. [Koca (2024); Lombardi (2005); Musso; Seidu (2019); Torres (2018)]

Diagnosi preliminare

Il primo passo consiste nella caratterizzazione completa della muratura. Si eseguono misure del contenuto umido (con metodi gravimetrici o resistivi), analisi della salinità e della tipologia dei sali presenti, valutazioni della porosità e della tessitura del materiale, oltre a rilievi microclimatici. È fondamentale verificare la presenza di armature metalliche, catene in ferro o impianti che potrebbero interferire con il campo elettrico o subire fenomeni di corrosione.

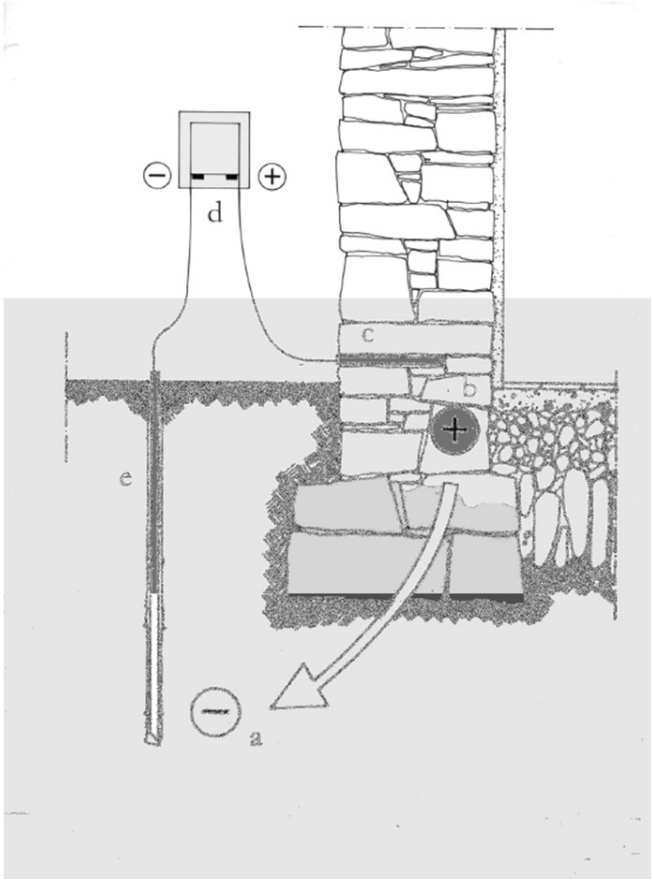


Fig. 40 | Meccanismo di funzionamento dell'elettrosmosi attiva [Fonte: Musso]

È, inoltre, opportuno misurare il potenziale naturale associato alla risalita capillare, per comprendere direzione e intensità del flusso spontaneo.

In presenza di concentrazioni saline elevate, si valuta la necessità di una dissalazione preventiva per ridurre il rischio di accumuli ionici durante il trattamento.

Preparazione della muratura

Prima della posa degli elettrodi, per garantire l'adesione elettrodo-substrato, l'intonaco ammalorato deve essere rimosso nella fascia interessata dalla risalita, generalmente fino a circa 1 m sopra il livello del fronte di risalita.

Le eventuali discontinuità vengono colmate con malte compatibili e la superficie liberata da polveri e residui.

Installazione degli elettrodi

La scelta tra elettrodi lineari (barre o nastri conduttivi) o puntuali (una serie di elettrodi disposti a intervalli regolari) dipende dalla geometria e dallo stato della muratura.

Gli anodi vengono disposti lungo una fascia orizzontale a livello della zona di evaporazione.

I catodi, invece, vengono collocati nel terreno a contatto con le fondazioni o in appositi pozzetti riempiti con materiale conduttivo e umido che ne favorisce l'efficienza.

La distanza tra elettrodi, la profondità di inserimento e le modalità di collegamento vanno definite in funzione delle caratteristiche costruttive e dell'umidità. È essenziale garantire continuità elettrica e protezione anticorrosione dei collegamenti, per minimizzare dispersioni ed evitare perdite di efficienza.

Messa in servizio e regime elettrico

Gli elettrodi vengono collegati a una centralina in corrente continua a basso voltaggio.

Le impostazioni iniziali prevedono valori di tensione generalmente compresi tra 2 e 6V, con correnti variabili a seconda della resistenza elettrica del sistema muratura-terreno. L'andamento della corrente costituisce un indicatore del grado di umidità: valori elevati all'inizio tendono a ridursi progressivamente con l'asciugatura, fino a stabilizzarsi su livelli bassi e costanti. Alcuni dispositivi includono sistemi di monitoraggio remoto e registrazione dei parametri, permettendo di adattare il regime elettrico in funzione della risposta reale della muratura.

Monitoraggio e verifica dell'efficacia

L'asciugatura è graduale, con tempi medi compresi tra 9 e 12 mesi per murature di spessore ordinario, variabili in funzione del contenuto idrico iniziale e delle condizioni climatiche.

Per verificare l'efficacia, si programmano campagne di monitoraggio periodiche (ad esempio ogni 3-4 mesi) con misure gravimetriche, test con termoigrometri, rilievi

resistivi o spettroscopici, e valutazioni della distribuzione dei sali.

Il monitoraggio deve essere condotto sempre con le stesse metodologie e nello stesso periodo dell'anno, per distinguere gli effetti stagionali da quelli effettivamente imputabili al trattamento.

Manutenzione

Per evitare la migrazione dei sali verso il catodo, in ambienti con elevate concentrazioni saline, è opportuno combinare la tecnica con trattamenti di desalinizzazione.

In presenza di elementi metallici è necessario valutare il rischio di corrosione indotta, adottando opportuni sistemi di isolamento o soluzioni alternative. In edifici di pregio storico, è importante minimizzare l'impatto visivo e materico degli elettrodi, utilizzando soluzioni reversibili e compatibili con i materiali originari.

4.5.1.1.2 VANTAGGI

L'elettrosmosi attiva presenta una serie di vantaggi specifici che la distinguono dalle altre tecniche di contrasto all'umidità di risalita, rendendola una soluzione particolarmente utilizzata in diversi contesti.

Il vantaggio primario è la possibilità di controllare in modo diretto e modulabile il flusso d'acqua nei pori della muratura.

Questo controllo adattivo si traduce in un fabbisogno energetico decrescente, con consumi contenuti e facilmente compatibili con l'impiego di fonti rinnovabili come il fotovoltaico. [Desarnaud (2021); Lombardi (2005); Musso; Seidu (2019)]

Un ulteriore vantaggio è l'assenza di reagenti chimici. Questa caratteristica lo rende compatibile con l'edilizia storica e monumentale, minimizzando il rischio di reazioni impreviste o dannose.

Dal punto di vista prestazionale, la riduzione del contenuto idrico non solo abbatte i danni diretti legati all'umidità, ma comporta anche benefici secondari misurabili: diversi studi hanno documentato un calo della conducibilità termica fino a valori prossimi al 60%, traducendosi in un miglioramento delle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio. Parallelamente, sono stati osservati effetti favorevoli anche sul comportamento igroscopico dei materiali: in alcuni casi l'azione elettrocinetica ha contribuito a ridurre la concentrazione di sali solubili, con un conseguente contenimento dei fenomeni di efflorescenza e sub-efflorescenza che minacciano la stabilità meccanica e l'estetica delle superfici. Se gestito con criteri appropriati, il processo può quindi avere un doppio beneficio: asciugare la muratura e contribuire, almeno parzialmente, a mitigare la presenza di sali dannosi. [Koka (2024); Lombardi (2005); Musso]

La flessibilità applicativa è un ulteriore punto di forza: tensioni, corrente e configurazioni elettrodiche possono essere adattate a murature di diverso spessore, tessitura e stato di conservazione. Il sistema impiantistico consente inoltre di misurare e registrare dati durante il funzionamento, garantendo la tracciabilità dei risultati.

Infine, i progressi sui materiali (titanio, grafite, rivestimenti con ossidi nobili) hanno aumentato la durabilità e la stabilità del sistema, riducendo i rischi di corrosione e la necessità di interventi ripetuti.

4.5.1.1.3 LIMITI E CRITICITÀ

Nonostante i vantaggi, l'elettrosmosi attiva presenta limiti e criticità operative che ne condizionano l'affidabilità e l'applicabilità. La variabilità degli esiti è il problema centrale [Desarnaud (2921); Guolo (2024); Koca (2024); Lombardi (2005); Lopez-Arce (2009); Seidu (2019); Vanhellemont (2018)]: in alcuni casi si osserva una marcata riduzione dell'umidità da risalita capillare, in altri gli effetti sono modesti o addirittura trascurabili.

Questa variabilità è imputabile alla complessità delle murature reali, dove mineralogia, porosimetria, grado di saturazione e composizione salina interagiscono in modo non lineare con il campo elettrico applicato, rendendo i modelli teorici (es. Smoluchowski) solo parzialmente predittivi per i sistemi eterogenei [Castelluccio, Vitiello (2016); Delgado (2016); Fragata (2016); Lombardi (2005)].

La presenza di sali solubili costituisce una delle principali criticità. Se da un lato l'elettrosmosi può favorirne parzialmente il trasferimento, dall'altro rischia di provocare accumuli localizzati nelle zone prossime agli elettrodi, con fenomeni di efflorescenza e cristallizzazione interna potenzialmente più dannosi dell'umidità stessa. Il flusso elettrosmotico è infatti inseparabile dal movimento ionico: cationi e anioni migrano verso elettrodi opposti, modificando la distribuzione salina e, nei casi peggiori, innescando nuovi processi di degrado. L'interazione con i sali è quindi ambivalente e richiede un attento monitoraggio, pena la trasformazione di un intervento risolutivo in una fonte di nuovi problemi.

Un altro limite strutturale riguarda il contatto con elementi metallici: armature, catene in ferro, inserti o tubazioni possono essere soggetti a fenomeni di corrosione galvanica indotta dal campo elettrico. In edifici storici questo rischio non è trascurabile e spesso porta a escludere o a limitare fortemente l'applicazione del metodo. Parallelamente, l'impatto estetico e materico non è neutro: la posa di elettrodi nella muratura e di catodi nel terreno comporta interventi fisici non sempre compatibili con contesti di alto pregio monumentale, dove la reversibilità e la minimizzazione degli impatti sono condizioni imprescindibili.

Dal punto di vista operativo, va sottolineato che l'elettrosmosi attiva non è un intervento istantaneo ma un processo graduale: i tempi di asciugatura sono lunghi (9–12 mesi in media, ma anche più in murature spesse o molto degradate) e la percezione dei risultati può essere lenta. Questo allunga i tempi di cantiere e può indurre aspettative non realistiche nei committenti. Inoltre, anche dopo l'avvenuta asciugatura, l'impianto deve rimanere permanentemente in funzione, pena il ritorno dell'umidità. Ciò comporta una dipendenza dalla stabilità elettrica del sistema e dalla sua manutenzione nel tempo: collegamenti difettosi, elettrodi corrotti o centraline malfunzionanti possono vanificare anni di intervento. [EMERISDA (2014)]

Un ulteriore aspetto critico è di natura scientifica e normativa. Nonostante decenni di sperimentazioni, la tecnica non è ancora sostenuta da un consenso univoco né da linee guida consolidate a livello internazionale. Alcune agenzie e organismi tecnici hanno espresso scetticismo, richiamando casi di inefficacia o di risultati difficilmente riproducibili. La scarsità di dati comparabili, la variabilità metodologica delle prove e la difficoltà di isolare i fattori in gioco hanno contribuito a mantenere un clima di incertezza. Questo significa che, ancora oggi, l'adozione dell'elettrosmosi attiva poggia più su casi studio positivi e sull'esperienza dei progettisti che su standard condivisi e protocolli certificati. [Desarnaud (2021); EMERISDA (2014); Guolo (2024); Koca (2024); Premoli (2016); Vanhellemont (2018)]

4.5.1.2 Deumidificazione Elettro-Chimica

Per comprendere la deumidificazione elettrochimica è utile richiamare il significato di elettrochimica: disciplina che studia i processi in cui il trasferimento di elettroni avviene attraverso un circuito esterno, includendo sia trasformazioni chimiche indotte da corrente elettrica (come nell'elettrolisi), sia la produzione di elettricità a partire da reazioni chimiche (come nelle pile e batterie). Applicata ai materiali porosi e alle murature umide, questa prospettiva interpreta il campo elettrico non solo come forza di trasporto (elettrosmosi), ma anche come stimolo di reazioni chimiche secondarie che influenzano la mobilità dell'acqua e degli ioni disciolti.

La deumidificazione elettrochimica condivide con l'elettrosmosi attiva l'uso di un campo elettrico diretto e di una rete di elettrodi installati nella muratura e nel terreno, ma ne differisce per il principio teorico di riferimento: qui l'attenzione si concentra sulla possibilità di reindirizzare la polarità naturale del flusso capillare e invertire il movimento spontaneo dell'acqua attraverso reazioni indotte dal passaggio di corrente. L'obiettivo non è soltanto quello di creare un flusso elettrosmotico verso il catodo, ma anche di sfruttare le trasformazioni ioniche che si innescano localmente per stabilizzare la microstruttura porosa. In pratica, il campo elettrico agisce contemporaneamente su due fronti: sposta fisicamente l'acqua e modifica l'ambiente chimico dei pori, inducendo

talvolta la formazione di depositi elettrolitici che possono ridurre la permeabilità capillare residua. [Aiello (2022)]

Questa doppia natura del processo rappresenta al tempo stesso un potenziale vantaggio e una fonte di rischio. Da un lato, la capacità di influenzare non solo la migrazione idrica ma anche la distribuzione ionica suggerisce la possibilità di ottenere un effetto di consolidamento o di riduzione della solubilità dei sali. Dall'altro, se la corrente non è calibrata con attenzione, la stessa dinamica elettrochimica può favorire fenomeni indesiderati: precipitazione e accumulo di sali in zone critiche, variazioni locali di pH con effetti corrosivi o degrado selettivo dei materiali più sensibili. Ne deriva che il funzionamento della deumidificazione elettrochimica è intrinsecamente più complesso rispetto all'elettrosmosi pura, poiché coinvolge non solo il trasporto di fluidi ma anche reazioni chimiche difficilmente prevedibili in un mezzo eterogeneo come la muratura.

Proprio per questa ragione, il progetto di un sistema di deumidificazione elettrochimica richiede una valutazione ancora più rigorosa rispetto a quella dell'elettrosmosi attiva. Oltre alla caratterizzazione del contenuto idrico e della porosità, diventa cruciale stimare la conducibilità elettrica del substrato e la composizione salina della soluzione interstiziale, per prevedere gli scenari di migrazione e di deposito. È evidente, quindi, che le due tecniche non vanno confuse: se l'elettrosmosi attiva si fonda su un principio essenzialmente fisico (trasporto elettrocinetico dell'acqua nei pori), la deumidificazione elettrochimica introduce un'ulteriore dimensione chimica, con esiti che possono essere positivi o negativi a seconda del contesto.

In definitiva, la deumidificazione elettrochimica può essere considerata una variante concettuale e applicativa dell'elettrosmosi, ma non una sua semplice sottocategoria. Entrambe mirano a contrastare l'umidità ascendente mediante campi elettrici applicati, ma mentre l'elettrosmosi agisce come fenomeno di trasporto elettrocinetico controllato, la deumidificazione elettrochimica integra le reazioni elettrolitiche come parte integrante del processo. È proprio questa dimensione aggiuntiva che rende la tecnica affascinante sul piano teorico, ma al tempo stesso delicata e rischiosa in termini applicativi, imponendo cautela e una progettazione basata su solide indagini preliminari.

4.5.1.3 Elettrosmosi Foresi

Per comprendere la tecnica dell'elettrosmosi-foresi è utile richiamare brevemente il concetto di ***elettroforesi***, definita come una tecnica analitica e separativa basata sul movimento di particelle elettricamente cariche immerse in un fluido, sotto l'azione di un campo elettrico per effetto di un campo elettrico applicato mediante una coppia di elettrodi (Fig. 41-42). A seconda della polarità, si distingue tra cataforesi (migrazione verso il catodo) e anaforesi (migrazione verso l'anodo).

L'elettroforesi si differenzia dall'elettrosmosi in quanto non riguarda lo spostamento del fluido nel suo complesso, bensì il moto selettivo di particelle solide sospese.

Su questa base si è sviluppata la tecnica combinata dell'elettrosmosi-foresi, che associa il trasporto d'acqua indotto dal campo elettrico (elettrosmosi) alla capacità di trascinare, con il flusso idrico, particelle solide colloidali cariche (elettroforesi) [Castelluccio, Vitiello (2016); Firnkes (2010); Franzoni (2014); Franzoni (2018); Guolo (2024); Lombardi (2005); Musso; Vitiello, Castelluccio (2019)].

L'idea centrale di questa tecnica è sfruttare l'umidità già presente nei pori della muratura non solo per allontanarla, ma anche per impiegarla come come mezzo di trasporto di sostanze sigillanti e consolidanti, capaci di depositarsi all'interno della rete capillare. In questo modo, l'intervento agisce simultaneamente su due fronti: da un lato riduce la risalita capillare, dall'altro crea una barriera fisica interna che ostacola la ricomparsa del fenomeno.

4.5.1.3.1 METODO DI APPLICAZIONE

Dal punto di vista operativo, la tecnica prevede una sequenza di azioni precise. Sulla muratura, previamente privata dell'intonaco, si realizza

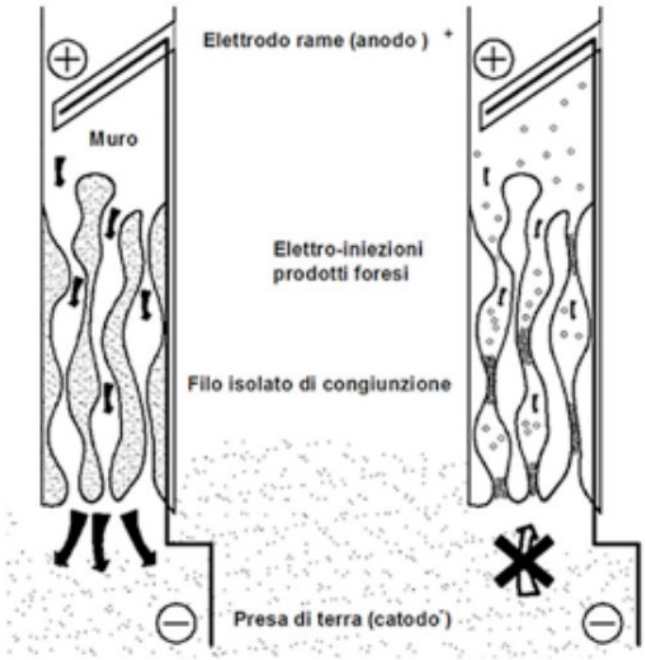


Fig. 41 | Elettrosmosi foresi [Fonte: Castelluccio, R., & Rossetto, M., "Rising Damp in Historical Buildings: Restoration Using the Charge Neutralization Technology CNT Domodry", SMC Magazine, n. 2/2015, pp. 78-88.]

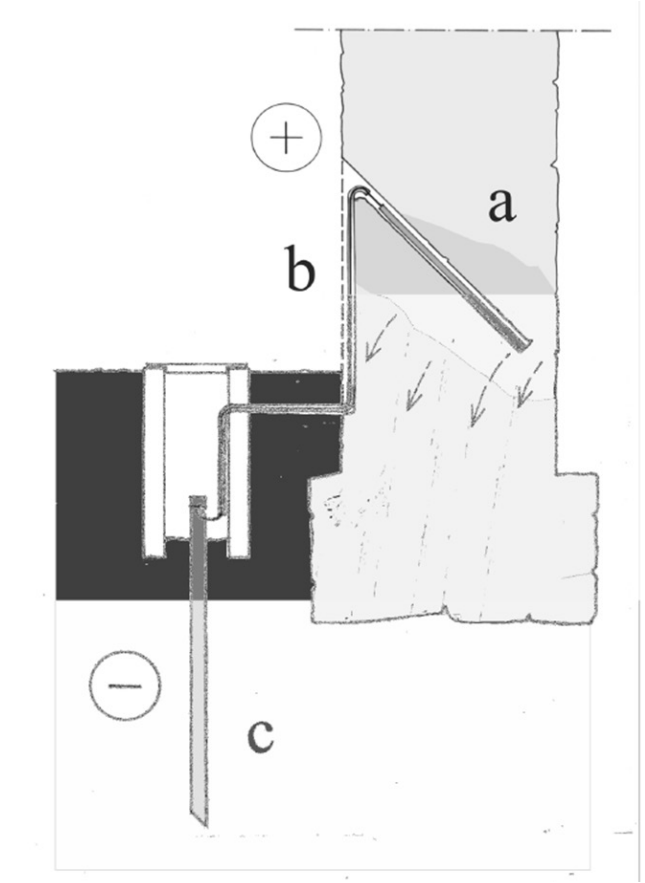


Fig. 42 | Schema di applicazione dell'lettrosmosi foresi [Fonte: Musso]

una scanalatura orizzontale di circa 1–2 cm di profondità, che si estende lungo l'intera parete da trattare. All'interno di questa sede vengono collocate sonde metalliche (tipicamente in lega di rame) collegate fra loro e connesse a picchetti metallici infissi nel terreno, così da generare una differenza di potenziale analoga a quella utilizzata nell'elettrosmosi attiva.

Parallelamente, nella stessa scanalatura o nelle zone immediatamente adiacenti, si procede all'iniezione di una soluzione acquosa contenente particelle solide con carica positiva in sospensione colloidale.

L'applicazione di una corrente continua induce la migrazione dell'acqua verso il catodo, trascinando con sé le particelle cariche che si depositano progressivamente all'interno dei capillari, occludendoli e conferendo al materiale un effetto sia sigillante che consolidante.

L'intervento si conclude con la protezione esterna della muratura mediante l'applicazione di rasature e intonaci specifici, talvolta integrati da trattamenti complementari, come impregnazioni neutralizzanti per limitare la colonizzazione biologica o boiacche traspiranti volte a mantenere la capacità di diffusione del vapore. [Guolo (2024); Lombardi (2005)]

4.5.1.3.2 VANTAGGI

L'efficacia del metodo risiede nella sua duplice azione: da un lato la riduzione del contenuto idrico nei materiali porosi, dall'altro la formazione di una barriera interna.

Tale combinazione rende l'elettrosmosi-foresi particolarmente vantaggiosa nei contesti in cui è necessario non solo l'asciugatura, ma anche un in rinforzo ed un consolidamento strutturale della muratura.

La relativa invasività dell'intervento ne favorisce l'impiego dove le iniezioni chimiche tradizionali potrebbero rivelarsi eccessivamente invasive. [Lombardi (2005)]

4.5.1.3.3 LIMITI E CRITICITÀ

Come ogni sistema basato su dinamiche elettrocinetiche ed elettrochimiche, anche

l'elettrosmosi-foresi presenta criticità non trascurabili. L'efficacia dipende dalla stabilità della sospensione colloidale, dalla distribuzione omogenea delle particelle e dalla loro compatibilità con i materiali originali. Occlusioni irregolari possono, infatti, compromettere la traspirabilità della muratura, alterandone il comportamento igrometrico.

Nei primi periodi di funzionamento si osserva frequentemente un'intensa comparsa di efflorescenze saline, che richiedono ripetuti interventi di pulizia. Se non gestito correttamente, il processo di deposito può quindi favorire la cristallizzazione salina anziché limitarla. [Lombardi (2005)]

Dal punto di vista gestionale, l'impianto richiede un monitoraggio accurato, con letture periodiche dei dati forniti dalla centralina e verifiche dello stato di conservazione della muratura. È quindi un sistema più stabile rispetto ai tradizionali interventi chimici, ma meno prevedibile e più complesso da controllare rispetto all'elettrosmosi attiva. [Lombardi (2005)]

In conclusione, l'elettrosmosi-foresi può essere considerata una variante evolutiva dell'elettrosmosi; tuttavia, la presenza di numerose variabili operative difficilmente standardizzabili impone un approccio prudente e una valutazione preliminare accurata.

4.5.2 Metodi elettromagnetici

L'elettromagnetismo, branca della fisica che studia i fenomeni elettrici e magnetici e le loro interazioni, fornisce il quadro teorico entro cui sono stati sviluppati diversi sistemi di deumidificazione non invasiva per il controllo dell'umidità di risalita.

L'impiego di campi elettromagnetici per contrastare l'umidità da risalita capillare si colloca oggi in un'area di frontiera tra promessa tecnologica e carenza di fondamento sperimentale indipendente.

A differenza dei metodi elettrocinetici con elettrodi, nei quali un campo elettrico statico è applicato alla muratura per modulare il doppio strato elettrico e la migrazione elettrosmotica, i dispositivi elettromagnetici dichiarano di operare "wireless", irradiando onde o impulsi da una centralina [Agyekum (2019); Aiello (2022); Desarnaud (2021); Vitiello, Castelluccio (2019); EMERISDA (2014); Musso; Premoli (2015); Seidu (2019); Vanhellemont (2018)].

Nella comunicazione commerciale queste soluzioni vengono variamente descritte come "elettromagnetiche", "elettrocibernetiche", "elettro-fisiche", "magneto-osmotiche" o come una sorta di "elettrosmosi attiva senza elettrodi". Il successo applicativo rivendicato poggia soprattutto su tre leve: non invasività (nessuna demolizione o iniezione), reversibilità e facilità di installazione anche in beni storici. La domanda scientifica, però, resta: possono onde a bassa frequenza modificare in modo controllato la risalita capillare nei pori?

Per inquadrare fisicamente la questione, è utile partire dai meccanismi macroscopici e microscopici noti. L'altezza di risalita è governata dalla legge di Jurin (tensione superficiale, angolo di contatto, raggio capillare, densità), mentre il trasporto elettrosmotico in presenza di campo elettrico statico è descritto dalla relazione di Helmholtz–Smoluchowski (elettrosmosi).

A scala microscopica, l'interfaccia solido-liquido è governata dal doppio strato elettrico (potenziale zeta e cariche superficiali), che nei materiali silicatici delle murature è negativo e orienta i dipoli dell'acqua, favorendo l'adesione e la bagnabilità delle pareti dei pori. Nel dominio elettromagnetico, un dipolo immerso in un campo oscillante subisce coppie che ne causano polarizzazione alternata; tuttavia, l'effetto medio di traslazione è nullo se il campo è omogeneo e privo di gradienti sulla scala del dipolo. Le frequenze di assorbimento dielettrico dell'acqua responsabili di riorientamenti dissipativi e riscaldamento si trovano nel dominio delle microonde (regime di Debye).

A frequenze molto più basse (kHz), comunemente dichiarate per i dispositivi in commercio, l'interazione diretta con molecole e ioni è debole e, secondo la letteratura consolidata sull'*elettrowetting* (o elettrocapillarità), per generare effetti utili sulla tensione superficiale o sull'angolo di contatto sono necessari elettrodi e campi locali elevati, condizioni che non vengono

replicate da un'irradiazione remota. Ne deriva che, sul piano dei principi fisici dichiarati, risulta poco plausibile che un campo irradiato a bassa intensità e a bassa frequenza, senza elettrodi, sia in grado di "neutralizzare" stabilmente il doppio strato nei pori o di spostare la linea di "potenziale zero" (intesa come quota in cui forze capillari e peso si controbilanciano) al di sotto del piano di calpestio senza modificare realmente i parametri che compaiono nella legge di Jurin.

Nonostante ciò, nella comunicazione commerciale le affermazioni dei produttori sono spesso articolate e suggestive: si sostiene che impulsi multifrequenza "interagiscono con le molecole d'acqua bloccandone la risalita", che "abbassano la linea di potenziale zero" o che "compensano il potenziale elettrico nativo V_0 della muratura riducendo la bagnabilità dei capillari" [Aiello (2022); Cantoni (2017); Castelluccio, Vitiello (2016); EMERISDA (2014); Gubbiotti (2022); Musso; Riminesi (2018); Seidu (2019); Snyder (2013); Vanhellemont (2018)]. Altri *claim* parlano di "oscillazioni intramolecolari" che snaturerebbero le proprietà capillari, di "risonanza multifrequenza" della carica elettrostatica o di "sistemi passivi" che riequilibrerebbero il campo geomagnetico senza emissione.

Per molti dispositivi vengono dichiarati raggi d'azione compresi tra 6 e 15 m (talora fino a 25 m) a geometria sferica o cilindrica, consumi molto bassi (nell'ordine di pochi euro/anno) e livelli di emissione estremamente ridotti (ad es. 0,02 μT a 50 cm, 0,0315 μT a 30 cm), inferiori ai comuni elettrodomestici. Sul piano metrologico e regolatorio, alcune indagini hanno misurato l'emissione di un sistema elettro-fisico a impulsi in camera anecoica (CNR-IFAC, Firenze) con magnetometro ELT-400, confermando un segnale impulsivo a banda utile fino a 10^4 Hz (contenuti spettrali trascurabili sotto –40 dB). La densità di flusso magnetico rilevata lungo l'asse di massima emissione è risultata conforme ai limiti nazionali [Riminesi (2018)]: a 12 cm rientra nel "limite di attenzione" di 10 μT (DPCM 8/7/2003), mentre a 25 cm scende sotto l'obiettivo di qualità; in ambito europeo, i riferimenti sono la Direttiva 2013/35/UE (Disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici – campi elettromagnetici) e le Linee Guida ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) del 2010 (Linee guida per la limitazione dell'esposizione a campi elettrici e magnetici variabili nel tempo. 1 Hz-100kHz). Queste verifiche documentano forma d'onda e intensità del campo, non però l'efficacia idraulica nella muratura.

La valutazione prestazionale resta, quindi, l'elemento cruciale. In più casi studio reali i dispositivi elettromagnetici "attivi" non hanno mostrato riduzioni significative e consistenti del contenuto d'umidità rispetto a punti di controllo. In alcuni profili si è osservato persino un incremento locale. In un esempio, dopo un'alluvione sopravvenuta ad un anno dalle misure, è stato registrato un forte aumento dell'umidità nell'area servita dal dispositivo, incremento non riscontrato nella porzione trattata con iniezioni sul lato opposto. In altri test il contenuto d'umidità e l'indice di salinità non hanno mostrato relazione con lo stato on/off della centralina: attivo da settembre a marzo dell'anno successivo, il dispositivo non ha prodotto trend di deumidificazione distinguibili rispetto alla parete di riferimento. La strumentazione installata nella murature (sonde) e in ambiente interno, confrontata con i dati della stazione meteorologica di riferimento più vicina, ha mostrato RHi ≈ 100% pressoché costante all'interno del foro; le temperature interne hanno seguito le variazioni esterne; il riscaldamento dell'alloggio è stato disattivato per evitare *bias*. Nel complesso, non sono emerse correlazioni tra funzionamento del sistema e parametri termo-igrometrici o contenuti d'acqua.

Un filone affine e più recente è quello della "***depolarizzazione elettromagnetica***" via radiofrequenza [Musso]: una centralina, installata in prossimità della linea di massima risalita (in genere a 150–190 cm dal pavimento, sulla "linea di maggior flusso"), emetterebbe un segnale debole capace di "dissolvere il legame di carica" tra acqua e pareti capillari, riducendo così le forze capillari e annullando la spinta ascensionale; le molecole "distaccate" ricadrebbero per gravità o evaporerebbero.

L'impianto, con raggio d'azione tra 5 e 25 m, talora integrato da dispositivi satellite, viene progettato in funzione di geometria dell'edificio e vincoli di posa (anche in nicchia, senza rimozione dell'intonaco se non già compromesso). Vengono riportati campi elettrici molto modesti (~0,3 V/m) e consumi bassi (es. 5–7 W nominali; in talune fonti compare impropriamente "W/h"), oltre alla possibilità di agire in modo sferico o cilindrico secondo i brevetti. In parallelo, alcuni istituti hanno svolto campagne di monitoraggio non distruttivo in cantieri pilota per valutarne l'efficacia. Sul piano fisico, tuttavia, l'idea di "rompere" legami di adesione capillare con campi a bassa intensità irradiati a distanza resta problematica: le forze capillari dipendono da tensione superficiale e angolo di contatto, che la letteratura sull'*elettrowetting* modifica in modo marcato, ma in presenza di elettrodi e di campi localizzati attraverso dielettrici sottili; un'azione remota in aria, a bassa frequenza, non ricrea condizioni analoghe nei pori.

Una variante concettualmente affine è la ***Tecnologia a Neutralizzazione della Carica*** (***CNT***), proposta come evoluzione "elettro-capillare" che agisce esclusivamente sull'acqua e "neutralizza" il potenziale differenziale lungo i capillari, mirando a uno stato di equilibrio permanente indipendente da materiale, porosità, condizioni termo-igrometriche e salinità [Acordon (2013); Brevetto CH 718 393 B1; Castelluccio, Vitiello (2016); EMERISDA (2014); Favaro (2013); Guolo (2024); Premoli (2015); Rossetto (2013); Vitiello, Castelluccio (2019)]. Il principio richiamato è quello dell'elettrocapillarità: l'applicazione di un campo elettromagnetico impulsivo a bassa intensità, opportunamente modulato in un definito range di frequenze e con raggio sferico 6–15 m, determinerebbe una variazione della tensione superficiale (ovvero dell'angolo di contatto) all'interfaccia solido-liquido, "neutralizzando" la bagnabilità e inibendo la risalita; l'acqua già presente si smaltirebbe per evaporazione spontanea in un orizzonte temporale di circa due anni, con mantenimento successivo in regime di umidità igroscopica grazie al funzionamento continuo della centralina (dimensioni 28×17×6 cm, alimentazione a rete). A supporto si cita l'esistenza, nella muratura, di un potenziale differenziale naturale lungo i capillari, con valori variabili da 10–20 mV (risalita debole/assente) fino a 300–500 mV (risalita intensa), legato al doppio strato di Helmholtz e ai flussi per capillarità/evaporazione; poiché le forze in gioco sarebbero piccole, il costo energetico del contrasto risulterebbe molto ridotto rispetto ai metodi tradizionali.

In questa famiglia si colloca il sistema CNT-Domodry (Fig. 43), descritto come "generatore di deboli onde elettromagnetiche impulsive, opportunamente modulate" capace di "neutralizzare la carica elettrica dell'acqua presente nel terreno a contatto con la muratura, interrompendo la risalita"; l'umidità in eccesso verrebbe espulsa gradualmente per evaporazione; raggio d'azione 6–15 m; consumo annuo dichiarato di circa 3 €; emissioni inferiori a quelle di elettrodomestici (es. 0,015 μT); impiego in numerosi contesti storici; certificazione in ambito "bio-edilizia"; tempi di soluzione "entro 36 mesi".

Il punto critico di validazione della trasposizione dell'elettrocapillarità da microfluidica con elettrodi/dielettrici (dove la variazione di angolo di contatto è ben documentata) a un'azione radiativa remota in mezzi porosi resta, allo stato dell'arte, non dimostrata da protocolli pubblici riproducibili.

Detto questo, osservazioni in campo riportate per CNT-Domodry® indicano riduzioni progressive di contenuto idrico, per cui è prudente distinguere tra: sistemi elettromagnetici generici (singola/multifrequenza, emissione non adattiva), spesso privi di evidenze robuste e con esiti negativi o non probanti; e sistemi a neutralizzazione di carica con modulazione mirata, per i quali vengono riportati esiti più promettenti.

Questa tecnologia è nata nel 2009 da studi condotti all'inizio degli anni 2000 sulle forze elettromagnetiche sui nanotubi di silicio. La CNT-Domodry®, protetta dai brevetti Domodry, è stata convalidata da numerosi casi studio e attività di ricerca e dall'efficacia osservata sul campo con l'applicazione del dispositivo su oltre 4000 edifici, la maggior parte dei quali riguardano alcuni dei monumenti più importanti del patrimonio architettonico italiano [Bernardo (2024); Brevetto CH 718 393 B1; Driussi (2021);

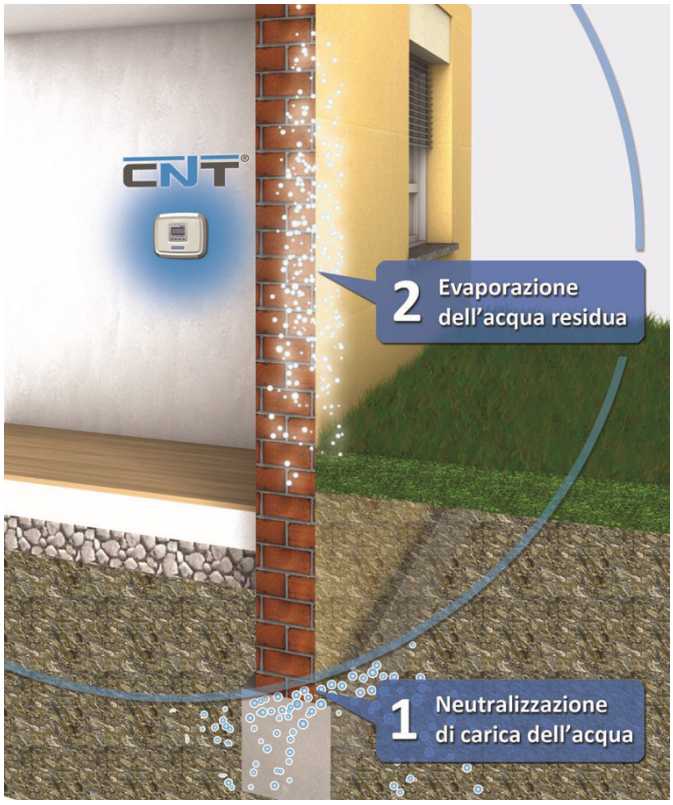


Fig. 43 | Tecnologia a Neutralizzazione di Carica [Fonte: Domodry. Come funziona Domodry®. https://www.domodry.it/faq/come-funziona-domodry/]

Franzoni (2014); Vitiello, Castelluccio (2019)].

La differenza di efficacia può dipendere da molteplici fattori fisici, progettuali e metrologici: ampiezza e contenuto spettrale degli impulsi (fino a 10^4 Hz con pendenze di fronte ripide che aumentano la densità spettrale), calibrazione del campo rispetto ai potenziali reali del sistema poroso, posizionamento della centralina rispetto alla linea di massima risalita, geometria del raggio d'azione (sferico/cilindrico) e presenza di feedback/adattività (spesso non documentati); accoppiamento effettivo del campo con l'ambiente poroso (schermature, profondità utile, eterogeneità dei materiali e della porometria, contenuto e tipologia dei sali, conducibilità dell'acqua); condizioni esterne (stagionalità, evaporazione, ventilazione, pressione barometrica); protocolli di misura (necessità di controlli in cieco, pareti di confronto, carote gravimetriche in stagioni omologhe, profili termo-igrometrici in foro e in ambiente, bilancio salino, tracciabilità degli eventuali interventi concomitanti). In assenza di questi accorgimenti, una deumidificazione apparente può essere confusa con la variabilità stagionale o con effetti collaterali (intonaci macroporosi, cambi di ventilazione, spegnimento/accensione impianti, eventi pluviali).

In termini di sicurezza EM, i dispositivi testati risultano conformi ai limiti italiani (DPCM 8/7/2003) e alle soglie europee (Dir. 2013/35/UE; ICNIRP 2010): a 12 cm il campo può rientrare nel limite di attenzione (10 μT) e a 25 cm scendere sotto l'obiettivo di qualità; ciò attesta la bassa esposizione ma non costituisce prova di efficacia contro la risalita. È altresì opportuno ricordare che le soluzioni passive (equilibratura del geomagnetismo senza alimentazione) non offrono, per loro stessa natura, un meccanismo fisico verificabile per modulare il doppio strato o la bagnabilità all'interno dei pori.

Nel complesso, un giudizio equilibrato deve tenere insieme potenzialità e criticità. Sul versante dei vantaggi, questi sistemi sono non invasivi, reversibili, potenzialmente integrabili con sensori e algoritmi di controllo adattivo, e quindi appetibili in contesti monumentali o dove altri metodi risultano inapplicabili. Sul versante delle criticità, il principio fisico dichiarato da molte soluzioni si scontra con: la difficoltà di ottenere per via radiativa gradienti di campo sulla scala del doppio strato; la distanza tra frequenze/intensità operative e i regimi in cui l'acqua mostra assorbimenti o variazioni di bagnabilità; l'assenza, ad oggi, di letteratura *peer-reviewed* che dimostri in mezzi porosi reali una modifica stabile dell'angolo di contatto o della tensione superficiale senza elettrodi; risultati *in situ* spesso non probanti o negativi quando monitorati con rigore. Coesistono però esperienze positive, in particolare per soluzioni a neutralizzazione di carica (CNT/Domodry®), che mostrano cali misurati del contenuto idrico: proprio per questo è necessario non liquidare in blocco l'intero approccio elettromagnetico, ma selezionare i dispositivi e pretendere protocolli trasparenti e replicabili.

In sintesi, le tecnologie elettromagnetiche "attive" e le varianti di "depolarizzazione/neutralizzazione" presentano un racconto applicativo coerente (raggio d'azione definito, bassi consumi, posizionamento 150–190 cm, possibilità di dispositivi satellite, sicurezza EM

conforme), ma non ancora un meccanismo fisico indipendente e verificato che spieghi come un campo a bassa frequenza e bassa intensità, irradiato a distanza, riduca in modo affidabile le forze capillari o modifichi la bagnabilità all'interno di pori eterogenei senza elettrodi. Alla luce delle campagne *in situ* che non hanno mostrato cali sistematici (a differenza di iniezioni e taglio meccanico), l'impiego di questi sistemi dovrebbe essere considerato sperimentale, accompagnato da monitoraggi documentati e inserito in una strategia integrata (gestione delle sorgenti d'acqua, drenaggi, ventilazione, intonaci compatibili). [Aiello (2022); Desarnaud (2021); EMERISDA (2014); Premoli (2015); Riminesi (2018); Seidu (2019); Vanhellemont (2018)] La comunità scientifica dovrebbe convergere su protocolli condivisi (metriche, tempi, reporting, controlli) per consentire una valutazione comparabile e, se esistenti, identificare condizioni di efficacia circoscritte (classi di materiali, geometrie, regimi termo-igrometrici, contenuti salini). Solo così sarà possibile distinguere, con rigore, promessa e prestazione, valorizzando i casi in cui soluzioni come la neutralizzazione di carica mostrano segnali positivi e chiarendo, al contempo, perché molti altri dispositivi elettromagnetici non raggiungono gli stessi risultati.

4.5.3 Metodi geomagnetici

I metodi geomagnetici per il controllo dell'umidità da risalita capillare costituiscono un'evoluzione più recente e, per certi versi, ancora più controversa dei metodi elettromagnetici.

L'ipotesi di fondo è che l'energia prodotta dal campo magnetico terrestre, o altre sorgenti ambientali verrebbe captata, amplificata e ritrasmessa verso la muratura inducendo vibrazioni negli atomi di idrogeno: ciò ridurrebbe le forze di adesione tra acqua-substrato e favorirebbe la caduta gravitazionale delle molecole e la progressiva asciugatura della muratura. [EMERISDA (2014); Seidu (2019)]

Dal punto di vista fisico, il richiamo più frequente è la risonanza dell'idrogeno, nota in radioastronomia come "riga a 21 cm" (1420 MHz), associata alla transizione di spin tra protone ed elettrone. Tuttavia, è fondamentale osservare che questa transizione riguarda atomi isolati di idrogeno in condizioni di vuoto interstellare, mentre nelle murature reali le molecole d'acqua sono legate da interazioni idrogeno-ossigeno in un reticolo complesso. Le forze in gioco nella risalita capillare, descritte dalla legge di Jurin e determinate da parametri quali tensione superficiale, angolo di contatto e raggio capillare, non risultano documentatamente influenzabili da campi magnetici deboli come quello terrestre, la cui intensità si colloca nell'ordine di 30–60 μT, enormemente inferiore rispetto ai valori necessari per modificare legami intermolecolari.

Le soluzioni proposte differiscono dal punto di vista operativo. Alcuni sistemi si fondano sull'idea che particolari configurazioni geologiche, come la presenza di falde, corsi d'acqua sotterranei o faglie, possano generare squilibri elettromagnetici capaci di "caricare" elettricamente le murature; in tali casi il dispositivo avrebbe la funzione di riequilibrare tali campi, eliminando così la causa primaria della risalita capillare. Altri dispositivi, invece, dichiarano di operare come ricevitori e trasmettitori passivi: essi assorbirebbero l'energia geomagnetica e ambientale, la trasformerebbero in oscillazioni a frequenze compatibili con la risonanza dell'idrogeno, e la irradierebbero nuovamente nello spazio circostante, generando una sorta di "effetto magneto-cinetico" che faciliterebbe il deflusso dell'acqua verso il basso. L'installazione di tali sistemi è generalmente accompagnata da rilievi accurati del contenuto di umidità, verifiche di eventuali interferenze elettromagnetiche e controlli periodici, con la dichiarata possibilità di garantire un funzionamento pluridecennale senza manutenzione.

Dal punto di vista scientifico, la plausibilità di tali meccanismi rimane fortemente discussa. Se da un lato la risonanza dell'idrogeno a 1420 MHz rappresenta un fenomeno fisico reale e ben noto, dall'altro mancano evidenze che essa possa essere efficacemente riprodotta e applicata in un contesto edilizio, in cui l'acqua è presente in forma molecolare e interagisce con substrati porosi complessi. Inoltre, la quantità di energia disponibile dal campo

geomagnetico o dalle onde radio ambientali è estremamente ridotta e non appare sufficiente, in termini di ordine di grandezza, a influenzare le forze capillari responsabili della risalita. Le osservazioni positive riportate in alcuni casi, comprese applicazioni in edifici di prestigio, non risultano ancora supportate da verifiche scientifiche indipendenti condotte con metodologie controllate. È verosimile che parte degli effetti registrati possa essere attribuita a fattori concomitanti, come condizioni ambientali variabili, riduzione di altre fonti di umidità, miglioramento della ventilazione o l'attenzione derivante dal monitoraggio sistematico.

In conclusione, i metodi geomagnetici rappresentano una proposta suggestiva, che coniuga il fascino del campo terrestre e della fisica fondamentale dell'idrogeno con l'idea di un risanamento non invasivo, ecologico e privo di consumo energetico. Tuttavia, allo stato attuale delle conoscenze, la distanza tra il principio dichiarato e le leggi fisiche note resta significativa. [Seidu (2019)] Come già osservato per i metodi elettromagnetici, anche in questo caso la valutazione critica deve distinguere tra l'efficacia empiricamente riportata in alcuni contesti e la plausibilità teorica del meccanismo proposto, richiedendo ulteriori verifiche sperimentali indipendenti prima di poter confermare in maniera rigorosa l'effettiva validità di tali soluzioni.

4.5.4 Metodi a energia potenziale naturale (o elettrostatici)

I metodi a energia potenziale naturale si propongono di contrastare la risalita capillare sfruttando esclusivamente potenziali elettrici naturali o fenomeni di polarizzazione passiva, senza ricorrere ad alimentazioni o generatori esterni. In pratica rientrano in questa categoria due linee principali: elettrosmosi passiva (nota anche come elettrosmosi in corto circuito)e tecnologie a compensazione di carica tramite barre polarizzate, varianti basate su reti o aste polarizzate e approcci ibridi che combinano l'azione passiva con il trasporto di colloidi mediante fenomeni elettroforetici indotti dalla stessa pila naturale.

Il presupposto comune è che nelle murature umide esistano potenziali spontanei (da flusso o di contatto) misurabili e sfruttabili per ridurre la componente elettrocinetica del trasporto idrico. [EMERISDA (2014)]

A livello concettuale entrano in gioco nozioni di elettrostatica ed elettrochimica superficiale. Un conduttore immerso in un campo elettrostatico si polarizza (cariche si concentrano alle estremità) e modifica localmente la distribuzione del potenziale V (con $E=-\nabla V$). In sistemi porosi attraversati da liquido, il movimento ionico può generare potenziali da flusso misurabili tra estremità distinte di un campione. In murature reali sono state osservate discrepanze di potenziale spontanee dell'ordine di qualche decina o qualche centinaio di millivolt (valori riportati in letteratura variano tipicamente da 10–20 mV in condizioni di risalita lieve fino a ~300–500 mV in casi di risalita intensa). Queste grandezze sono alla base dell'elettrosmosi passiva: l'idea è che la chiusura controllata del circuito elettrico tra sommità e base del muro (tramite sonde, fili e prese di terra) possa annullare o ridurre il potenziale naturale responsabile di una parte del trasporto elettrocinetico dell'acqua, inducendo un riequilibrio della componente elettrica del flusso.

La tecnica dell'***elettrosmosi passiva*** è descritta da procedure operative ormai consolidate (Fig. 44-45-46): rimozione dell'intonaco lungo la traccia orizzontale prevista, esecuzione di carotaggi nella muratura (diametro ≈ 1 cm, profondità ≈ 30 cm) realizzati lungo un allineamento orizzontale posto a circa 80–82 cm dal piano esterno, inserimento di sonde ottenute da spezzoni di rame Ø ≈ 5 mm e lunghezza ≈ 30 cm nei fori, realizzazione di una traccia lungo l'allineamento per l'alloggiamento del conduttore, inserimento e fissaggio di un conduttore (filo di rame Ø ≈ 5 mm) e saldatura con le sonde, riapplicazione dell'intonaco con malte a base di calce e sabbia e pitture traspiranti ove opportuno; quindi perforazioni nel terreno per collocare prese a terra (aste in magnesio o altro metallo idoneo) in pozzetti

sotto quota di fondazione, posizionate in zone che presentino potenziale maggiore rispetto al piano fondale; infine il collegamento tra filo e prese a terra (aste di rame distanziate ≈ 2 m) chiude il circuito. In molte versioni commerciali e pratiche è prevista la posa di tale circuito lungo tutto il perimetro murario. Esiste anche una variante che integra elettroforesi: nei fori del conduttore si inserisce un liquido colloidale che, sotto l'azione della pila naturale, dovrebbe essere spinto nei capillari al posto dell'acqua, ostruendoli; in tali configurazioni il catodo è spesso in acciaio galvanizzato. Tale tecnica promette la saturazione dei capillari in 18–24 mesi, a differenza della modalità "circuito chiuso" che richiede di fatto la permanenza della connessione per tempi indefiniti. [Agyekum (2019); Castelluccio, Vitiello (2016); Delgado (2016); EMERISDA (2014); Franzoni (2014); Franzoni (2018); Guolo (2024); Lombardi (2005); Lopez-Arce (2009); Musso; Vitiello, Castelluccio (2019)]

Un'alternativa passiva largamente diffusa è la ***tecnologia a barre polarizzate*** (compensazione di carica). Qui l'intervento implica perforazioni più importanti per l'alloggiamento delle aste (fori del diametro tipico ≈ 28 mm), inserimento di barre metalliche (aste in acciaio dolce non legato rivestite con doppia guaina di neoprene vulcanizzato o in rame debolmente legato) di lunghezza tipica 120–200 cm, diametro 12–16 mm, messe a interassi variabili (20–100 cm) e con possibilità di inclinazione fino a ~30° per intercettare la linea di confine tra zona bagnata e asciutta; le barre vengono poi sigillate con malta compatibile e la finitura viene eseguita con intonaci tradizionali o macroporosi e pitture traspiranti. In murature sotterranee o in scantinati l'installazione può prevedere due file (interna ed esterna) collegate con barre verticali per creare uno sbarramento. La tesi tecnica proposta dai sostenitori è che le barre, polarizzandosi per induzione elettrostatica rispetto al potenziale naturale della muratura, generino un campo locale che si oppone alla causa che genera la risalita, comportandosi da dipoli che separano cariche e "bloccano" la risalita di molecole d'acqua cariche. [Musso]

È importante sottolineare la differenza concettuale e operativa fra le due soluzioni:

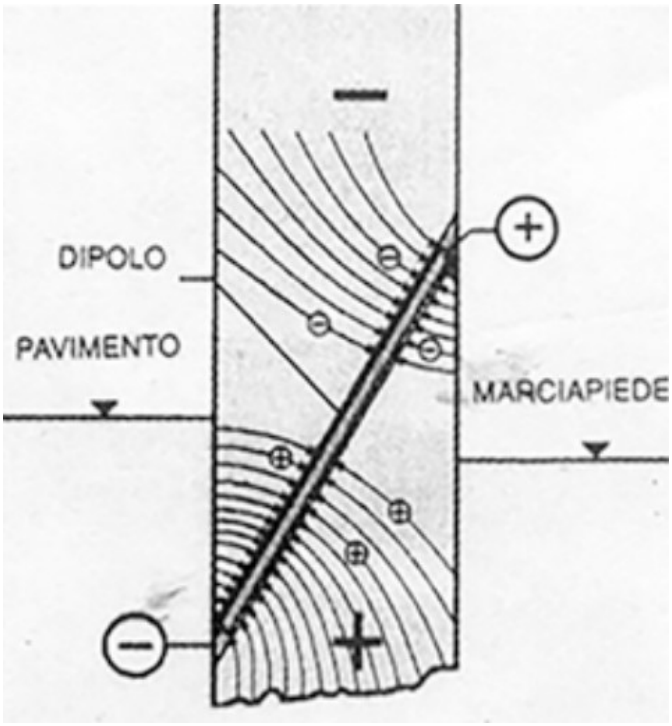


Fig. 44 | Elettrosmosi passiva [Fonte: Castelluccio, R., & Rossetto, M., "Rising Damp in Historical Buildings: Restoration Using the Charge Neutralization Technology CNT Domodry", SMC Magazine, n. 2/2015, pp. 78-88.]

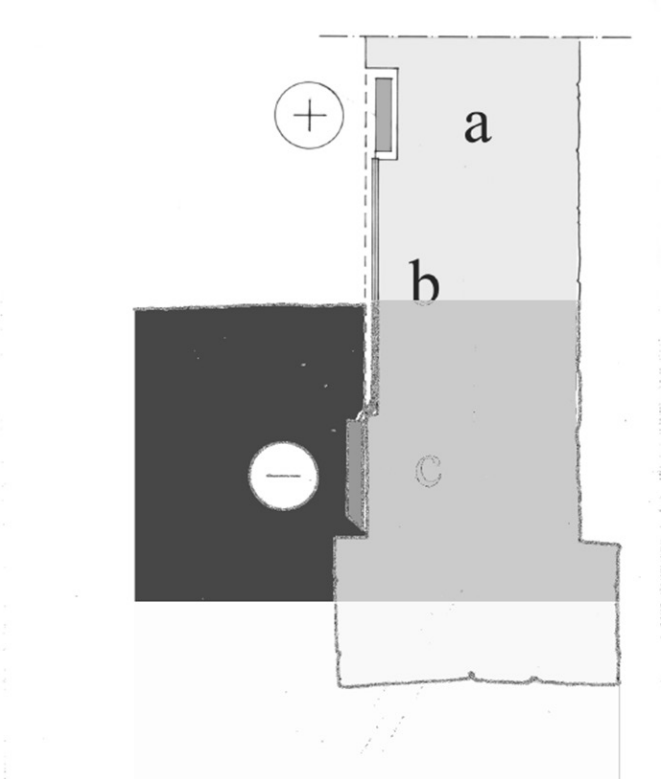


Fig. 45 | Schema di funzionamento dell'elettrosmosi passiva [Fonte: Musso]

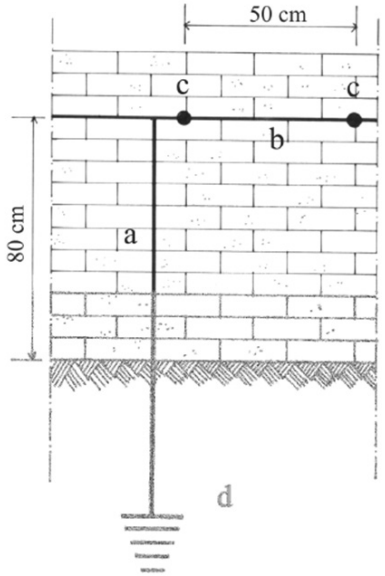


Fig. 46 | Schema di funzionamento dell'elettrosmosi passiva [Fonte: Musso]

l'elettrosmosi passiva sfrutta potenziali spontanei e realizza una connessione conduttiva al terreno (circuito chiuso), agendo quindi sulla circolazione di correnti reali; le barre polarizzate operano invece per induzione senza collegamento a terra, modificando localmente il campo elettrostatico mediante dipoli indotti. Entrambe sono metodi passivi appartenenti alla stessa famiglia, condividono obiettivi e vulnerabilità, ma il meccanismo fisico dominante e le modalità di intervento differiscono, la prima modifica il circuito elettrico, la seconda la distribuzione del campo, e queste differenze hanno implicazioni pratiche in termini di progettazione, suscettibilità a correnti vaganti, e scelta dei materiali.

Queste metodologie sono presentate con vantaggi apparenti: nessuna alimentazione esterna richiesta; invasività limitata rispetto a interventi meccanici (sebbene non nulla), potenziale lunga durata e, nel caso delle barre, un effetto strutturale secondario di consolidamento. Viene inoltre avanzata l'argomentazione della "autoregolazione" del sistema, secondo la quale la polarizzazione segue e contrasta automaticamente le variazioni di potenziale spontanee legate alla risalita. Nonostante ciò, l'analisi critica e le evidenze sperimentali impongono diverse cautele.

Emergono immediatamente i limiti fisico-meccanici, la semplice rimozione o cortocircuitazione di una differenza di potenziale non modifica direttamente i parametri geometrici e chimico-fisici che regolano la capillarità. La parte del trasporto che è puramente capillare o dovuta a gradienti osmotici non viene eliminata dall'annullamento della componente elettrocinetica. Pertanto le tecniche basate su potenziali naturali possono al massimo agire sulla quota di movimento dipendente da forze elettriche, lasciando inalterato il resto.

Dal punto di vista operativo, durabilità e stabilità dell'effetto risultano messe a rischio da fenomeni elettrochimici e interferenze ambientali. In ambienti salini gli elettrodi e le barre possono polarizzarsi e corrodersi: misurazioni sperimentali indicano che, dopo poche decine di ore, la differenza di potenziale misurata tra elettrodi può attenuarsi o scomparire a seguito della polarizzazione degli stessi; la corrosione riduce la continuità e la resistenza del circuito, compromettendo l'efficacia. Correnti vaganti nel terreno e la presenza di elementi conduttivi preesistenti (catene, tubazioni, ferri di armatura, infrastrutture tranviarie o ferroviarie) possono deviare o annullare il percorso elettrico previsto e concentrare linee di forza in modo non desiderato. Per mitigare la corrosione si raccomandano materiali nobili (titanio, leghe titanio-platino) o protezioni specifiche, ma tali accorgimenti aumentano costi e complessità progettuale. Inoltre, il metodo non è applicabile o è fortemente sconsigliato su strutture in cemento armato o dove reti metalliche pervasive renderebbero inefficace l'intervento.

La letteratura sperimentale e le applicazioni in campo mostrano risultati eterogenei e spesso critici [EMERISDA (2014); Guolo (2024); Lopez-Arce (2009); Musso; Seidu (2019)]. Pionieri della disciplina e revisori hanno segnalato l'inefficacia pratica dell'elettrosmosi passiva e di alcune applicazioni a barre polarizzate; autori come

Massari (1992) hanno documentato come i risultati sperimentali non confermino una riduzione stabile della risalita capillare. Esempi emblematici di insuccesso, citati nella letteratura tecnica, includono casi in cui il trattamento non produce effetti apprezzabili su degrado da sali o umidità di risalita severe. Tali evidenze hanno portato molti studiosi a considerare il metodo come largamente abbandonato o da riservare a casi estremamente selezionati.

Un rischio pratico da non sottovalutare è l'effetto secondario dell'accumulo idrico: la creazione di una "schermatura" che non raggiunge le fondazioni può comportare l'accumulo di acqua al di sotto della zona schermata, con potenziali effetti negativi (aumento localizzato di contenuto idrico e di salinità). Inoltre, la visibilità delle barre o dei fili e la possibilità di macchie da ruggine conseguenti a corrosione sono aspetti pratici da considerare nella conservazione del patrimonio storico.

Esistono inoltre varianti e approcci ibridi: alcuni protocolli combinano l'elettrosmosi passiva con l'elettroforesi per veicolare agenti sigillanti; altri propongono l'uso di sistemi di armonizzazione di fase che, secondo i proponenti, utilizzano campi energetici naturali per riequilibrare potenziali. Se questi approcci possono, in casi limitati e ben controllati, favorire il deposito di materiali che riducano la permeabilità capillare, la loro riproducibilità e replicabilità restano problematica e fortemente dipendenti da condizioni locali, dimensioni dei pori, natura chimica dei colloidi e stabilità delle correnti.

Per tutte queste ragioni, il giudizio operativo che emerge è prudente e prescrittivo. Se si considera l'applicazione di metodi a energia potenziale naturale, è imprescindibile un protocollo diagnostico rigoroso: misure preliminari dei potenziali spontanei (prospetto dei valori e valutazione della loro variabilità temporale), indagine della presenza di correnti vaganti e di elementi conduttori, misurazioni gravimetriche su carote pre-installazione e previsione di carote di controllo post-intervento, rilievi termografici, profili di impedenza della muratura, analisi della concentrazione e del tipo di sali, registrazione dettagliata delle forzanti climatiche e dell'uso dell'edificio. È inoltre raccomandabile prevedere la scelta di materiali resistenti alla corrosione per sonde, conduttori e barre (titanio, giunzioni in titanio, barre zincate con protezione o rivestimenti specifici), progettare la geometria dell'intervento in funzione della reale linea di massima risalita e, dove possibile, prevedere file di aste interne ed esterne per intercettare la base della muratura. I protocolli sperimentali dovrebbero includere pareti di riferimento non trattate e monitoraggi pluriennali (durata minima raccomandata 12–24 mesi, preferibilmente 36 mesi) per distinguere effetti reali da variazioni stagionali e contributi esterni.

In sintesi, i metodi a energia potenziale naturale sono coerenti con il principio di non apporto energetico esterno e possono costituire opzioni interessanti, soprattutto in contesti monumentali dove la non invasività è un vincolo stringente. Tuttavia la loro efficacia non è generalizzabile e si manifesta, nelle evidenze disponibili, con risultati molto variabili e spesso non decisivi [Seidu (2019)]. Il loro impiego può talvolta contribuire a ridurre componenti specifiche del trasporto elettrocinetico o fornire un vantaggio accessorio (consolidamento mediante barre), ma non deve essere considerato una soluzione unica alla risalita capillare. La raccomandazione metodologica è pertanto di inserire tali interventi solo in strategie integrate che affrontino le cause profonde (drenaggi, gestione delle acque a raso, miglioramento della ventilazione, intonaci traspiranti, barriere fisiche ove possibili) e sottoporli a protocolli sperimentali e di monitoraggio rigorosi e trasparenti, con pubblicazione dei dati grezzi e dei metodi di analisi per consentire valutazioni indipendenti e comparabili.

4.6

INTERVENTI PALLIATIVI DI MITIGAZIONE

4.6 Interventi palliativi di mitigazione

Quando per vincoli tecnici, economici o di tutela non è possibile intervenire direttamente sulle cause fisiche dell'umidità da risalita capillare, la pratica professionale ricorre spesso a soluzioni atte a rendere gli spazi immediatamente fruibili [Lopez-Arce (2009); Musso; Premoli (2015); Torres (2018)]: contropareti con intercapedine, strati "sacrificabili", rivestimenti protettivi e altre tecniche che hanno in comune il problema di non rimuovere la presenza d'acqua nel paramento murario, ma di attenuarne gli effetti negli ambienti. Queste misure, che in questa sede vengono definite "interventi di mitigazione palliativa", hanno una finalità gestionale e temporanea e devono essere trattate come tali: il loro obiettivo primario è il miglioramento funzionale o estetico dell'ambiente, non il risanamento della muratura. È però indispensabile chiarire che, nella maggior parte dei casi documentati e sull'evidenza dei meccanismi fisico-chimici del fenomeno, tali interventi non solo non risolvono la risalita capillare, ma possono contribuirne attivamente al peggioramento, per questo motivo non dovrebbero essere progettati o realizzati come soluzioni autonome e definitive.

La fisica che governa la relazione tra paramento ed intervento è semplice ma spesso sottovalutata: lo stato igrometrico della muratura è il risultato dell'equilibrio tra apporti d'acqua dal basso, capacità di accumulo del materiale, presenza e comportamento dei sali e vie di evaporazione. Qualsiasi misura che riduca la superficie o la capacità di evaporazione (vernici, membrane, strati impermeabili) tende a spostare l'umidità verso quote differenti del paramento, spesso più alte, e a favorire l'accumulo salino in corrispondenza di nuove giunzioni e contatti. Allo stesso modo, una intercapedine mal ventilata produce aria satura che elimina la possibilità di evaporazione verso la camera d'aria e può quindi provocare un innalzamento del fronte umido. Le conseguenze di queste dinamiche non sono soltanto fisiche ma anche di conservazione: i sali cristallizzati aggrediscono i leganti storici, inducono distacchi e favoriscono processi di disgregazione che diventano più difficili da trattare una volta nascosti dietro rivestimenti o contropareti.

La controparete interna, spesso realizzata a pochi centimetri dal paramento umido, è forse l'esempio più emblematico di misura palliativa [Musso; Premoli (2015)]. La camera d'aria così ottenuta ha lo scopo di migliorare temporaneamente il comfort igrometrico e termico dell'ambiente, schermando visivamente la muratura danneggiata e incrementando la resistenza termica del sistema parete-pavimento. Tipicamente lo spazio tra le due superfici varia tra 3 e 10 mm (nella pratica si adotta comunemente uno spessore compreso tra 3 e 6 cm per problematiche da condensazione, mentre per casi generici di umidità di risalita si scelgono 5–10 cm), e il nuovo paramento è costruito con elementi a basso numero di giunti (mattoni a coltello, tavelline, pannelli in conglomerati inorganici) poggiati su un foglio isolante, con cura a evitare collegamenti strutturali che possano funzionare da ponte per l'umidità. In fase di realizzazione sono stati suggeriti accorgimenti come l'introduzione, durante la posa, di un letto di carbone vegetale secco alto 10-15 cm nella base dell'intercapedine, per assorbire eventuale condensato, e, nei casi di muri molto imbevuti, l'esecuzione di un canale di raccolta delle acque sul fondo della camera d'aria. [Guolo (2024); Premoli (2015)]

La funzione igrometrica reale di una controparete dipende però dalla gestione della ventilazione dell'intercapedine. Se la camera è completamente chiusa, l'aria satura all'interno impedisce l'evaporazione dal paramento e favorisce l'innalzamento del fronte umido fino a quote superiori a quelle originali. Se invece si prevede la ventilazione naturale, questa

deve essere adeguatamente dimensionata e distribuita: la pratica suggerisce aperture collocate ogni circa 150 cm e di diametro prossimo ai 20 cm, situate strategicamente per favorire il ricambio d'aria. Quando la ventilazione è ottenuta mediante estrazione forzata, la disposizione delle bocche richiede attenzione: l'adozione di aperture sia in alto sia in basso verso l'ambiente interno è un errore, perché si rischia di immettere aria satura e umida nel locale; la soluzione corretta in presenza di ventilazione meccanica è invece l'estrazione controllata dell'aria verso l'esterno. In ogni caso la manutenzione delle aperture e dei condotti di aerazione è condizione necessaria per mantenere l'efficacia del sistema nel tempo. Da un punto di vista conservativo, inoltre, l'inserimento di contropareti è accettabile se rimane reversibile e se i materiali impiegati sono compatibili con il supporto storico; l'utilizzo, al contrario, di membrane o colle impermeabili che sigillano definitivamente la muratura costituisce una perdita di reversibilità e può aggravare il degrado del paramento originale.

Gli strati "sacrificabili", intonaci o pannelli pensati per assorbire sali e umidità, sono una risposta pragmatica e temporanea: quando ben progettati e realizzati con malte a base di calce, questi strati proteggono il paramento storico e possono facilitare interventi successivi. Tuttavia la loro durata è limitata e richiede programmazione della sostituzione. L'esperienza mostra che l'effetto immediato può essere positivo ma che nel medio periodo si possono manifestare fenomeni indesiderati: l'accumulo di sali subito sopra la giuntura di intervento, la riattivazione dei sali in seguito a lavori di riparazione male coordinati, e l'innalzamento della risalita per effetto di "pompa" se lo strato favorisce la migrazione capillare. Casi pratici documentati evidenziano, inoltre, la criticità di non rimuovere l'intonaco alterato per una fascia sufficiente (una raccomandazione operativa comune è la rimozione fino a circa 50 cm oltre la linea visibile di risalita), poiché la presenza di residui salini può compromettere rapidamente qualsiasi nuova finitura e determinare reazioni chimiche con i materiali introdotti.

Particolarmente dannosa è l'impermeabilizzazione superficiale del paramento mediante vernici, guaine o rivestimenti non traspiranti. Tale pratica "soffoca" la via di evaporazione e sposta il problema verso quote più alte o verso il piano di calpestio, aggravando il danno su superfici che prima erano in grado di smaltire umidità. Sui pavimenti umidi, l'applicazione di strati impermeabili può indurre un trasferimento dell'umidità verso le pareti perimetrali; viceversa gli intonaci definiti "evaporanti-assorbenti", se impiegati in modo inappropriato, possono inizialmente ridurre l'umidità apparente ma favorire nel tempo una risalita accentuata e l'accumulo di sali nascosti dietro la finitura. Per questi motivi è cruciale evitare trattamenti che riducano la traspirabilità del sistema murario a meno che non esista un piano coerente che affronti anche la gestione delle cause e dei sali. [Premoli (2015); Seidu (2019); Vitiello, Castelluccio (2019)]

Alla luce di questi elementi, ogni intervento palliativo deve essere subordinato a una diagnostica esaustiva che includa rilievi visivi, ricerche storiche, analisi chimiche dei sali e misurazioni igrometriche affidabili (preferibilmente metodi gravimetrici per la caratterizzazione del contenuto d'acqua). La diagnosi costituisce il presupposto per definire la strategia d'intervento e per decidere se e come integrare misure palliative con misure causali. Ugualmente imprescindibile è la definizione di un piano di monitoraggio e manutenzione: rilievi strumentali alla consegna dell'intervento e successivi controlli a tre, sei e dodici mesi (poi annuali fino alla stabilizzazione), ispezione e pulizia periodica delle aperture di ventilazione, verifica dei punti di contatto e programmazione della sostituzione degli strati sacrificali. Senza questi elementi, la palliatività si trasforma facilmente in incuria e genera costi e danni crescenti per il manufatto.

Per evitare che le misure palliative siano scelte da sole per motivi di rapidità o di costo immediato, è opportuno che il capitolato e il progetto esplicitino la subordinazione dell'intervento: la terminologia proposta è «interventi di mitigazione palliativa, subordinati all'adozione di interventi causali entro tempi e condizioni definite». Tale formulazione rende trasparente la natura temporanea

della misura, vincola committente e esecutore e inserisce questi interventi all'interno di un percorso programmato verso la rimozione della causa. Contestualmente, la responsabilità progettuale richiede che siano documentate le scelte di materiali (preferibilmente malte idrauliche leggere a base di calce per le finiture, isolanti minerali o naturali con comportamento igrometrico testato), le modalità di ventilazione delle intercapedini, le condizioni di reversibilità e un bilancio chiaro dei costi complessivi comprensivi del monitoraggio e della manutenzione.

In conclusione, gli interventi di mitigazione palliativa mantengono un ruolo operativo legittimo in situazioni di vincolo, ma la proposta sostenuta in questo capitolo è che tali misure non devono essere usate come soluzioni autonome. Se adottate isolatamente esse quasi sempre peggiorano le condizioni di conservazione del paramento nascondendo i danni e favorendone la progressione. Per rispettare i principi della buona conservazione, ogni intervento palliativo deve essere strettamente integrato in una strategia causale, essere progettato con criteri di compatibilità e reversibilità e sorretto da un piano di monitoraggio e manutenzione che ne limiti i rischi nel tempo.

PARTE II

SPERIMENTAZIONI PROGETTUALI E VERIFICHE OPERATIVE

ANALISI DEI CASI STUDIO

5

5.1 Castello di San Basilio

5.2 Chiesa di San Pietro Barisano

5.3 Chiesa di San Francesco D'Assisi

5.4 Castello dei Conti Carafa

5.5 Chiesa di Santa Maria Assunta in Cielo

5.6 Chiesa di S. Giuseppe

5.7 Antica Pieve di San Gennaro

5.8 Alquerìa "4 Camins"

5.9 Alquerìa "El Trull"

05 ANALISI DEI CASI STUDIO

Come abbiamo visto l'umidità da risalita capillare costituisce oggi un problema centrale nel restauro e nella conservazione del patrimonio architettonico: le condizioni igrometriche sfavorevoli non compromettono soltanto l'aspetto estetico delle superfici, ma alterano progressivamente la salubrità degli ambienti e le proprietà chimico-fisiche delle murature, arrivando talvolta a generare danni irreversibili alla stabilità degli organismi edilizi.

Nonostante il crescente interesse scientifico e professionale sull'argomento, permangono lacune importanti nella sulla comprensione e risoluzione del problema. La letteratura scientifica e tecnica faticano a mettere a punto protocolli standardizzati per la valutazione dell'efficacia degli interventi e, spesso, gli studi rimangono confinati a singoli casi studio [Lubelli (2018); Bernardo (2023)], rendendo difficile una comparazione sistematica tra tecniche e la definizione di risultati generalizzabili.

A ciò si somma una carenza di documentazione operativa e, soprattutto, la scarsa disponibilità di dati di monitoraggio a lungo termine che rendono difficile valutare la durabilità delle soluzioni implementate e riconoscere vantaggi e limiti delle stesse nel corso del tempo.

La selezione dei casi studio è stata concepita come strumento metodologico per colmare, entro i limiti della ricerca, le lacune che ostacolano la definizione di pratiche di risanamento condivise.

Il campione è quindi stato costruito per massimizzare la rappresentatività delle condizioni rilevanti ai fini della diagnosi, della gestione e del monitoraggio della risalita capillare: differenti materiali e tecniche costruttive (tufo, calcarenite, laterizio, adobe, murature miste, calcestruzzo armato), varietà di tipologie edilizie (fortificazioni, architetture rupestri, edifici religiosi, architetture rurali), varietà di destinazioni d'uso (mostre, luoghi di culto, abitazioni, funzioni pubbliche...) e contesti geomorfologici e idrogeologici eterogenei.

Questa diversità consente di osservare il fenomeno nelle sue combinazioni più significative e di mettere in relazione manifestazioni, cause e soluzioni operative.

Un criterio pratico determinante è stata la possibilità di acquisire o integrare evidenze diagnostiche: il campione privilegia edifici per i quali era disponibile documentazione (rilievi, analisi materiche, documentazione tecnica degli interventi) o era realisticamente possibile programmare ed effettuare apposite campagne di monitoraggio. Inoltre, la presenza di interventi già eseguiti o in corso, in alcuni casi, ha consentito di valutare non solo la fenomenologia del degrado, ma anche i criteri di selezione delle scelte progettuali, le soluzioni implementate e la gestione in corso d'opera e *post-operam*, elementi fondamentali per affrontare la carenza di studi valutativi e di monitoraggio a lungo termine.

Dal punto di vista comparativo, la ricorrenza dell'applicazione del sistema CNT-Domodry è stata considerata un'opportunità analitica: avere un cluster di edifici trattati con la medesima tecnica di deumidificazione permette di approfondire le condizioni di impiego, le soluzioni complementari e le modalità di monitoraggio richieste.

Le due *alquerìas* spagnole, deliberate eccezioni rispetto a questa prassi, sono state inserite per introdurre un confronto internazionale. Osservare prassi diagnostiche, normative e scelte di cantiere in un diverso contesto culturale e regolamentare arricchisce la valutazione della trasferibilità e dei limiti delle strategie adottate in ambito italiano.

La selezione ha inoltre tenuto conto di una logica *purposive* e qualitativa in quanto non si ricercata una rappresentatività statistica,

ma una molteplicità di soluzioni che, messe a confronto, possano mettere in luce analogie, discontinuità e criteri operativi trasferibili.

La metodologia adottata per l'analisi dei casi studio nasce dall'esigenza di coniugare rigore scientifico e tutela conservativa, con l'obiettivo di costruire profili conoscitivi integrati, ripetibili e comparabili tra i diversi edifici. Per questo motivo l'indagine è stata impostate come una sequenza organica di fasi complementari, ciascuna finalizzata a fornire informazioni necessarie per la successiva.

Il primo passaggio è stata la ricognizione documentaria e la ricostruzione storico-evolutiva dei casi studio: lo studio delle fonti storiche, delle fasi costruttive e delle trasformazione permette di inquadrare i fattori che possono aver inciso sulle problematiche conservative dell'organismo edilizio.

Accanto a questo approccio storico, l'analisi del contesto territoriale e geotecnico costituisce un prerequisito interpretativo: cartografie, informazioni geologiche sul sottosuolo e dati piezometrici, quando disponibili, sono stati considerati elementi determinanti per la caratterizzazione degli apporti idrici e valutare la probabilità di alimentazione da falda.

A questa ricognizione storica e di contesto segue una fase centrale della metodologia di analisi: la raccolta, verifica e analisi sistematica della documentazione relativa agli interventi di restauro e risanamento pregressi. Relazioni tecniche, report diagnostici, documentazione fotografica, schede di cantiere e report di monitoraggio sono stati raccolti e confrontati per ricostruire la storia degli interventi, valutare la coerenza e la compatibilità delle soluzioni adottate, individuare eventuali criticità e punti di forza e comprendere l'efficacia e la durabilità degli interventi nel tempo.

Completata la fase documentale il passo successivo sono stati i sopralluoghi in situ con rilievo visivo e documentazione fotografica ad alta definizione che hanno permesso una prima valutazione dello stato di conservazione del bene. A questo sono state integrate indagini diagnostiche non invasive mirate alla caratterizzazione spaziale e quantitativa dell'umidità: la termografia a infrarossi è stata utilizzata per individuare anomalie termiche ed eventuali fronti umidi non sempre evidenti ad occhio nudo; misure temo-igrometriche ambientali e delle superfici hanno fornito dati puntuali sul contenuto umido e sulle condizioni microclimatiche locali. Dove disponibili, rilievi fotogrammetrici o 3D sono stati impiegati per georeferenziare punti di misura e per correlare con precisione la documentazione visiva ai dati strumentali.

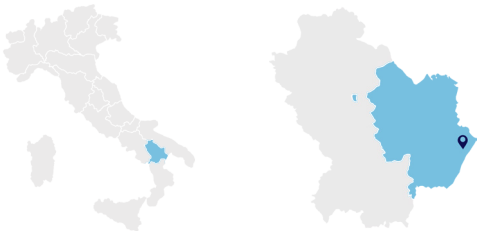
Nel rispetto della conservazione del patrimonio architettonico, i prelievi per le analisi di laboratorio sono stati limitati a frammenti già distaccati delle superfici. Le analisi di laboratorio, quando eseguite, hanno avuto l'obiettivo di caratterizzare i materiali costruttivi e definire la composizione e la morfologia dei sali solubili responsabili delle efflorescenze e sub-efflorescenze saline. Queste informazioni sono state considerate fondamentali per valutare l'efficacia e la compatibilità degli interventi e per individuare i rischi connessi all'incompatibilità materica delle finiture con i substrati originali.

Dal punto di vista interpretativo, i dati raccolti in ciascuna fase sono stati integrati per costruire per ciascun caso studio un profilo olistico che mette in relazione: condizioni di alimentazione idrica (primaria o secondaria), caratteristiche dei materiali e delle tecniche costruttive, presenza e natura dei sali solubili, condizioni microclimatiche e pratiche d'uso.

5.1

CASTELLO DI SAN BASILIO

5.1 Castello di San Basilio



Localizzazione:	Pisticci, MT
Anno/Epoca di costruzione:	VII secolo
Tipologia edilizia:	Masseria fortificata
Destinazione d'uso:	Location per eventi e sede di collezione d'arte contemporanea
Proprietà:	Privata
Diagnosi e monitoraggio:	Termografia IR, analisi termoigrometriche, analisi ponderali, analisi al microscopio ottico e al SEM
Tecnologia costruttiva:	Muratura portante in pietra e laterizio



5.1.1 Analisi del contesto

5.1.1.1 Contesto territoriale

Il territorio della Basilicata, in particolare la fascia costiera ionica e l'immediato entroterra, è storicamente caratterizzato da una fitta rete difensiva con insediamenti fortificati e torri di avvistamento, testimonianza dell'importanza strategica della regione nei sistemi di controllo e comunicazione dall'età medievale all'età moderna (Fig. 46) [Bixio (2008); Masini (2006); Morese (2014); Valente (1940)].

Tale rete difensiva è collegata a vie commerciali di rilievo, come la cosiddetta "via del grano" che, nel XVI secolo durante il Regno di Napoli, metteva in collegamento la fertile Puglia con Napoli e contribuiva alla necessità di presidio territoriale e di protezione dei transiti commerciali. [Bixio (2008); Masini (2006); Morese (2014)]

In questo quadro territoriale si inserisce la masseria fortificata di San Basilio, nota anche come *Castello di San Basilio* o *Castello Appio*, ubicata nella località omonima, Comune di Pisticci (MT), su una lieve altura a circa 60 m s.l.m., in posizione strategica tra i bacini del fiume Basento e Cavone.

Dal punto di vista geologico e geomorfologico, l'area in cui sorge il complesso architettonico di San Basilio presenta una stratigrafia caratterizzata da "*depositi sabbiosi fini con livelli argillosi e lenti conglomeratiche e depositi conglomeratici spesso clinostratificati a cui si intercalano livelli sabbiosi*" [ISPRA (2016) Foglio 508-Policoro]. Questa configurazione è riportata nella Carta Geologica d'Italia (Foglio 508 - Policoro) (Fig. 47) e implica alternanze di permeabilità e porosità che possono favorire fenomeni di ritenzione idrica e condizioni favorevoli alla risalita capillare delle murature.

La costruzione, originariamente edificata nel VII secolo dai monaci basiliani, svolgeva la funzione di "*guardiola*" del sistema costiero, assicurando comunicazione e controllo tra le torri costiere (Torre di Basento, Torre Bollita, Torre di Mozza, Torre della Salandrella, Torre di Scanzano, Torre del Sinni) e i centri urbani dell'entroterra (Anglona, Bernalda, Montalbano,



Fig. 46 | Rete di fortificazioni lungo i principali corsi fluviali e vie di comunicazione tra l'XI e il XII secolo [Masini (2006)]

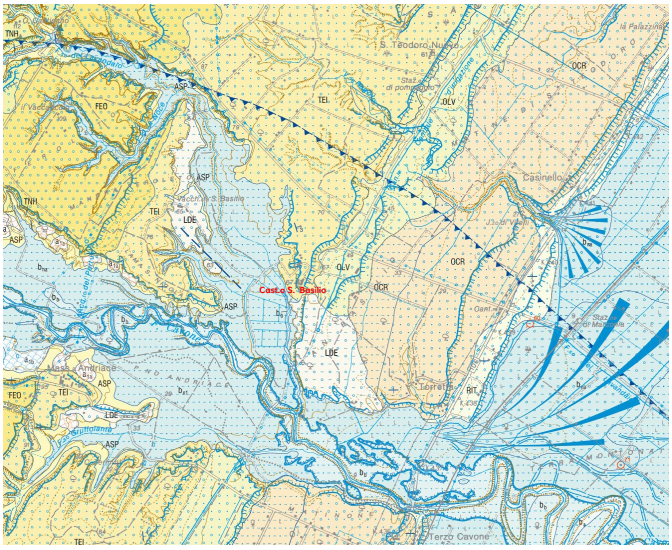


Fig. 47 | Stralcio Carta Geologica d'Italia 1:25.000, F.508-Policoro

Montescaglioso, Petrolla, Pisticci, Rotondella, Tursi...). [Bixio (2008); Il castello di San Basilio; Visit Pisticci; Italiapedia]

Nel corso dei secoli il complesso architettonica ha subito diverse trasformazioni e svolto diverse funzioni. Nel XII secolo il feudo passò in proprietà ai monaci benedettini dell'Abbazia di Santa Maria del Casale di Pisticci, consolidando la vocazione agricola diventando grangia [Morese (2014)]. Più tardi, a partire dagli anni '60

del XX secolo, i marchesi Berlingieri, mecenati e amanti dell'arte contemporanea, riadattarono alcuni ambienti del complesso per ospitare una collezione di famiglia di dipinti, fotografie, sculture e installazioni d'arte contemporanea, conferendo al sito una funzione espositiva e sociale che perdura tuttora [Viceconte (2022)].

Per la rilevanza storica, architettonica e culturale e per l'attuale funzione di location per eventi e custode di una collezione d'arte, il Castello di San Basilio è stato selezionato come caso studio dell'attività di ricerca.

Per la sua importanza storica e architettonica, dal 1989 la masseria fortificata è stata classificata come bene architettonico di interesse culturale ai sensi della ex legge 1089/39 "Tutela delle cose d'interesse Artistico o Storico" attuata dal D.Lgs. 42/2004 "Codice dei beni culturali e del paesaggio" (Fig. 48) (per la normativa italiana di riferimento si rimanda all'Appendice A). [Ministero della Cultura. (2020). Masseria S. Basilio. Vincoli in Rete.]

5.1.1.2 Evoluzione storica e architettonica

La masseria fortificata di San Basilio si estende per una superficie complessiva di circa 3000 m^2. L'impianto attuale è il risultato di numerose fasi costruttive e trasformazioni che si sono succedute dal VII secolo ad oggi, testimonianza della stratificazione storica e delle diverse funzioni che il complesso architettonico ha ricoperto nel tempo (Fig. 49).

Le prime fasi documentabili risalgono al VII secolo, quando i monaci basiliani definirono un primo nucleo monastico a vocazione agricola. L'impianto organizzativo di base (quattro blocchi rettangolari disposti attorno ad un cortile quadrangolare, destinati a refettorio, cucina, dormitorio, archivio, sala capitolare e scuderie) si radica su questa fase iniziale, definendo la matrice distributiva che rimarrà riconoscibile nelle fasi successive.

Un rilevante intervento di connotazione militare avviene in età normanna, intorno al 1050, quando venne edificata la torre normanna, attribuita a Ruggero I di Sicilia, che si eleva

INFO

Beni culturali immobili Puntuali	
id_bene	3028099
denominazione	masseria S. Basilio
tipo_bene	masseria
comune	Pisticci
provincia	Matera
classe	Architettonici di interesse culturale dichiarato
metodo_georef	
id_cartarischio	96131
id_benitut	77137
cod_iccd	
indirizzo	SS. Jonica in agro di Pisticci, snc
id_contenitore	
id_area_archeol_vinc	
Allegati	B_77137_ID_1142255arco B_77137_ID_1142700torre_interna B_77137_ID_1142260torre_esterna B_77137_ID_1142258prospetto_laterale B_77137_ID_1142262torre B_77137_ID_1142257cortile_interno B_77137_ID_1142252planimetria masseria S. Basilio masseria S. Basilio masseria S. Basilio

Regioni	
id	17
denominazione	Basilicata

Province	
id	077
denominazione	Matera
sigla	MT
id_reg	17
tipo	Provincia

Comuni	
id	020
id_pro	077
denominazione	Pisticci
cod_catasto	G712

Fig. 48 | Scheda della Masseria fortificata di San Basilio [Fonte: Ministero della Cultura (2020) Masseria S. Basilio]

in posizione dominante rispetto al cortile e conferisce all'insieme la valenza di presidio difensivo, oltre che di centro produttivo (Fig. 50). L'inserimento della torre segna una trasformazione tipologica importante: l'edificio



Fig. 49 | Ortofoto della Masseria Fortificata di San Basilio



Fig. 50 | Cortile con torre Normanna [Fonte: Artribune. https://www.artribune.com/arti-visive/arte-contemporanea/2022/09/san-basilio-a-pisticci-castello-basilicata-intervista-aloisia-leopardi/]



Fig. 51 | Torre cilindrica sul lato est [Foto del 26/10/2022]

monastico si integra nel sistema di controllo del territorio, con funzioni di osservazione e comunicazione.

L'evoluzione prosegue con adattamenti all'accessibilità ed alla rappresentanza. L'ingresso, concepito in origine con ponte levatoio, viene sostituito da un ponte ad arco in muratura, al cui coronamento sono posti tre stemmi in pietra che attestano la successione dei diversi proprietari, dal più recente al più antico: i marchesi Berlingieri, i monaci benedettini e i monaci basiliani.

Nel XVI secolo, nel quadro del più ampio rafforzamento difensivo del Regno di Napoli, la masseria viene ulteriormente fortificata con una torre cilindrica sul lato est (Fig. 51) e due piccole torri per l'armeria sui lati sud ed ovest. [Italiapedia]

L'ultima fase costruttiva di rilievo si data al XVIII secolo, quando viene realizzata una cappella con copertura a cupola e pianta a croce greca, segnando il progressivo orientamento del complesso verso funzioni residenziali e rappresentative, oltre che produttive.

Nell'assetto odierno, l'edificio con fondazioni in pietra e murature portanti in mattoni, conserva la fisionomia risultante da queste fasi sovrapposte: nucleo monastico originario, torre normanna, integrazioni cinquecentesche di

carattere difensivo e la cappella settecentesca.

Negli ultimi decenni, sotto la proprietà dei marchesi Berlingieri, il complesso architettonico ha conosciuto una serie di interventi manutentivi e conservativi condotti in maniera prevalentemente episodica e con finalità di tipo estetico o funzionale immediato, spesso in risposta a problematiche localizzate e senza un piano organico di conservazione.

Le informazioni relative a tali operazioni, tramandate perlopiù attraverso testimonianze orali, risultano frammentarie e prive di una documentazione tecnica sistematica, rendendo complessa la ricostruzione delle scelte progettuali, dei materiali e delle tecniche impiegate.

Questa discontinuità negli interventi, unita alla complessità materica e stratigrafica dell'edificio e alle diffuse condizioni di degrado superficiale che interessano oggi l'organismo edilizio, ha reso necessario avviare un percorso di conoscenza più approfondito, volto a verificare l'efficacia o inefficacia degli interventi eseguiti e a contribuire all'individuazione di *best practices* per il risanamento e la conservazione del patrimonio architettonico.

5.1.2 Diagnosi preliminare

5.1.2.1 Metodologia diagnostica

La campagna diagnostica condotta presso la masseria fortificata di San Basilio ha previsto l'impiego integrato di tecniche qualitative (Termografie IR) e quantitative (prove ponderali) finalizzate alla valutazione dllo stato igrometrico delle murature, e in particolare, alla verifica dell'efficacia e della durabilità degli interventi contro l'umidità da risalita capillare (per la normativa di riferimento si rimanda all'Appendice B).

Per l'esecuzione delle indagini termografiche, corredate dalla misurazione dei parametri ambientali (Tab. 1), è stata utilizzata una termocamera "Testo" modello "890-2 Kit", conforme ai parametri raccomandati e in grado di garantire l'affidabilità dei risultati ottenuti grazie alle sue caratteristiche tecniche:



Fig. 52 | Campagna diagnostica con termocamera IR [Foto del 26/10/2022]

	08/04/2015		08/06/2016		18/09/2017	
	Interno	Esterno	Interno	Esterno	Interno	Esterno
UR [%]	33,0	34,0	52,5	40,5	27,0	28,4
T_{aria} [°C]	15,8	12,2	25,0	26,5	24,3	25,1
$T_{rugiada}$ [°C]	-0,3	-2,7	14,7	12,2	4,1	5,5

Tab. 01 | Parametri ambientali rilevati nelle tre campagne diagnostiche del 08/04/2015, 08/06/2016 e 18/09/2017

risoluzione geometrica di 640x480 pixel (con super risoluzione di 1280x960 pixel), risoluzione termica di 0,04 °C e un IFOV di 0,71 mrad (Fig. 52). [Testo (s.d.)]

Per ottenere risultati affidabili e comparabili, le indagini termografiche sono state condotte applicando una procedura standardizzata

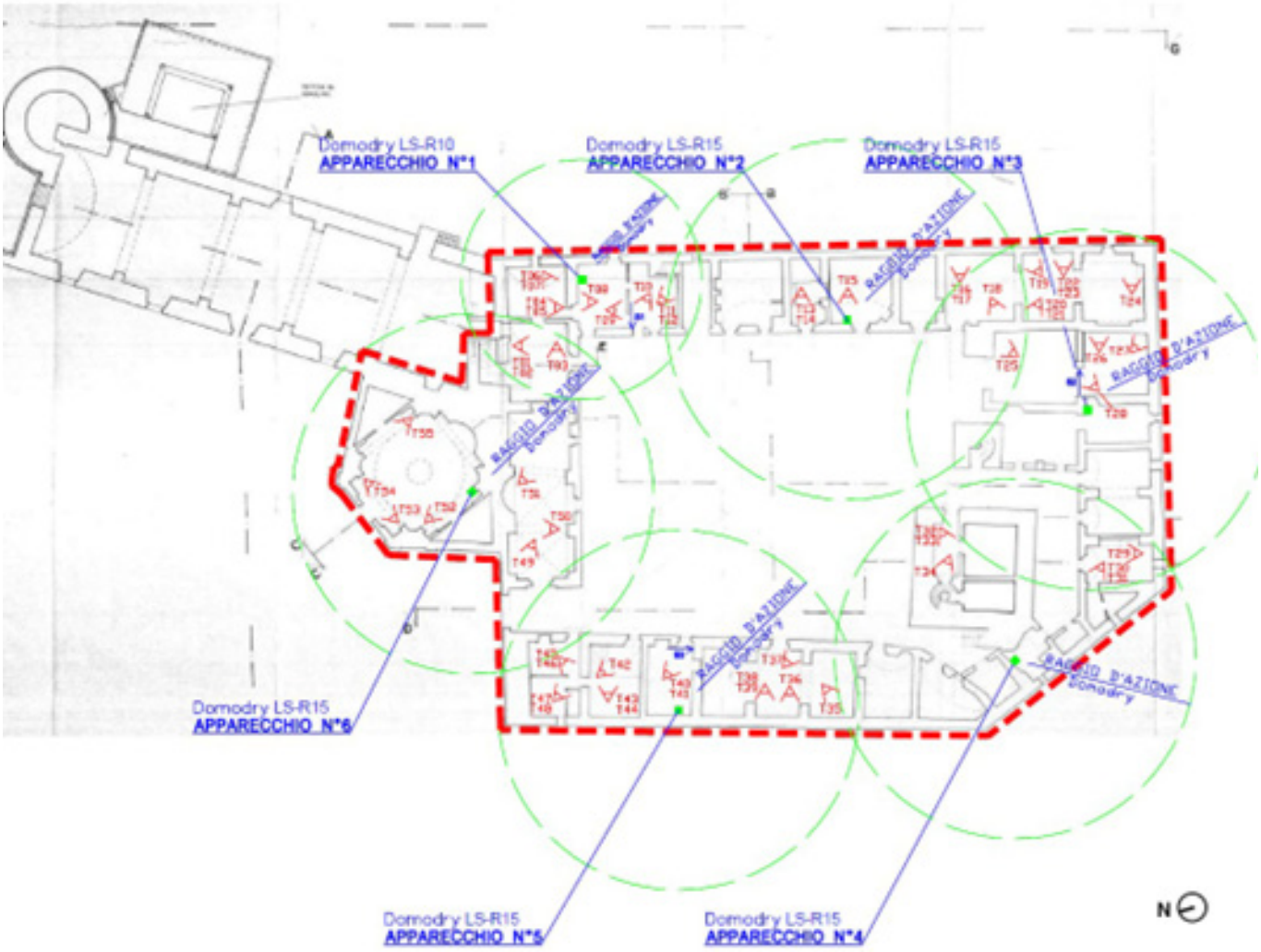


Fig. 53 | Localizzazionde dei dispositivi CNT-Domodry e posizione dei punti di analisi termografica e campionamento per i test gravimetrici

e replicabile in ogni campagna diagnostica, comprendente: rilevamento dei parametri ambientali (temperatura, umidità relativa), calibrazione della termocamera, impostazione e/o valutazione dell'emissività della superficie analizzata, applicazione di eventuali dati di correzioni ambientali direttamente sul dispositivo. [Roche (2012)]

Le indagini sono state articolate in quattro fasi temporali distinte, corrispondenti a momenti chiave del processo di risanamento:

- Prima dell'installazione dei dispositivi CNT (2015/04/08)
- Un anno dopo l'installazione dei dispositivi CNT (2016/06/08)
- Due anni dopo l'installazione dei dispositivi CNT (2017/09/18)
- Sette anni dopo l'installazione dei dispositivi CNT (2022/10/26)

Questa scansione temporale ha consentito di analizzare in modo comparativo l'evoluzione del comportamento igrometrico delle murature, distinguendo tra la risposta immediata al trattamento e gli effetti di medio-lungo periodo.

L'analisi termografica ha consentito di ottenere una mappatura qualitativa dello stato di umidità delle murature e di identificare le aree critiche su cui concentrare le successive analisi gravimetriche, fornendo una base di confronto per le misurazioni quantitative (Fig. 53).

A integrazione delle indagini termografiche, infatti, sono state eseguite prove ponderali

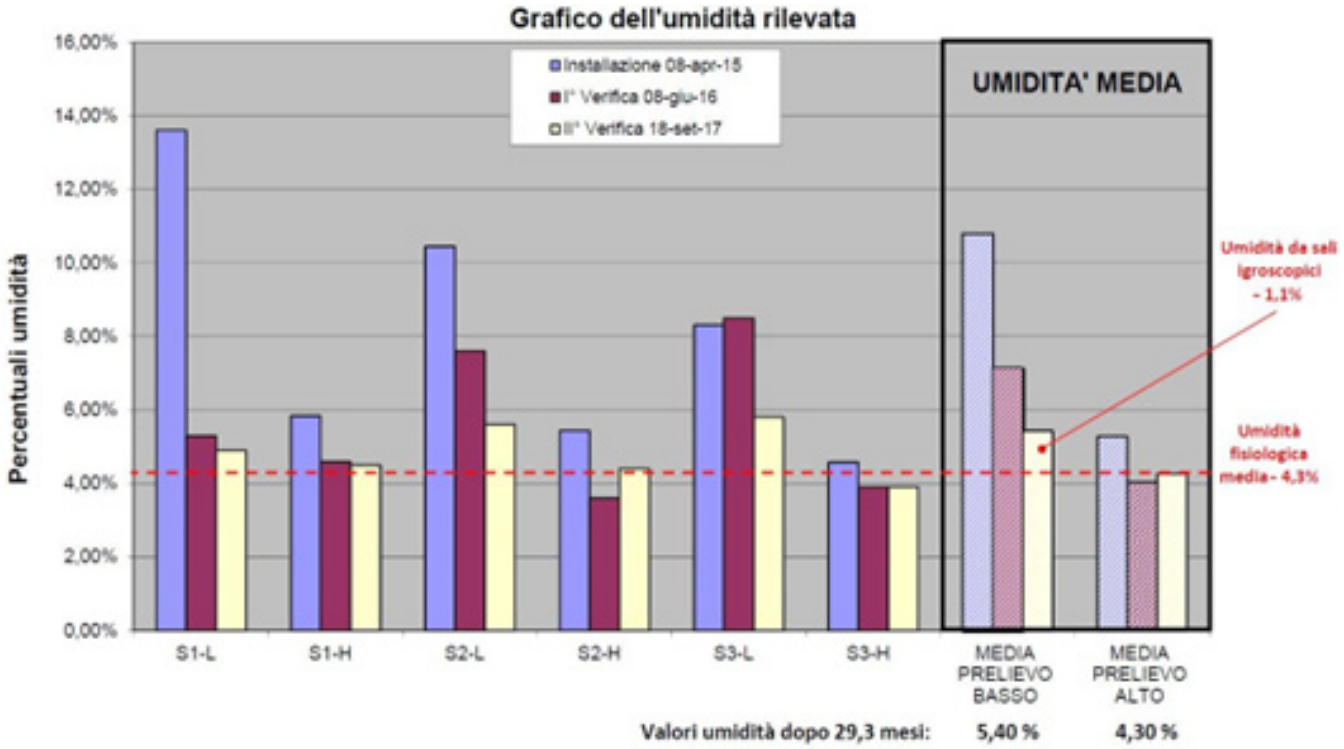


Fig. 54 | Grafico dell'umidità relativa ottenuta dai test gravimetrici nel 2015, 2016 e 2017

finalizzate alla determinazione quantitativa del contenuto d'acqua (Fig. 54). Il campionamento è stato effettuato in tre campagne diagnostiche:

- Prima dell'installazione dei dispositivi CNT (2015/04/08)
- Un anno dopo l'installazione dei dispositivi (2016/06/08)
- Due anni dopo l'installazione dei dispositivi (2017/09/18)

I campioni sono stati raccolti utilizzando un trapano a bassa velocità per evitare il surriscaldamento, in conformità con la norma UNI EN 11085:2003 "Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione del contenuto d'acqua: Metodo ponderale" [UNI EN 11085:2003].

I campioni estratti in sito sono stati messi in una provetta in vetro con chiusura ermetica e successivamente pesati in laboratorio utilizzando una bilancia con una precisione di 0,001 g. Lo stesso campione è stato essiccato a 105 °C fino a massa costante in una stufa elettrica da laboratorio, in grado di mantenere la temperatura di essiccazione con una stabilità e uniformità di ±2 °C. Prima di ogni pesatura, il campione è stato raffreddato in un essiccatore con gel di silice con indicatore (cloruro di cobalto) fino a temperatura ambiente.

I campioni sono stati prelevati in tre punti significativi per un totale di 6 campioni. Per ciascun punto, il campionamento è stato effettuato ad una profondità compresa tra 5 e 10 cm dalla superficie esterna e ad un'altezza di 20 cm e 100 cm dal piano di calpestio, contrassegnati rispettivamente con SL e SH.

Il contenuto d'acqua di ciascun campione è stato ottenuto dalla relazione "umidità [%] = W_w-D_w)/ D_w x100" (dove D_w è il peso del campione secco e W_w il peso del campione umido).

5.1.2.1 Stato di conservazione

La campagna diagnostica preliminare, condotta prima dell'installazione del sistema CNT, ha evidenziato una condizione di marcato degrado delle murature per umidità da risalita capillare, particolarmente diffusa in tutti i locali al piano

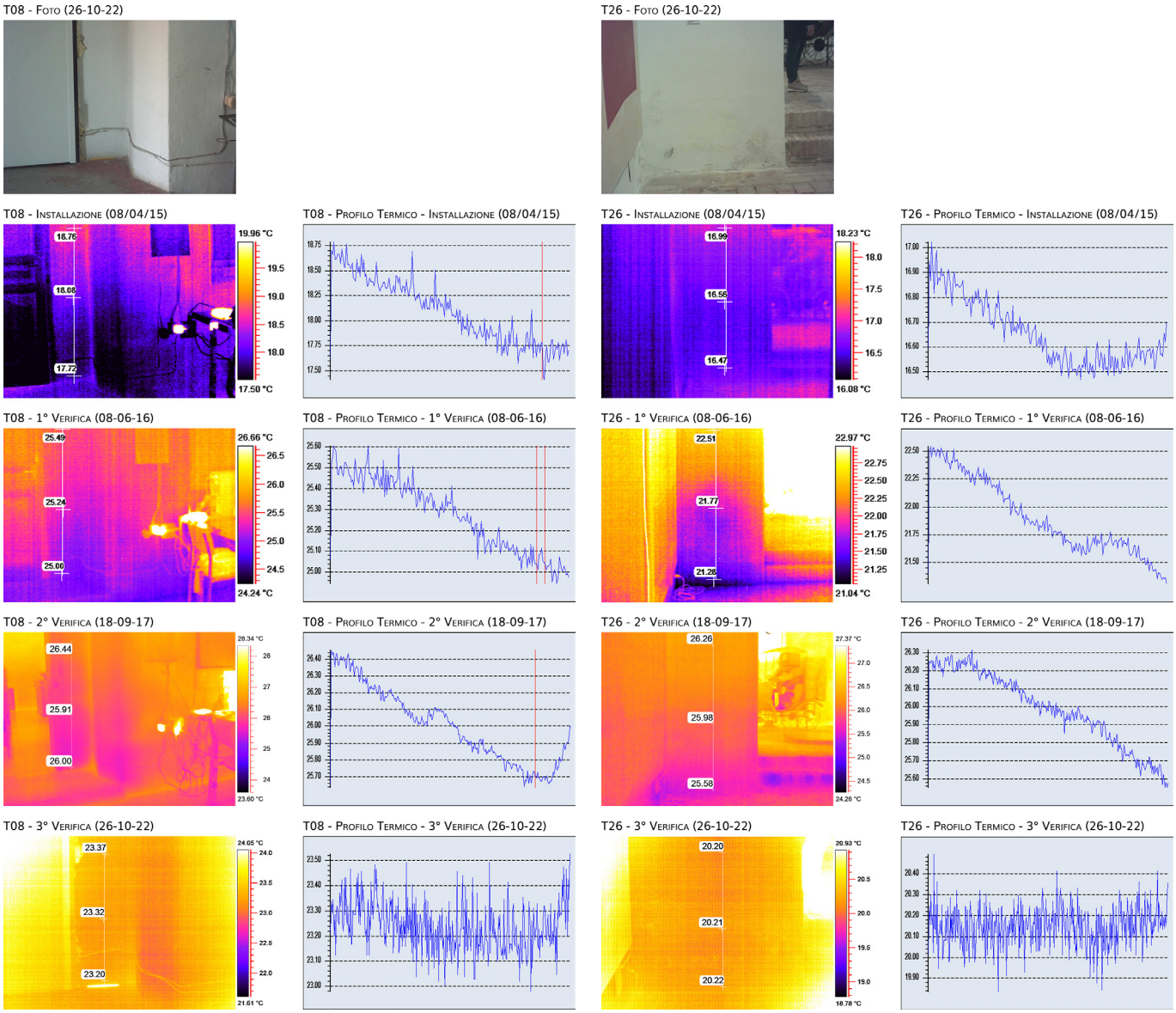


Fig. 55 | Termografie IR, con indicazione delle temperature lungo la parete, effettuate durante la campagna diagnostica negli anni 2015, 2017 e 2022

terra del complesso (Fig. 55-56).

L'indagine termografica i infrarossi ha restituito un quadro omogeneamente interessato da anomalie termiche compatibili con la presenza di umidità ascendente, con estensioni significative lungo tutto il perimetro delle murature. Le immagini IR mostrano, infatti, una netta differenza di temperatura con un gradiente termico di circa 0,9 °C con picchi fino a 3,8 °C tra le porzioni inferiori delle pareti e le fasce superiori al fronte umido.

Le prove gravimetriche, eseguite contestualmente nella prima campagna diagnostica del 2015, hanno fornito una quantificazione diretta del contenuto d'acqua nelle murature. I risultati mostrano valori di umidità superiori all'8% nei campioni SH (prelevati a 100 cm dal piano di calpestio), indice di un significativo grado di imbibizione e di una risalita capillare attiva (Fig. 54).

Dal punto di vista delle cause, la diffusione del fenomeno è attribuibile principalmente:

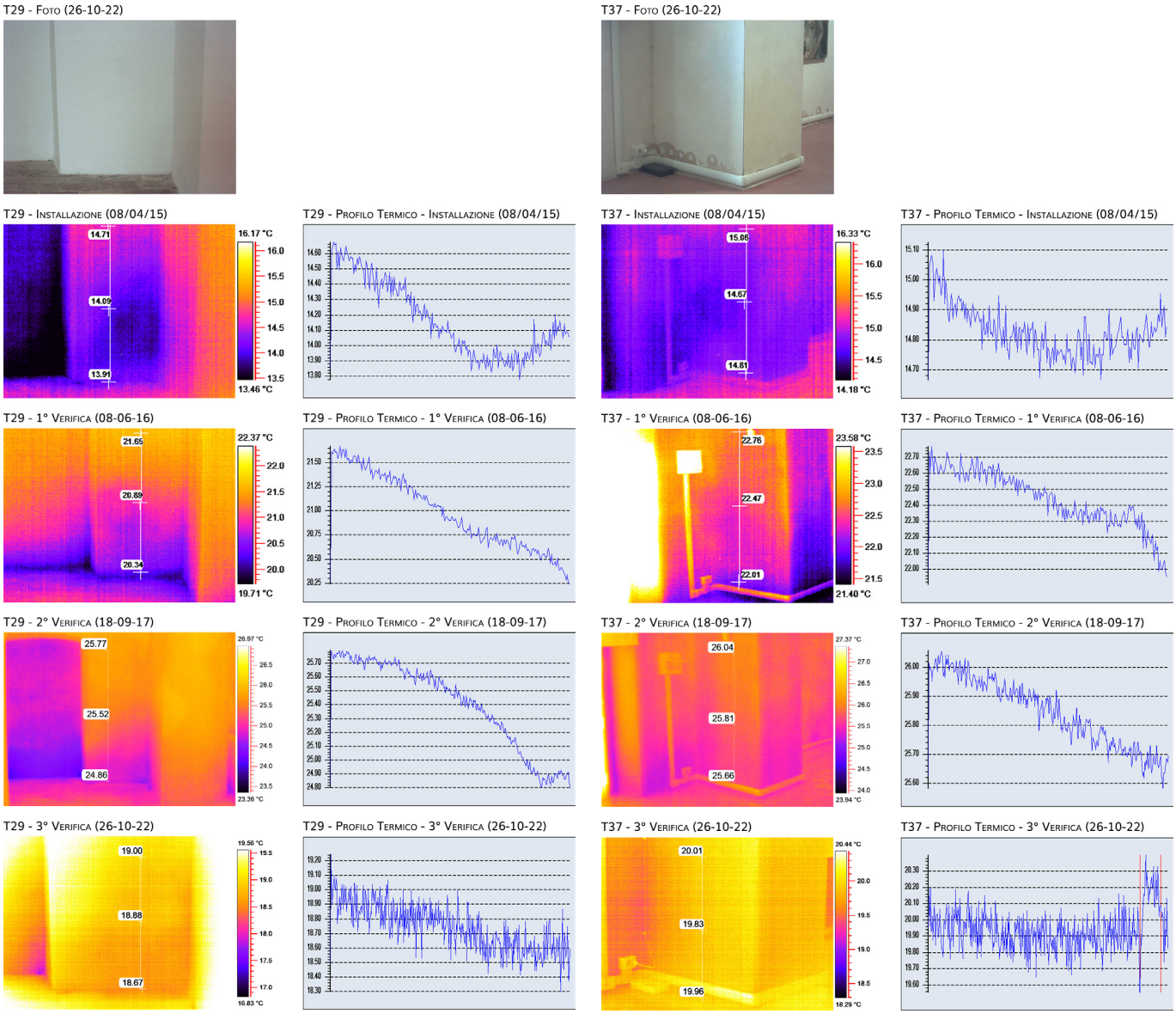


Fig. 56 | Termografie IR, con indicazione delle temperature lungo la parete, effettuate durante la campagna diagnostica negli anni 2015, 2017 e 2022

- alla porosità dei materiali da costruzione, che favoriscono l'assorbimento e la migrazione dell'acqua per capillarità
- alle caratteristiche geotecniche del terreno di fondazione, costituito da depositi limoso-argillosi sciolti (Carta Geologica d'Italia, scala 1:50000 - Foglio 507) [Lentini (1980)].

Le conseguenze del fenomeno sono riscontrabili in modo evidente sulle finiture superficiali, dove si osservano esfoliazioni diffuse della pellicola pittorica, efflorescenze e sub-efflorescenze saline, fessurazioni, rigonfiamenti e distacchi delle finiture superficiali.

Inoltre, la situazione conservativa, è stata ulteriormente aggravata dall'importante presenza di sali igroscopici contenuti nelle murature. La maggiore incidenza di efflorescenze nella parte meridionale, corrispondente alle porzioni che un tempo ospitavano le stalle, suggerisce che le funzioni pregresse del sito possano aver contribuito ad un accumulo di sali, con trasferimento alle murature ed alla

pavimentazione in laterizio.

5.1.3 Il progetto di risanamento

Le condizioni di degrado emerse nella fase di diagnosi preliminare e le esigenze conservative del complesso, anche legate alla tutela delle opere d'arte e delle installazioni contemporanee custoditi all'interno del complesso architettonico, hanno condotto, nel 2015, all'adozione di una misura di contrasto alla risalita capillare basata sull'installazione di sei dispositivi CNT-Domodry (cinque con un raggio d'azione sferico di 10 m ed uno con un raggio di 15 m) che sfruttano la cosiddetta "Tecnologia a Neutralizzazione di Carica".

In anni successivi, secondo informazioni prevalentemente orali verificate durante il sopralluogo del 2022/10/26, si è proceduto ad interventi chimici lungo l'intero perimetro della muratura del blocco ovest motivati dalla percezione di una persistenza dell'umidità da risalita capillare (Fig. 57); tuttavia, anche dopo tali trattamenti i fenomeni umidi si sono manifestati ancora e sono stati in seguito ricondotti a infiltrazioni esterne a quote maggiori, risolte mediante successiva impermeabilizzazione esterna delle superfici. I dettagli operativi e le schede tecniche relative a questi trattamenti non sono al momento reperibili, circostanza che limita la valutazione oggettiva di questi interventi.

Parallelamente, le superfici degradate sono state ripristinate mediante l'applicazione di intonaci non traspiranti e di pitture acriliche;

Fig. 57 | Fori delle iniezioni chimiche eseguite nel blocco ovest [Foto del 26/10/2022]



soluzioni che, pur apportando un immediato miglioramento estetico, risultano incompatibili con il processo naturale di evaporazione dell'acqua contenuta nella muratura e si dimostrano vulnerabili alle sollecitazioni indotte dalla cristallizzazione dei sali.

Poiché l'efflorescenza colpisce maggiormente le aree che un tempo fungevano da stalle (parte sud), non si può escludere che l'alta concentrazione di sali riscontrata in questi locali sia legata alle funzioni che svolgevano in passato. Questo tipo di utilizzo potrebbe aver portato ad un accumulo di grandi quantità di sali nel terreno, giustificando la presenza diffusa di efflorescenze sulle murature e sulla pavimentazione in laterizio. È quindi fondamentale, nella fase diagnostica, conoscere la storia dell'edificio.

5.1.4 Risultati

5.1.4.1 Monitoraggio post-intervento

Le verifiche termografiche condotte a distanza di 2 e 7 anni dall'installazione dei dispositivi CNT-Domodry hanno mostrato dapprima una significativa riduzione delle anomalie termiche (verifica del 2017/09/18) e, nella verifica di mantenimento del 2022/10/26, la scomparsa delle stesse lungo lo sviluppo verticale delle pareti (Fig. 55-56).

Le misure ponderali effettuate alla prime ispezione post-intervento (2016) hanno evidenziato che il contenuto d'acqua aveva raggiunto la normale umidità fisiologica della muratura asciutta, ad eccezione del campione SH3 che ha mostrato un aumento del contenuto umido.

La terza campagna del 2017 ha poi rilevato un contenuto medio d'acqua del 4,30% per i campioni nella parte alta della muratura e un valore del 5,40% nella parte bassa della muratura. Questi valori testimoniano un miglioramento rispetto allo stato pre-intervento ma che restano comunque influenzati dalla presenza di una componente di umidità igroscopica dovuta ai sali depositati sulla superficie e nella muratura e non rimossi prima

del ripristino delle finiture superficiali.

L'analisi spaziale dei fenomeni ha evidenziato due situazioni critiche distinte. Nella parte ovest della masseria, il comportamento anomalo è compatibile con gli apporti idrici localizzati o infiltrazioni esterne che hanno condotto all'esecuzione delle barriere chimiche e all'impermeabilizzazione della facciata esterna della muratura.

Nella parte sud, storicamente adibita a stalle, caratterizzata da una più marcata incidenza di efflorescenze e sub-efflorescenze, la presenza delle anomalie termiche e dei contenuti idrici è verosimilmente correlabile agli usci storici dei locali e al relativo accumulo di sali solubili nel terreno.

Di fatti, questi sali, una volta che l'umidità muraria evapora, restano intrappolati nelle murature e nelle finiture superficiali assorbendo umidità dall'ambiente e provocando fenomeni di umidità superficiale anche a paramento strutturalmente asciutto.

Nonostante le murature siano asciutte, l'ispezione in loco dell'ottobre 2022 ha consentito di documentare una presenza diffusa di alterazioni e degrado delle superfici. In diversi punti sono state osservate finiture superficiali non idonee al risanamento (intonaci cementizi non traspiranti e pitture acriliche) che hanno agito da "tappo" all'evaporazione naturale del contenuto umido residuo, favorendo la formazione di sub-efflorescenze dello spessore di 1-2 cm interposte tra muratura e finitura. (Fig. 58-59-60-61)

Per verificare la natura delle sub-efflorescenze e dei materiali impiegati, sono stati prelevati, in modo non invasivo, campioni di intonaco e sali da porzioni già distaccate.

I campioni sono stati analizzati utilizzando:

- Microscopio ottico ZEISS Axio Zoom V16 con luce trasmessa e riflessa (zoom 16x, campo d'ingrandimento da 7x a 112x, diaframma motorizzato, fotocamera a colori da 8,3 MP).
- Microscopio a scansione elettronica

Queste analisi (Fig. 62) hanno mostrato cristalli dalla forma filiforme, compatibili con la



Fig. 58 | Esfoliazioni superficiali causate dall'uso di finiture non traspiranti [Foto del 26/10/2022]



Fig. 59 | Efflorescenze saline e degrado della pavimentazione [Foto del 26/10/2022]



Fig. 60 | Degrado delle finiture superficiali [Foto del 26/10/2022]



Fig. 61 | Distacco degli intonaci in seguito alla formazione di importanti sub-efflorescenze saline [Foto del 26/10/2022]

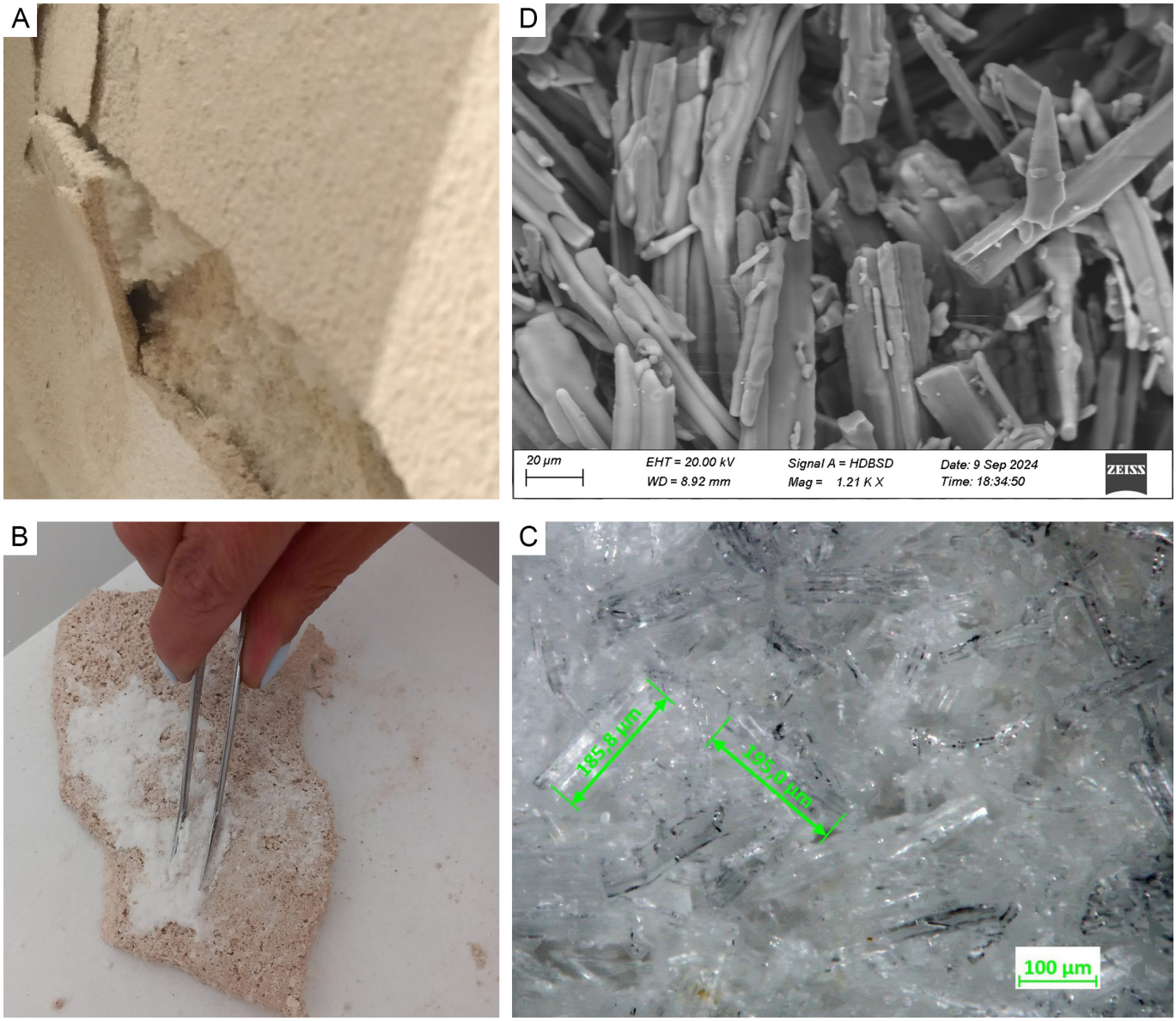


Fig. 62 | A) Intonaco distaccato; B) Campione di sale; C) Cristallo di salnitro al microscopio ottico; D) Cristallo di salnitro al microscopio a scansione elettronica (SEM)

morfologia nota per alcuni nitrati (tra cui il nitrato di potassio), correlabile alla funzione originaria dei locali. La presenza di nitrati è coerente con apporti organici (es. residui zootecnici), ma la conferma chimico-analitica andrebbe ottenuta con tecniche complementari (es. cromatografia ionica, analisi XRD).

5.1.4.2 Considerazioni finali

Le evidenze raccolte sul caso del Castello di San Basilio consentono di trarre bilanci operativi e riflessioni metodologiche rilevanti per la definizione di pratiche di risanamento sul patrimonio architettonico.

Sul piano operativo, i rilievi termografici e le misure ponderali indicano che la tecnologia CNT-Domodry ha effettivamente contribuito all'arresto della risalita capillare. Tuttavia, la sola riduzione del contenuto idrico non equivale a un successo completo dell'intervento.

La persistenza di efflorescenze e sub-efflorescenze e i degradi delle finiture superficiali, evidenziati fino all'ispezione del 2022, testimoniano che la componente salina non è stata adeguatamente affrontata e che

l'applicazione di materiali incompatibili ne ha accelerato il degrado.

L'inefficacia e la scarsa durabilità degli interventi errati sono sicuramente dovute ad una combinazione di fattori che riguardano la scarsa conoscenza del sito, ma anche la scarsa conoscenza dei fenomeni di degrado e l'assenza di uno studio preliminare adeguato senza interventi adeguati, coordinati e pianificati dell'intero processo di restauro.

È importante chiarire che, nel risanamento degli edifici affetti da umidità da risalita capillare, una volta eliminata la causa è fondamentale pulire le superfici da efflorescenze e sub-efflorescenze prima di eseguire qualsiasi altro intervento. [AA. VV. (2020); Casti (2015)]

Pertanto la valutazione dell'efficacia degli interventi non può limitarsi alla misura del solo contenuto idrico, ma è indispensabile integrare le analisi igrometriche con indagini salinometriche e prove di compatibilità materica.

Sul piano temporale, è importante precisare che la stabilizzazione igrometrica delle murature richiede tempi lunghi: dopo l'eliminazione della causa primaria è ragionevole attendersi un periodo di asciugatura che può estendersi dai 12 ai 36 mesi, variabile in funzione delle caratteristiche della muratura e delle condizioni microclimatiche. Tale processo può essere facilitato dalla rimozione degli intonaci degradati e/o dall'utilizzo di sistemi controllati di ventilazione meccanica o deumidificatori d'aria.

È importante che questo intervallo di asciugatura venga preso in considerazione nella programmazione di interventi di finitura e nella definizione del piano di monitoraggio.

L'esperienza di San Basilio mette in luce i rischi concreti legati ad interventi frammentari o dettati dalla sola percezione immediata del problema: l'esecuzione di barriere chimiche senza una diagnosi preliminare e l'applicazione di finiture non traspiranti si sono dimostrate soluzioni dannose ed invasive rispetto alla natura delle murature storiche.

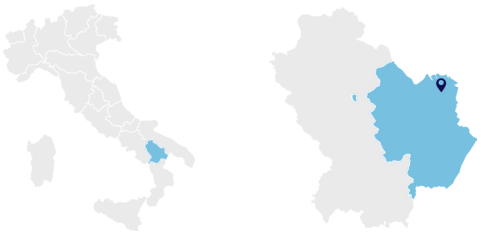
La carenza di documentazione tecnica organica sulle lavorazioni eseguite complica, inoltre, la ricostruzione retrospettiva delle scelte progettuali e ostacola l'attribuzione rigorosa degli effetti osservati alle singole misure adottate.

I risultati della ricerca sul Castello di San Basilio evidenziano quindi l'urgenza di un approccio integrato e multidisciplinare alla progettazione degli interventi di conservazione. È necessario coniugare la tutela del carattere storico-materico e la protezione delle collezioni custodite all'interno con pratiche di restauro scientificamente fondate e trasparenti. La diffusione di *best practices* deve comprendere non solo soluzioni tecniche corrette (desalinizzazione preventiva, impiego di intonaci e finiture traspiranti, protezione delle opere durante i lavori) ma anche l'adozione di un progetto organico che integri conoscenza storica, diagnostica chimico-fisica e monitoraggio continuo.

5.2

CHIESA
DI SAN PIETRO BARISANO

5.2 Chiesa di San Pietro Barisano



Localizzazione:	Matera, MT
Anno/Epoca di costruzione:	XII-XIII secolo
Tipologia edilizia:	Architettura religiosa rupestre
Destinazione d'uso:	Chiesa parrocchiale
Proprietà:	Arcidiocesi di Matera-Irsina
Diagnosi e monitoraggio:	Termografia IR, analisi termo-igrometriche, campionamenti litologici, analisi diffrattometriche, scotch tape test, test colorimetrico, water absorption test
Tecnologia costruttiva:	Interamente scavata nella calcarenite con facciata e rivestimenti in conci di tufo



5.2.1 Analisi del contesto

5.2.1.1 Contesto territoriale

L'area geografica su cui sorge Matera è l'altopiano delle Murge, una vasta piattaforma calcarea formatasi per sollevamento in epoca cretacea e caratterizzata da un andamento a gradoni verso il Mare Adriatico (Fig. 63).

L'azione dilavante delle acque meteoriche e i fenomeni erosivi hanno inciso profondamente questo rilievo, dando origine alle *gravine*, profonde insenature che modellano il paesaggio appulo-lucano e ne condizionano la morfologia insediativa.

La città occupa la porzione terminale di una gravina particolarmente articolata: due grandi cavità ad anfiteatro, divise da uno sperone mediano sostenuto dalla roccia calcarea più compatta. È su questo sperone che si è sviluppata la Civita, il nucleo urbano fortificato di origine antica; lungo le due cavità ad anfiteatro si sono progressivamente formati i rioni del Sasso Caveoso e del Sasso Barisano, che tra XV e XVII secolo si fusero con la Civita nell'agglomerato urbano riconoscibile oggi. Nell'assetto urbano pre-moderno i rioni erano altresì delimitati da canali di scolo delle acque piovane e reflue; questi canali furono in gran parte interrati nel ventennio fascista per consentire la costruzione di strade carrabili e migliorare le condizioni

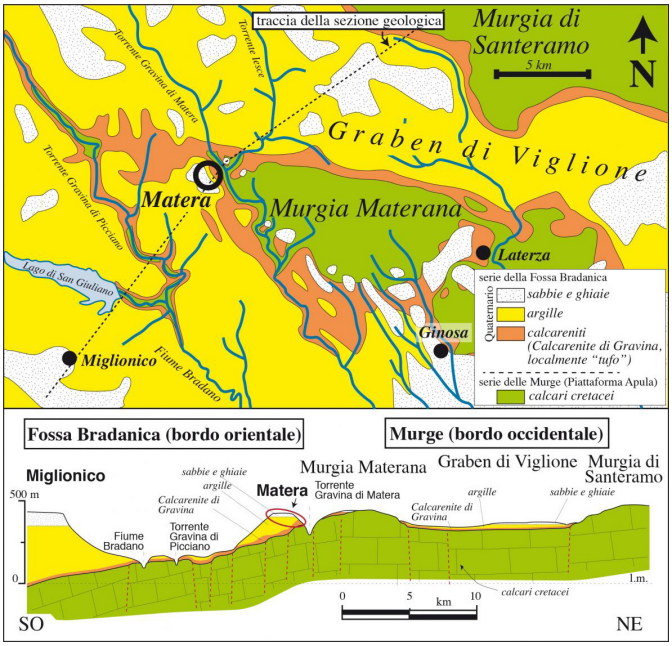


Fig. 63 | Mappa e sezione geologica della Murgia Materana [Fonte: https://www.socgeol.it/N1649/matera-geo-capitale-europea-della-cultura-2019.html]



igieniche. [Restucci (1998)]

Dal punto di vista geologico la successione litostratigrafica affiorante nella zona è, dal basso verso l'alto: calcari cretacei (Calcare di Altamura), calcareniti quaternarie (Tufo di Gravina) e, in sommità, argille grigio-azzurre quaternarie (Formazione delle Argille di Gravina). La formazione di interesse per il costruito materano è la calcarenite (il cosiddetto "tufo" di Matera), una roccia detritica tenera e porosa, costituita per oltre il 50% da granuli calcarei legati da cemento calcitico o da una matrice calcarea a grana fine; i colori variano dal giallastro al grigio-biancastro e spesso si riscontrano microfossili [Restucci (1998)]. Essendo costituita da microfossili e macrofossili cementati da scarso materiale calcarenitico, può essere considerata una vera e propria bioclastite. La componente non carbonatica a grana media o medio-fine è costituita da quarzo, feldspati, idrossidi di ferro, ematite e miche; mentre quella a grana fine o finissima da caolite, montmorillonite, geothite ed illite.

Questa variabilità granulometrica e di diagenesi determina punti con comportamento lapideo e punti con comportamento quasi sabbioso debolmente cementato, fattore che spiega la forte variabilità locale delle proprietà meccaniche e di durabilità (Fig. 64).

Prove geotecniche effettuate sui materiali dei Sassi indicano valori mediizzati ma variabili: peso specifico 1,6–2,1 t/m³; contenuto di carbonati 85–98,5%; resistenza a compressione su provini cubici 10–30 kg/cm²; resistenza massima a trazione dell'ordine di 2 kg/cm². Tali parametri evidenziano come, pur presentando in media discrete caratteristiche di resistenza, il banco calcarenitico manifesti vistose oscillazioni locali dello stato fisico, condizionando comportamento meccanico e vulnerabilità alle sollecitazioni ambientali. [Spilotro (1980); Restucci (1998); Andriani (2002); Giuffrè (1997); Lettieri (2004); Bernardo (2021)]

Questa natura litologica ha influenzato profondamente le tecniche costruttive locali: le grotte originarie, scavate obliquamente nel banco, sono state tamponate con facciate in muratura e successivamente ampliate mediante volte a botte in muratura (i *lamioni*), chiuse



Fig. 64 | Schema geologico dell'Italia Meridionale

da facciate con timpani scalettati. I blocchi di calcarenite ricavati dallo scavo presentano dimensioni tipiche (altezza 25–27 cm; larghezza 20–25 cm; lunghezza 45–60 cm) ed erano impiegati con giunti di malta in murature che, in alcuni tratti, raggiungono spessori compresi tra 50 cm e 120 cm. La polvere di lavorazione (tufina) veniva reimpiegata come componente inerte nelle malte; il legante era costituito da calci aeree o idrauliche, ottenute mediante cottura di calcarenite con diversi gradi di argille, impiegate anche per scialbature e pitture pigmentate (rosa, giallo, azzurro). Questa circolarità materica ha assicurato storicamente compatibilità e omogeneità estetica tra roccia e costruito. [Giuffrè (1997)]

Tuttavia, la calcarenite, pur facile da lavorare, presenta una bassa resistenza meccanica e una significativa vulnerabilità ai fenomeni di degrado biologico e fisico-chimico, soprattutto legati alla presenza d'acqua e ai cicli umidità/essiccamento. Queste condizioni favoriscono attacchi biologici, alterazioni chimiche e processi di sfaldamento, richiedendo particolare attenzione nella diagnosi e nella scelta dei materiali e dei trattamenti conservativi. [Andriani (2002); Bernardo (2021); Giuffrè (1997); Lettieri (2004)]

La tipologia degli insediamenti religiosi rupestri e la loro evoluzione funzionale si comprendono meglio collocandole nel contesto storico: la matrice insediativa parte dalla Civita e si diffonde nel territorio con numerose chiese rupestri e spazi ipogei che, nel Medioevo, furono fortemente influenzati dal monachesimo. Le chiese rupestri materane sono quasi interamente scavate nella calcarenite e organizzate secondo schemi iconografici e funzionali riconducibili a matrici culturali greche e latine, spesso sovrapposte nelle efficace coesistenza tipologica [Delle Cave (2018)].

Una classificazione generale delle chiese rupestri, utile per orientare la diagnosi e le scelte conservative, distingue tipologie in base a conformazione, ubicazione e organizzazione degli ambienti [Delle Cave (2018)]:

- ***Eremi o asceteri:*** costituiti da celle per anacoreti con spazi ipogei minimi e pianta disomogenea, caratterizzati da ingressi stretti e da semplici banchine-giacitoio interne
- ***Chiese lauriotiche:*** proprie di insediamenti eremitici più articolati, circondate da numerose cavità per gli speleoti e con la chiesa come fulcro comunitario
- ***Chiese cenobitiche:*** chiese inserite in complessi monastici multilivello (dormitori, magazzini, cappelle) con ampi ambienti comunicanti
- ***Santuari:*** chiese isolate destinate al pellegrinaggio
- ***Chiese cappelle:*** cripte o cappelle prossime all'abitato e aperte al pubblico
- ***Chiese dei casali:*** caratterizzate da impianti semplici e decorazioni essenziali

A questo quadro tipologico si associa la classificazione planimetrica: chiese a navata unica, chiese a due navate (una aula comune con due presbiteri), e le più imponenti basiliche rupestri a tre navate — queste ultime, con navata centrale predominante e robusti pilastri ricavati nella roccia, sono tipiche dei Sassi e generalmente indicano fasi di impianto più tarde. In questa categoria si inserisce la chiesa di San Pietro Barisano, caratterizzata dallo sviluppo a tre navate che termina in cavità absidali.

Dagli anni Ottanta, con il piano strategico per il recupero dei Sassi, sono stati avviati numerosi interventi di restauro e consolidamento. L'esperienza pratica ha tuttavia dimostrato che vari prodotti commerciali impiegati per il consolidamento e la protezione delle superfici — polimeri organici, silossani, trattamenti acrilici — hanno in diversi casi mostrato limiti di efficacia e compatibilità: ingiallimenti, distacchi e alterazioni chimiche e fisiche sono stati correlati all'incompatibilità meccanica o chimica tra trattamento e substrato. Anche interventi di ricostruzione dei giunti con materiali non idonei e spessori inappropriati hanno spesso alterato l'aspetto formale e la durabilità delle murature. Per tali ragioni si impone la trasparenza sui prodotti impiegati, prove preliminari e protocolli di verifica prima dell'applicazione su vasta scala. [Bernardo (2021); Bernardo (2022); Concas (2022); Lettieri (2004)].

Il contesto culturale e di valorizzazione contemporaneo, accentuato dalla nomina di Matera a Capitale Europea della Cultura 2019, richiede che ogni intervento coniughi tutela del carattere storico-materico, protezione delle superfici e sicurezza degli operatori: l'uso di polimeri organici o semi-organici, pur offrendo trasparenza estetica, pone criticità operative legate alla solubilità in solventi e ai rischi per la salute, che devono essere valutati nell'ambito di un approccio multidisciplinare. Data la funzione dei Sassi come laboratorio sperimentale di pratiche di restauro, risulta quindi imprescindibile che la fase diagnostica preliminare e il successivo monitoraggio siano progettati integrando conoscenze geologiche, storiche, costruttive e chimico-fisiche, al fine di definire protocolli conservativi compatibili e replicabili. [Bernardo (2021); Bernardo (2022); Campanella (2021); Cardellicchio (2023); Delle Cave (2018); Gabriele (2022); Guida (2018)].

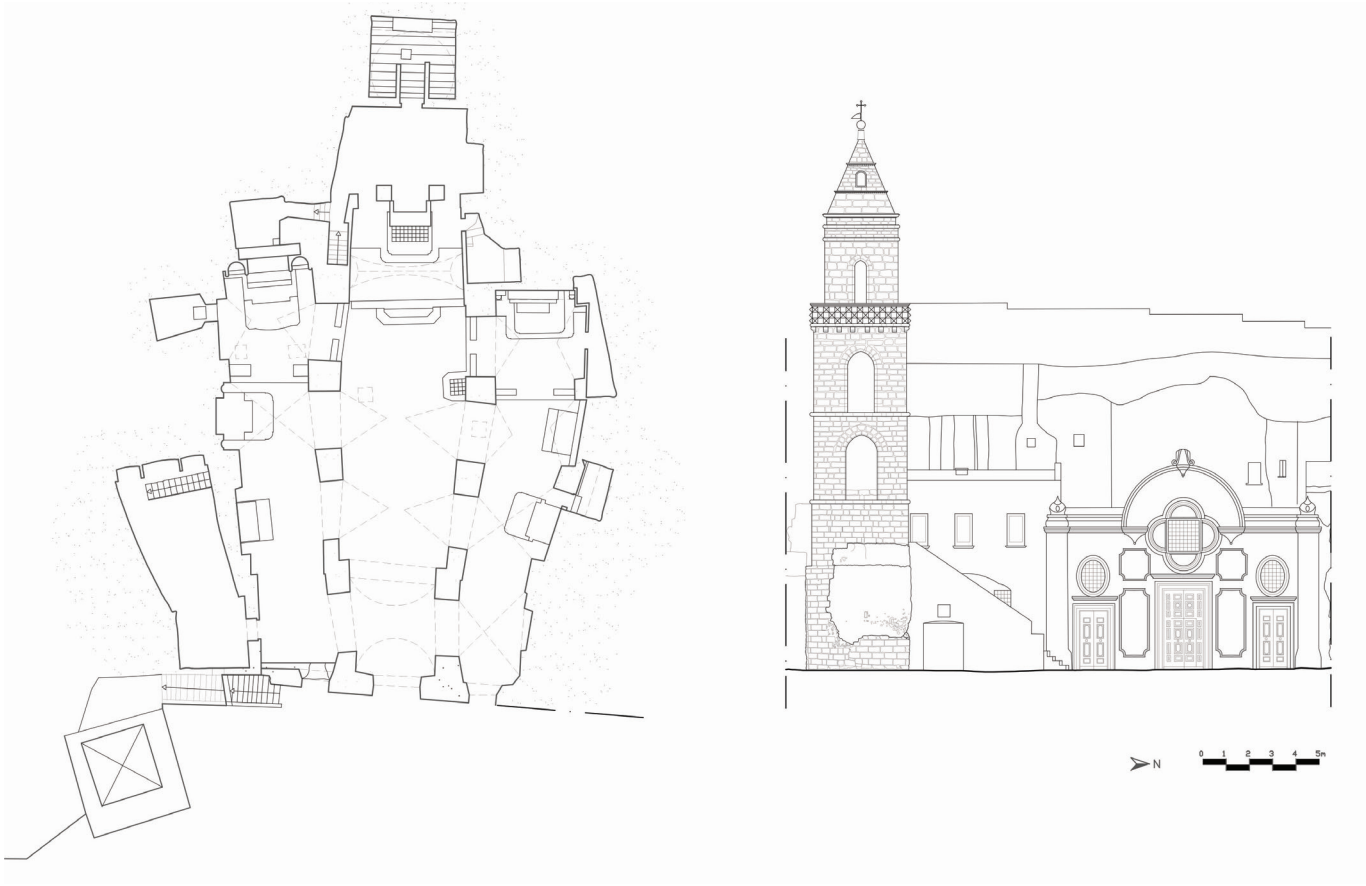


Fig. 65 | Pianta e prospetto della Chiesa di San Pietro Barisano

5.2.1.2 Evoluzione storica e architettonica

La chiesa rupestre di San Pietro Barisano si colloca nel cuore del Sasso Barisano di Matera, all'interno del sistema monumentale dei Sassi e del Parco della Murgia Materana. L'edificio si articola longitudinalmente all'interno del banco di calcarenite e si inserisce organicamente nella stratificazione urbana della città storica, rappresentando un nodo significativo del dialogo tra architettura ipogea e costruita (Fig. 65).

Conosciuta anche come *San Pietro Veterano* o *de Veteribus* [Volpe (1818)], la chiesa costituisce una delle più antiche parrocchie rupestri materane e, per estensione e complessità spaziale, è ritenuta il più grande insediamento monastico scavato della città. Le ricerche archeologiche e documentarie condotte da Paul Arthur hanno datato la sua struttura originaria al XII secolo, identificando successivi ampliamenti prima del XV secolo, con la realizzazione delle cappelle laterali decorate ed affrescate, e poi nel XVII e XVIII secolo, quando l'edificio assunse l'attuale impianto a tre navate e vennero definiti la facciata e il campanile [Delle Cave (2018)].

Interamente scavata nella roccia, la chiesa ha una lunghezza di 23,4 m e una larghezza di 11,4 m. Presenta alcune parti costruite con blocchi di "tufo", in particolare le volte a botte impostate su pilastri con nucleo in roccia, alcune pareti divisorie tra le navate, la facciata principale e il campanile.

L'organizzazione interna è tipicamente basilicale, con tre navate separate da sei pilastri quadrangolari collegati da arcate a tutto sesto; la navata centrale, più ampia e solenne, culmina nell'altare maggiore. Il soffitto è articolato da volte a vela e curvature semplici, con un linguaggio sobrio ma armonico, coerente con la tradizione rupestre materana (Fig. 66). Dietro l'altare maggiore è ancora riconoscibile

Fig. 66 | Vista interna verso l'altare della navata centrale



Fig. 67 | Vista interna verso il rosone quadrilobato



Fig. 68 | Sedili litici del Putridarium



la cripta originaria con ampia parete absidata e i resti dell'antico plinto d'altare, spazio che, nel corso delle trasformazioni, è stato utilizzato anche come luogo di sepoltura privilegiata. L'edificio conserva, inoltre, numerose botole per ossari, elemento che testimonia la funzione funeraria diffusa e stratificata del complesso.

La facciata in muratura, databile al XVII secolo, costituisce un raro esempio di chiesa "sub-divale" e si caratterizza per i tre ingressi in asse con le navate e per il rosone quadrilobato che ne decora il prospetto (Fig. 67). Essa ha uno spessore medio di circa 90 cm ed è costruita alternando blocchi di tufo di 25×25×45 cm, disposti con diatoni per assicurare l'ammorsamento dei due paramenti murari e contrastare le spinte orizzontali.

Sul lato sinistro della facciata si innalza il campanile settecentesco a pianta quadrata, articolato su più piani e concluso da una cuspide; esso poggia su uno sperone roccioso a quota più elevata rispetto al piano della chiesa e già nel 1898 mostrava condizioni di degrado tali da spingere il sindaco Domenico Ridola a emanare un'ordinanza per la messa in sicurezza della struttura [Delle Cave (2018)].

Il complesso ipogeo sottostante, noto come *Sepolcreto* o *Putridarium*, si estende interamente nella roccia. È accessibile sia dal *Sancta Sanctorum*, adiacente alla navata sinistra, sia dalla scala dietro l'altare maggiore. Nelle cavità si conservano ancora i sedili litici utilizzati per il drenaggio dei corpi dei prelati, secondo una pratica funeraria che prevedeva la disidratazione progressiva dei cadaveri prima della sepoltura (Fig. 68).

Nel corso del XVI secolo la chiesa fu rivestita con conci di tufo che simulavano pilastri e volte, al fine di conferirle "il decoro e l'aulicità di un'architettura costruita", mentre gli ambienti esclusi dall'impianto basilicale (la sagrestia, la cappella di San Canione e il vano di fondo dietro l'altare del Crocifisso) mantennero la struttura rupestre originaria. La cappella di San Canione (Fig. 69), ornata da affreschi cinquecenteschi, fu verosimilmente occultata durante i lavori del XVIII secolo e adibita a ossario; è stata riscoperta solo in tempi recenti. [Padula (2000)]

Nel corso del Settecento la chiesa subì un rinnovamento generale con la costruzione di nuovi altari, in parte realizzati con sculture preesistenti, e con un aggiornamento decorativo coerente con il gusto dell'epoca. Tuttavia, tra gli anni Ottanta e Novanta del Novecento, gli altari e tutte le decorazioni furono oggetto di atti vandalici e furti, che contribuirono al degrado del complesso.

La chiesa venne dichiarata inagibile nel 1903 dal vescovo Raffaele Rossi, a causa delle infiltrazioni d'acqua, e chiusa al culto il 25 ottobre dello stesso anno. Con l'entrata in vigore della Legge De Gasperi-Colombo del 1952 (L. 619/1952) per lo sfollamento dei Sassi di Matera, l'edificio conobbe un lungo periodo di degrado e spoliazione: molte opere d'arte furono rubate o distrutte [SMART CITIES].

Nonostante la sua inclusione nel Piano di Intervento del Comune di Matera del 1981, San Pietro Barisano rimase in stato di abbandono fino agli anni Novanta, complice anche il tardivo riconoscimento del suo valore storico e artistico.

A partire dagli anni Duemila, San Pietro Barisano è divenuta oggetto di numerose campagne di restauro e ricerca, culminate nel progetto ministeriale "*SMART CITIES: Innovation of process and product for sustainable and planned maintenance, conservation, and restoration of cultural heritage*" (MIUR – SCN 00520), che ne ha fatto un vero e proprio laboratorio sperimentale per lo sviluppo di metodologie diagnostiche, materiali di consolidamento e protezione compatibili e protocolli di manutenzione sostenibile. Le indagini diagnostiche, i monitoraggi e le sperimentazioni di materiali innovativi condotti nell'ambito di tale programma hanno contribuito a definire linee guida e *best practices* per la manutenzione programmata e il restauro sostenibile del patrimonio architettonico rupestre [Bernardo (2021); Bernardo (2022); Campanella (2021); Cardellicchio (2023); Delle Cave (2018); Gabriele (2022); Guida (2018); Scrano (2020)].

In virtù della sua lunga storia costruttiva, delle stratificazioni materiali e funzionali e del ruolo sperimentale assunto negli ultimi decenni, la chiesa di San Pietro Barisano rappresenta un caso emblematico di interazione tra architettura rupestre, tecniche costruttive tradizionali e pratiche contemporanee di restauro, fornendo un modello paradigmatico per la gestione integrata dei beni ipogei nel contesto urbano dei Sassi di Matera.

5.2.2 Diagnosi preliminare

5.2.2.1 Metodologia diagnostica

Per la valutazione preliminare dello stato di conservazione della chiesa di San Pietro Barisano è stato adottato un approccio multi-analitico volto a caratterizzare sia il microclima e il comportamento igrometrico dell'organismo edilizio, sia la natura fisico-chimica dei materiali costruttivi e dei depositi superficiali.

Le informazioni di dettaglio relative alle campagne diagnostiche qui descritte si riferiscono in larga parte alle indagini condotte nel quadro del progetto "SMART CITIES" e alle attività di verifica correlate all'installazione del dispositivo CNT-Domodry; per gli interventi e le indagini eseguiti in epoche precedenti non sono al momento disponibili dati tecnici sistematici e schede di prova.

La fase di caratterizzazione materica ha previsto il prelievo controllato di sei campioni rappresentativi, raccolti tra la facciata e l'interno della chiesa, e la loro analisi mediante

Fig. 69 | Cappella di San Canione



microscopia ottica e diffrattometria a raggi X (XRD) per la determinazione mineralogica. Tali indagini permettono di definire la composizione delle malte, delle scialbature e delle patine, fornendo la base per confronti con possibili malte di risanamento e per la progettazione di prove di compatibilità. Le procedure di campionamento sono state eseguite con criteri minimamente invasivi e con conservazione in condizioni controllate per garantire l'integrità dei materiali prelevati.

Il monitoraggio microclimatico e termo-igrometrico è stato realizzato mediante campagne sul microclima interno alla chiesa (2018), impiegando strumenti calibrati per la misura sia dei parametri ambientali sia delle condizioni superficiali [Gabriele (2022)]:

- Termoigrometro Hanna Instruments modello HI 18564 per la registrazione dei parametri termo-igrometrici ambientali
- Termoigrometro a contatto Gann modello Hydromette BL UNI 11 dotato di elettrodo attivo B 55 BI per la misura termo-igrometrica delle superfici
- Radiometro portatile LI-COR modello LI185 dotato di sensore quantistico modello LI-190SB per la misurazione dell'irradianza (µmol fotoni $m^{-2} \cdot s^{-1}$)

Fig. 70 | Campagna diagnostica con termocamera IR



Le registrazioni sono state eseguite in punti rappresentativi (navata centrale, navate laterali, ambienti ipogei e esterno facciata) e archiviate per confronti temporali, così da valutare i cicli giornalieri e stagionali che influenzano i processi di evaporazione, condensa e biodeterioramento.

Per l'individuazione di anomalie connesse al contenuto idrico, sono state effettuate indagini termografiche (Fig. 70) con termocamera Testo modello "820-2 Kit" (risoluzione geometrica 640×480 pixel con super risoluzione 1280×940 pixel; risoluzione termica 0,04 °C; IFOV 0,71 mrad). Le acquisizioni termografiche sono state condotte seguendo procedure standardizzate (rilevamento dei parametri ambientali, calibrazione, impostazione dell'emissività, documentazione fotografica di riferimento) e replicate in campagne distinte per ottenere mappe confrontabili nel tempo e per selezionare eventuali aree critiche da sottoporre ad analisi più invasive o quantitative [Testo (s.d.)].

La caratterizzazione dei depositi superficiali, dei biofilm e della loro interazione con il substrato ha previsto l'uso congiunto di tecniche di superficie e di microscopia ad alta risoluzione: spettroscopia fotoelettronica XPS per l'analisi chimico-fisica delle componenti organiche e inorganiche presenti sulle superfici e per una prima valutazione dell'efficacia di eventuali trattamenti; microscopia elettronica a scansione (SEM) per la descrizione morfologica delle colonizzazioni e delle superfici degradate; spettrometria a dispersione energetica (EDS) abbinata a SEM per la determinazione elementare dei depositi. È opportuno precisare che, sebbene SEM/EDS e XPS forniscano informazioni essenziali sulla morfologia dei depositi e sulla loro composizione elementare o funzionale, queste tecniche non consentono da sole l'identificazione tassonomica definitiva di batteri o funghi: per una determinazione

puntuale dei taxa microbici è necessario integrare i dati con analisi microbiologiche o molecolari (colture, sequenziamento del DNA, PCR). Le analisi condotte hanno però permesso di caratterizzare i biofilm e di individuare le specie salino-minerali prevalenti che contribuiscono al degrado (elemento fondamentale per definire protocolli di desalinizzazione).

Il programma diagnostico è stato completato da prove fisico-meccaniche e di compatibilità: test di assorbimento capillare e porosimetria su piccoli campioni, prove di adesione per intonaci, analisi petro-grafica e mineralogica delle malte e dei materiali lapidei, e misure di microdurezza dove richiesto per valutare il grado di alterazione superficiale. Per la messa a punto di possibili interventi di risanamento sono state pertanto privilegiate prove comparative su porzioni pilota, dopo aver valutato i risultati dell'indagine laboratoristica e la compatibilità chimico-fisica tra materiali esistenti e prodotti di intervento (es. malte a base di calce idraulica naturale).

Tutte le indagini sono state svolte con registrazione sistematica dei metadati (condizioni climatiche al momento delle misure, calibrazione degli strumenti, coordinate dei punti di prelievo) e con archiviazione digitale dei risultati per garantire tracciabilità e ripetibilità. Gli esiti di questa metodologia multi-analitica hanno quindi offerto una base robusta per la progettazione di interventi pilota e per la definizione di un piano di monitoraggio post-intervento, pur rimanendo la valutazione definitiva subordinata ad approfondimenti mirati laddove la documentazione pregressa risulti mancante o frammentaria.

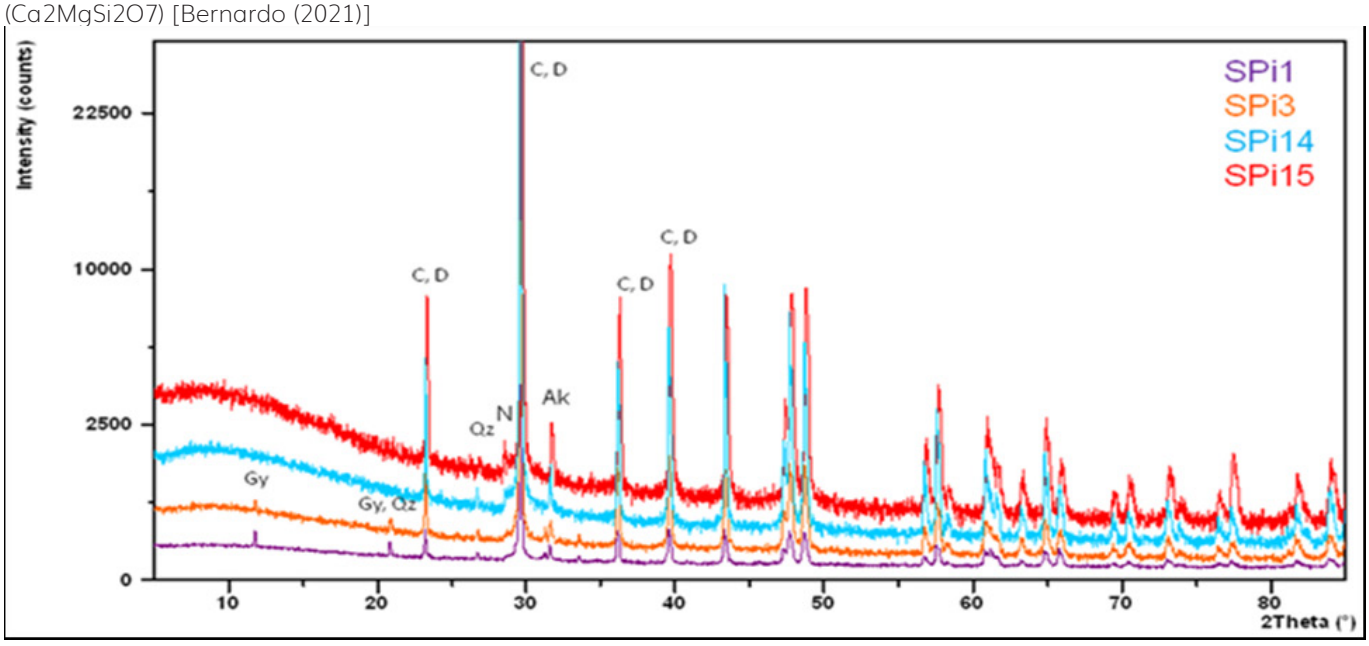
5.2.2.1 Stato di conservazione

Le indagini condotte nell'ambito del programma diagnostico descritto in precedenza delineano uno stato di conservazione complesso e multifattoriale, riconducibile all'interazione tra caratteristiche materiche, condizioni

Tab. 2 | Analisi con diffrazione a raggi X dei campioni prelevati dalla facciata di San Pietro Barisano, percentuale in massa [D'Alessandro Restauri (2020)]

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6
Calcite ($CaCO_3$)	64	85	62	100	97	100
Dolomite ($MgCa(CO_3)_2$)	20	8	18	-	-	-
Anidrite ($CaSO_4$)	13	5	10	-	-	-
Quarzo (SiO_2)	3	2	3	-	3	-
Cloruro di sodio (NaCl)	-	-	7	-	-	-

Fig. 71 | Difrattogrammi dei campioni prelevati nella Chiesa di San Pietro Barisano. Caption: C = calcite (CaCO3); D = dolomite (MgCa(CO3)2); Gy = gesso (CaSO4); Qz = quarzo (SiO2); N = nitrato di sodio (NaNO3); Ak = akermanite (Ca2MgSi2O7) [Bernardo (2021)]



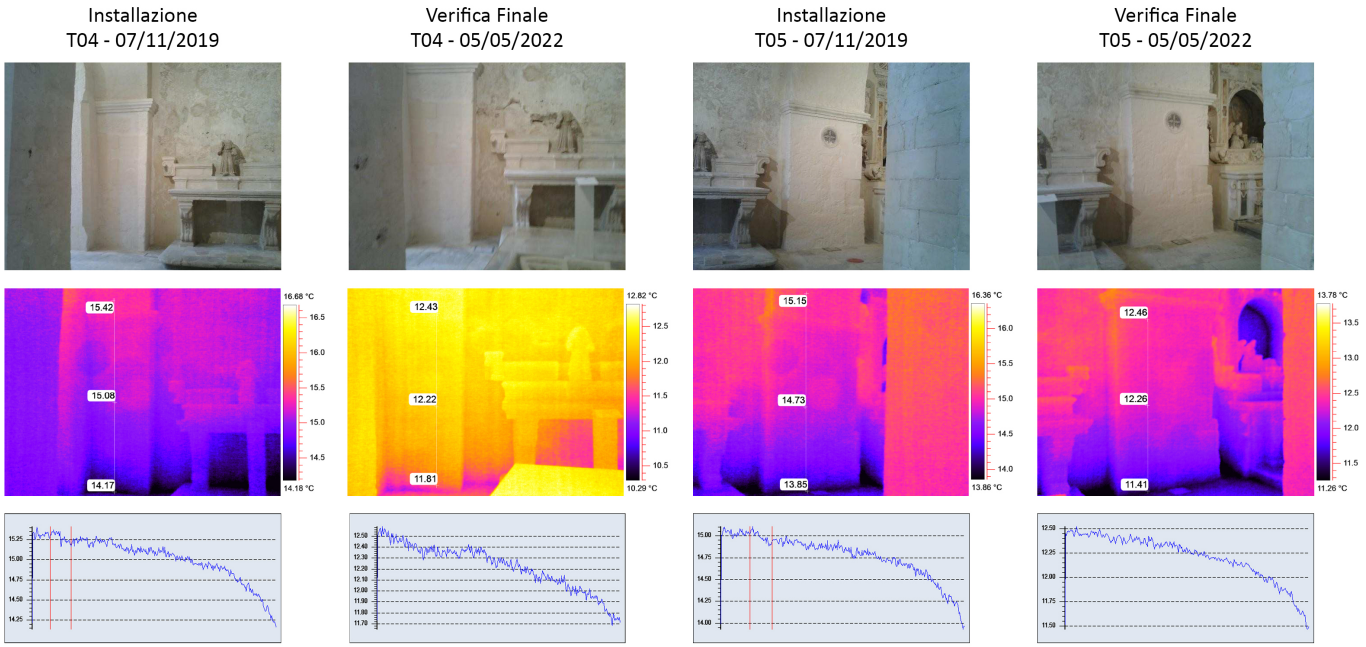


Fig. 72 | Termografie IR, con indicazione delle temperature lungo la parete, effettuate durante la campagna diagnostica negli anni 2019 e 2022

microclimatiche prolungate e apporti esogeni.

Le analisi al microscopio ottico hanno consentito di identificare, secondo la classificazione di Folk, una biocrimite caratterizzata da una porosità secondaria non completamente riempita da cemento o matrice. La difrattometria a raggi X sui sei campioni (Fig. 71 e Tab. 2) ha, inoltre, consentito un'analisi più approfondita del materiale, evidenziando una significativa presenza di calcite, dolomite, gesso, quarzo, nitrati e akermanite [Bernardo (2021)].

Sul piano macroscopico, le ispezioni in loco condotte durante i precedenti interventi di restauro hanno rivelato una diffusa presenza di efflorescenze, sub-efflorescenze, patine biologiche, distacchi di intonaco, esfoliazioni delle pellicole pittoriche, alveolizzazione, decoesione e polverizzazione delle superfici lapidee [Bernardo (2021); Bernardo (2022); Campanella (2021); Cardellicchio (2023); Delle Cave (2018); Falchi (2018); Gabriele (2022); Guida (2018); Lucchi (2018) Review; Scrano (2020)]. Tali fenomeni sono coerenti con le condizioni termoigrometriche a cui è stato esposto il bene architettonico durante il lungo periodo di abbandono, aggravate dalla presenza di infiltrazioni d'acqua e da un diffuso fenomeno di risalita capillare che ha portato alla presenza di incrostazioni calcaree sulle superfici della chiesa.

Nonostante gli interventi di restauro condotti negli anni '90, le misure microclimatiche eseguite nel 2018 hanno quantificato condizioni ambientali interne critiche: i livelli di UR variavano tra il 75% e l'80% con temperature comprese tra 11 °C e 18 °C e irraggiamento compreso tra 1,2 e 6 µmol fotoni $m^{-2} \cdot s^{-1}$, mentre le superfici in pietra presentavano un'UR superiore al 90%. [Gabriele (2022); Scrano (2020)]

La risalita capillare è stata identificata come fattore attivo e determinante di tali condizioni. Le indagini del 2019/07/11 hanno rilevato la presenza diffusa di umidità da risalita su tutta la

Tab. 3 | Parametri ambientali rilevati nelle campagne diagnostiche del 07/11/2019 e 05/05/2022

	07/11/2019		05/05/2022	
	Interno	Esterno	Interno	Esterno
UR [%]	79,4	56,3	80	56
T_{aria} [°C]	17,5	23,4	20	25
$T_{rugiada}$ [°C]	13,8	14,2	16,4	15,6

superficie della chiesa, contribuendo al deposito e alla concentrazione di sali e alla conseguente formazione di incrostazioni calcaree (Fig. 72). Il degrado indotto dal microclima interno è stato aggravato dalle significative fluttuazioni termo-igrometriche esterne (Tab. 3). In particolare per quanto riguarda i sali solubili, queste variazioni hanno ulteriormente facilitato i cicli di cristallizzazione-dissoluzione dei sali, accelerando il degrado del substrato lapideo e causando l'alveolizzazione delle superfici.

L'elevata concentrazione di sali, in particolare di nitrati, è stata interpretata come il risultato di cause multiple e sovrapposte: componenti salini intrinseci ai materiali costruttivi, apporti storici legati alla funzione funeraria del complesso (*putridarium* e ossario) e accumuli di rifiuti e materiale organico durante il lungo periodo di abbandono. La compresenza di diverse sorgenti rende complessa l'attribuzione univoca delle origini saline e impone un piano analitico mirato per discriminare le fonti e definire i trattamenti di desalinizzazione più appropriati.

Le indagini microbiologiche hanno documentato la presenza di colonizzazioni batteriche e fungine eterogenee: tra i taxa rilevati figurano batteri potenzialmente tossici o ad elevata attività enzimatica (es. *Bacillus cereus*, *Bacillus mycoides*) e funghi capaci di degradare substrati lapidei (es. *Talaromyces pinophilus*). L'individuazione di tali organismi, ottenuta mediante analisi di laboratorio integrate alle osservazioni morfologiche (SEM/EDS, XPS), indica che il biodeterioramento rappresenta una componente significativa del quadro di degrado e sottolinea la necessità di integrare misure di controllo biologico nelle strategie conservative.

In sintesi, lo stato di conservazione rilevato dalle indagini qui richiamate appare come il risultato di un complesso intergioco tra caratteristiche materiche eterogenee, persistenti problematiche igrometriche (risalita capillare e infiltrazioni), elevata concentrazione di sali solubili e attività biologica, il tutto aggravato dal lungo periodo di abbandono e da interventi passati non sempre efficaci. Quanto descritto si riferisce esplicitamente allo stato conservativo mappato attraverso le campagne diagnostiche descritte nella sezione metodologica; la valutazione completa dell'efficacia delle azioni di risanamento richiede ora l'integrazione di ulteriori analisi quantitative e sperimentazioni pilota uniformi, nonché la documentazione tecnica degli interventi storici che al momento risulta frammentaria o assente.

5.2.3 Il progetto di risanamento

1978: Intervento strutturale

Nel 1978 la ditta SICOS (Società Italiana Costruzioni Opere Specializzate), per conto della Direzione dei Lavori Pubblici di Potenza, eseguì il primo intervento strutturale documentato su San Pietro Barisano. Dagli elaborati grafici risulta che le opere realizzate comprendevano cuciture con barre d'acciaio FeB 44k Ø24 e l'installazione di micropali Ø100 mm armati con tubo in acciaio (spessore 8 mm, lunghezza 9 m).

1981-1986: Programmazione degli interventi e sistemazione esterna

Nel 1981 la chiesa fu inserita in uno dei progetti-pilota del Piano di Intervento Comunale per il recupero del patrimonio religioso.

L'inserimento nel piano non si tradusse in un programma di manutenzione concreto né in azioni coordinate per affrontale le cause strutturali e igrometriche del degrado e l'edificio restò in stato di abbandono fino alla fine degli anni '90. Unico intervento documentato nel periodo è la sistemazione della piazza antistante, eseguita nel 1986.

Anni '90: Restauro architettonico, archeologico e artistico

Alla fine degli anni Novanta, in occasione del Giubileo, la chiesa di San Pietro Barisano fu oggetto di un ampio intervento di restauro architettonico, archeologico e artistico, diretto dall'ing. Gregorio Padula e dall'arch. Renato Baldoni, con esecuzione a cura dell'impresa Langella di Napoli e restauri degli affreschi affidati alla restauratrice Rita Padula.

Il complesso intervento aveva l'obiettivo di restituire alla fruizione pubblica l'intera struttura, compromessa da decenni di abbandono e vandalismo successivi allo sfollamento dei Sassi. Le operazioni hanno riguardato in modo sistematico tanto la struttura architettonica quanto l'apparato decorativo (affreschi, sculture e arredi).

Il restauro ha permesso di riaprire alla visita l'intera struttura sotterranea, restituendo leggibilità al sistema spaziale originario e alle stratificazioni decorative del XV e XVI secolo.

Durante le operazioni di consolidamento fu rimossa una muratura di tamponamento che portò alla scoperta della Cappella di San Canione, anticamente murata e adibita a ossario. L'ambiente si presentava interamente affrescato con pitture databili alla metà del Quattrocento, eseguite su un unico strato di intonaco di polvere di pietra e calce idrata, applicato direttamente sulla roccia scavata e levigata. Le superfici pittoriche mostravano efflorescenze saline e cristallizzazioni di nitrati, conseguenza dell'uso funerario della cappella. Gli interventi hanno previsto il fissaggio della pellicola pittorica, il consolidamento delle scaglie decoese, la reintegrazione delle lacune minori e il ripristino della coesione tra intonaco e supporto, restituendo continuità alla lettura delle scene figurative.

Ulteriori rinvenimenti interessarono l'ambiente rupestre a sinistra dell'ingresso, adoperato nel XVIII secolo come sacrestia, dove, sotto uno spesso strato di scialbo, sono emersi brani pittorici del XVI secolo. Anche nella nicchia retrostante l'altare del Crocifisso furono riconosciuti almeno tre livelli stratigrafici di decorazione murale sovrapposta, l'ultimo dei quali, a tempera con motivi floreali a girali, appariva fortemente lacunoso e alveolizzato a causa della cristallizzazione salina. In questa zona si è proceduto alla rimozione dello strato più recente deteriorato, al consolidamento degli intonaci e alla conservazione selettiva dei due livelli più antichi, al fine di valorizzare la stratificazione storica dell'intervento pittorico.

Sulla parete rupestre del *Sancta Sanctorum* (antica sacrestia accessibile dalla navata sinistra) sono stati rimossi numerosi strati di scialbo, riportando alla luce affreschi seicenteschi di buona qualità, sebbene in mediocre stato di conservazione. Le operazioni hanno comportato la pulitura meccanica e chimica delle superfici, il fissaggio della pellicola pittorica, la verifica dell'adesione dell'intonachino, la colmatura delle lacune con malta compatibile (polvere di pietra e calce idrata) e la reintegrazione pittorica ad acquerello. In parallelo sono stati recuperati ampi brani delle dipinture settecentesche a finto marmo che decorano le pareti perimetrali, restituendo l'immagine policroma dell'ambiente.

Per quanto riguarda le opere scultoree, il restauro ha coinvolto i rilievi cinquecenteschi, le balaustre del presbiterio, la cornice del portale della sacrestia e i lavamani. Tutti questi elementi, come l'intera chiesa, sono realizzati nel medesimo litotipo calcarenitico locale, circostanza che ha orientato le scelte d'intervento verso l'uso di materiali e tecniche compatibili. Dopo aver selezionato e studiato i frammenti conservati in loco e presso la Soprintendenza, essi sono stati riassemblati e reintegrati *in situ*. Le superfici sono state pulite da depositi incoerenti, concrezioni, deiezioni animali e strati di scialbo, successivamente consolidate e sigillate le fessurazioni con malte composte da polvere di pietra e calce idrata. Nei punti in cui la pietra conservava residui di dipinture, la pellicola pittorica è stata fissata e integrata con tecniche tradizionali e reversibili, preservando così la doppia natura, strutturale e cromatica, dei manufatti.

Particolarmente significativo fu il restauro del portale di accesso al Sancta Sanctorum, dove la rimozione delle ridipinture ha rivelato una lapide dedicatoria databile al 1730; le restanti porzioni del portale, per caratteristiche stilistiche, sono attribuibili alla metà del Cinquecento. Analogo impegno ha interessato le balaustre rinascimentali che delimitavano il presbiterio dalle navate laterali: delle 27 colonnette originarie, 13 originali sono state recuperate e ricollocate, mentre le 14 mancanti sono state ricostruite artigianalmente in pietra locale, sulla base della documentazione d'archivio e dei rilievi fotografici della Soprintendenza.

Tutti i manufatti lignei sono stati oggetto di

disinfestazione dagli insetti xilofagi, pulitura, consolidamento e reintegrazione strutturale.

Particolare attenzione è stata riservata al pavimento maiolicato settecentesco, composto da 632 mattonelle quadrate (25×25 cm) [Delle Cave (2018)], suddivise in due gruppi decorativi:

- Mattonelle policrome con motivi geometrici a cerchi concentrici e girali in blu, giallo e verde rame su smalto bianco
- Mattonelle monocrome di colore blu

Il pavimento, giunto in laboratorio completamente distaccato, presentava un grave stato di degrado dovuto a stress meccanico da calpestio, intrusione di radici, depositi incoerenti, microfessurazioni, esfoliazioni e concrezioni calcaree compatte che oscuravano circa il 60% delle superfici.

Dopo una serie di test, la pulitura è stata eseguita con impacchi di carbonato d'ammonio ed EDTA a bassa concentrazione, seguiti da interventi meccanici localizzati condotti con bisturi, penne in fibra di vetro e gommini rotanti di precisione (strumentazione odontotecnica). Tali metodologie, calibrate in base alla natura dei depositi, hanno consentito di rimuovere le incrostazioni più tenaci e di recuperare la brillantezza originale dello smalto.

Nel complesso, il restauro degli anni Novanta rappresenta un momento cruciale nella storia conservativa della chiesa: un intervento che ha saputo coniugare ricerca archeologica, restauro artistico e recupero architettonico in un approccio integrato. L'attenzione ai materiali originari, la scelta di tecniche compatibili e la valorizzazione delle stratificazioni storiche fanno di San Pietro Barisano un caso emblematico di restauro critico applicato al contesto rupestre materano.

2012: Rifacimento delle coperture e portoni blindati

Nel 2012 la ditta DIESSE, su progetto del geom. E. D'Ercole, ha eseguito il rifacimento delle coperture della chiesa, comprensivo della realizzazione di camminamenti di servizio (larghezza massima 60 cm) e della sostituzione dei portoni in asse con le navate con nuovi portoni blindati dotati di chiavi di sicurezza. L'intervento è stato condotto privilegiando il riutilizzo degli elementi esistenti: i coppi recuperabili sono stati reimpiegati e quelli mancanti integrati con elementi di analoga natura e fattura, in modo da preservare l'aspetto tipologico delle coperture "tipo antico".

Le lavorazioni differenziate in funzione della tipologia di copertura, a volta e piana, sono state le seguenti. Per le coperture a volta si è proceduto innanzitutto alla realizzazione di un massetto di sottofondo in calcestruzzo armato (spessore 8–10 cm, rete elettrosaldata 6/15 mm) posato sulla volta esistente; sul massetto è stata applicata un'impermeabilizzazione a caldo costituita da un doppio strato incrociato di guaina bituminosa, il secondo dei quali autoprotetto con graniglia, e infine il completamento con posa di coppi in argilla su malta, comprendendo la formazione di eventuali camminamenti laterali in cotto. Per le superfici piane dei terrazzi si è eseguita analogamente la formazione di un massetto di pendenza in calcestruzzo armato (con rete elettrosaldata 6/15 mm), seguito dall'impermeabilizzazione e dalla posa in opera di una pavimentazione in cotto naturale con relativa stuccatura dei giunti.

Parallelamente alle opere di copertura furono realizzati tre portoni nuovi, conformi all'impianto formale esistente ma con dispositivo di chiusura blindata per motivi di sicurezza e tutela del bene.

2018-2020: Sperimentazioni nel progetto "SMART CITIES" e installazione dispositivi CNT-Domodry

Tra il 2018 e il 2020 la chiesa di San Pietro Barisano è stata oggetto di un ampio programma di sperimentazione nell'ambito del progetto ministeriale "Smart Cities: Innovazione di processo e prodotto per la manutenzione, la conservazione e il restauro sostenibili e pianificati del patrimonio culturale" (MIUR–SCN 00520). Le attività di ricerca si sono concentrate principalmente sul problema dell'umidità da risalita capillare e sui fenomeni di biodeterioramento delle superfici lapidee

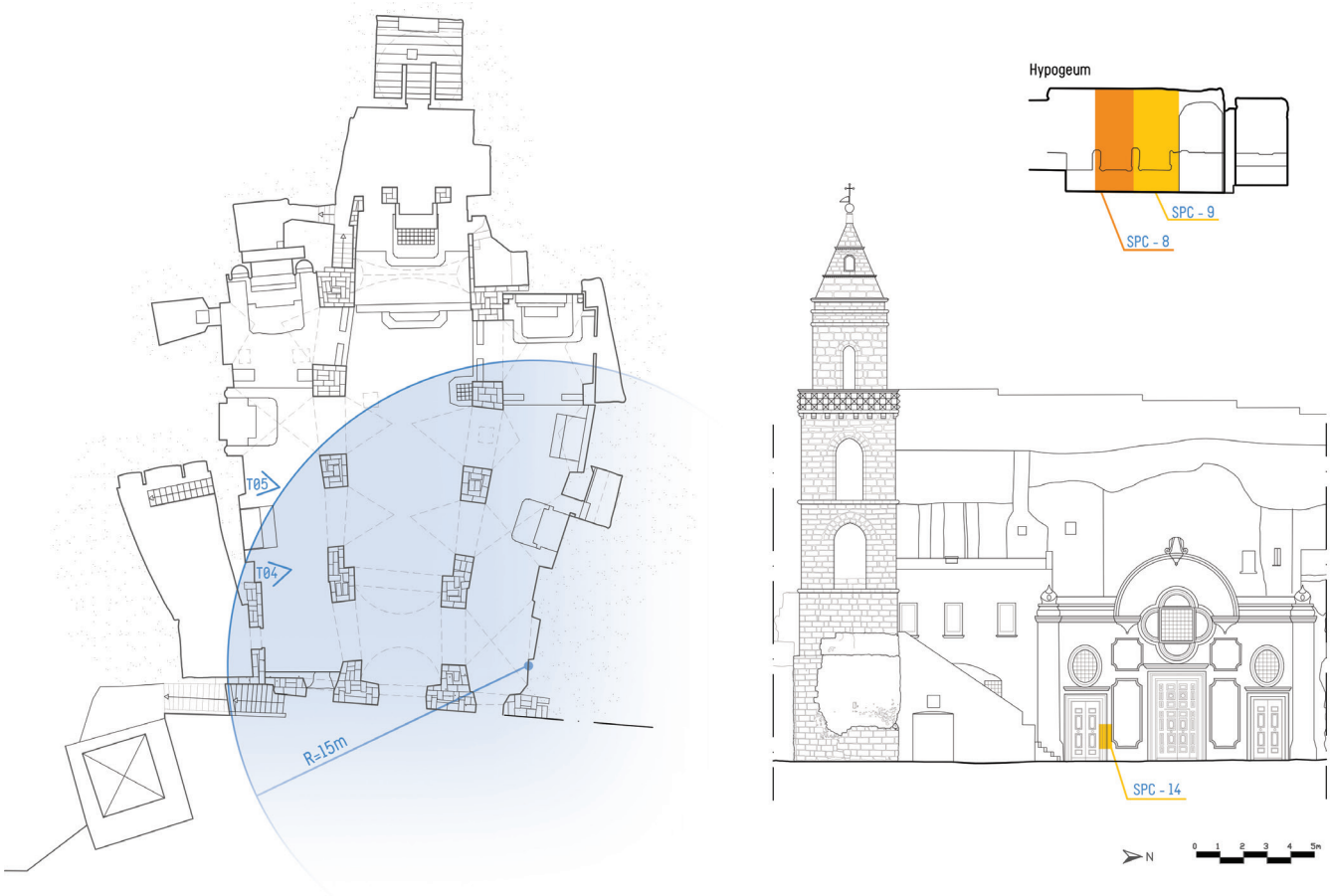


Fig. 73 | Pianta e prospetto principale (Est) della Chiesa di San Pietro Barisano con localizzazione e raggio d'azione del dispositivo CNT e localizzazione dei termogrammi e dei campioni

interne ed esterne.

Per mitigare gli effetti dell'umidità ascendente, nel 2020 è stato installato un dispositivo CNT-Domodry, basato sul principio della neutralizzazione delle cariche elettrostatiche che favoriscono la risalita capillare dell'acqua nelle murature (Fig. 73).

È stato impiegato un unico dispositivo CNT-R15, con raggio d'azione di 15 metri, in modo da poter confrontare le aree comprese nel suo campo di azione (area T04) con quelle esterne (area T05). Questa scelta sperimentale ha permesso di valutare in modo comparativo l'efficacia della tecnologia in condizioni reali, evitando la completa copertura dell'edificio.

Parallelamente, è stata affrontata la problematica delle colonizzazioni biologiche che interessavano superfici interne ed esterne, specialmente nelle zone ad alta umidità e scarsa ventilazione. I test sperimentali [Falchi (2018); Gabriele (2022); Guida (2018); D'Alessandro Restauri (2020); Campanella (2021); Cardellicchio (2023); Scrano (2020)] hanno seguito una metodologia comune articolata in più fasi:

- Identificazione microbiologica delle specie batteriche e fungine presenti sul substrato lapideo
- Selezione e applicazione dei prodotti biocidi o fungicidi più appropriati
- Verifica dell'efficacia dei trattamenti disinfettanti
- Pulitura delle superfici, seguita da operazioni di consolidamento e protezione del materiale lapideo

Sono stati testati differenti prodotti, organici (clorammine, esteri della formaldeide,

metilfosfati, ecc.) e inorganici (cloro attivo, perossido di idrogeno, ipoclodito di sodio, ecc.).

Le prove sperimentali hanno interessato specifiche aree della navata centrale, dell'ipogeo e della facciata, dove sono stati applicati:

- un idrogel a base di alginato [Campanella (2021); Cardellicchio (2023); Gabriele (2022); Scrano (2020)]
- una miscela di glicoalcaloidi naturali (GA) in varie concentrazioni (100, 75, 50 e 25%) [Cardellicchio (2023); Scrano (2020)]
- un prodotto commerciale a base di resina siliconica in emulsione acquosa [D'Alessandro Restauri (2020)].

L'idrogel di alginato, grazie alla sua struttura geologica, ha permesso una rimozione selettiva dei depositi biologici e salini. Tuttavia, la scarsa ventilazione e le elevate condizioni igrometriche degli ambienti hanno ostacolato l'essiccazione del materiale, rendendo necessario l'impiego di termoventilatori per favorire la disidratazione e il successivo distacco del gel. Nonostante le difficoltà operative, il trattamento ha dato risultati soddisfacenti, sebbene la forte porosità del litotipo calcarenitico abbia limitato l'uniformità della pulitura.

La miscela di glicoalcaloidi si è dimostrata efficace solo a concentrazioni elevate e se combinata con biocidi fungicidi. Le analisi successive hanno evidenziato un'azione mirata sui microrganismi fotoautotrofi (microalghe e cianobatteri), ma non sui microrganismi eterotrofi (batteri e funghi) che proliferano successivamente sui residui organici. L'associazione dei due trattamenti ha mostrato efficacia completa entro quattro settimane e risultati stabili a distanza di due anni.

Il prodotto siliconico commerciale, applicato nel maggio 2019 su un arco della navata centrale con presenza di licheni ed efflorescenze saline, ha invece fornito risultati meno soddisfacenti: dopo 24 ore e la successiva spazzolatura di controllo, è stata rilevata solo una parziale efficacia del trattamento.

A integrazione dei trattamenti chimici, sono state eseguite puliture meccaniche e criogeniche su due campioni di facciata e sei campioni interni [D'Alessandro Restauri (2020)]. La criopulitura ha dato esiti positivi nella rimozione delle patine biologiche e dei depositi superficiali senza alterare la morfologia del substrato, mentre la microsabbiatura meccanica è risultata più efficace nei casi di incrostazioni calcaree compatte. Per la rimozione delle concrezioni sul pavimento maiolicato sono stati impiegati impacchi a bassa percentuale di carbonato di ammonio e EDTA, che tuttavia hanno rimosso solo parzialmente le incrostazioni [Delle Cave (2018)].

Le superfici trattate sono state successivamente sottoposte a pulizia finale mediante spazzole di saggina o cicli di lavaggio a spruzzo con soluzione salina e successivi risciacqui in acqua demineralizzata, per eliminare ogni residuo dei prodotti impiegati [Campanella (2021); Cardellicchio (2023); Gabriele (2022); Scrano (2020)].

A conclusione dei trattamenti, per il consolidamento delle superfici sono stati utilizzati due tipi di agenti consolidanti commerciali a base di resine acriliche: campioni SPC-9 (ipogeo) e SPC-14 (facciata della chiesa) - tipo 1 (una mano a pennello e una mano a spruzzo fino a saturazione delle superfici, diluito in acqua in rapporto 1:10); campione SPC-8 (ipogeo) - tipo 2 (una mano a pennello e una mano a spruzzo fino a saturazione delle superfici, diluito in acqua in rapporto 1:10). [D'Alessandro Restauri (2020)]

5.2.4 Risultati

5.2.4.1 Monitoraggio post-intervento

Si precisa che le descrizioni relative alle campagne di monitoraggio, alle tecniche strumentali impiegate (termografia IR, test colorimetrici, Scotch Tape Test, test di assorbimento a spugna, ecc.) e ai risultati presentati in questa sezione si riferiscono esclusivamente all'ultima fase di interventi condotta nell'ambito del progetto ministeriale "SMART CITIES" (MIUR–SCN 00520) e all'installazione del dispositivo CNT-Domodry. Le verifiche diagnostiche e i controlli post-intervento qui analizzati sono quindi legati

alle sperimentazioni e ai protocolli adottati in quel contesto operativo [Campanella (2021); Cardellicchio (2023); Gabriele (2022); Scrano (2020); D'Alessandro Restauri (2020); Bernardo (2021)]. Per interventi precedenti (restauri degli anni '70–'90, ripristini emergenziali e trattamenti non documentati) la documentazione tecnico-scientifica risulta frammentaria o assente.

Per verificare l'efficacia nel tempo dell'azione deumidificante della tecnologia CNT, sono stati eseguiti test termografici dopo un anno e dopo due o più anni dall'installazione (Fig. 72).

L'analisi comparativa fra l'area ricadente nel raggio d'azione del dispositivo (T04) e un'area non coperta (T05) ha evidenziato una significativa riduzione delle anomalie igrometriche in T04, mentre in T05 la risalita capillare è risultata persistente (rilievi 2019). Tale confronto sperimentale conferma l'efficacia locale della tecnologia CNT nella riduzione dell'umidità ascendente, ma allo stesso tempo sottolinea la necessità di estendere il campo d'azione o adottare interventi integrati per proteggere l'intero organismo edilizio.

È stata inoltre rimarcata l'importanza di considerare che l'eliminazione della causa (umidità di risalita) non corrisponde automaticamente alla risoluzione delle manifestazioni superficiali di degrado: efflorescenze, sub-efflorescenze e colonizzazioni biologiche possono persistere e richiedere specifici interventi di desalinizzazione, disinfestazione biologica e ripristino di intonaci e finiture traspiranti prima di qualsiasi operazione di consolidamento.

Il monitoraggio ha previsto, a sei mesi dall'applicazione dei prodotti consolidanti, una serie di prove non distruttive *in situ* per valutarne l'effetto sulle superfici: test colorimetrico, Scotch Tape Test e test di assorbimento dell'acqua.

Il test colorimetrico, utilizzato per determinare le variazioni cromatiche indotte dai trattamenti (UNI EN 15886:2010) [UNI EN 15886], è stato eseguito con uno spettrofotometro Konica Minolta CM-2600d nello spazio colore CIELAB (apertura 8 mm, componente speculare esclusa SCE, illuminante D65, angolo di visione 10°) [UNI EN 15886; Bernardo (2021)]. Dai rilievi è emerso che i prodotti testati non hanno indotto variazioni cromatiche sensibilmente apprezzabili; il massimo ΔE registrato è stato 3,6, corrispondente al consolidante commerciale a base di resine acriliche tipo SPC-8 (valore misurabile strumentalmente ma sui limiti della percezione visiva in condizioni d'osservazione normale) (Tab. 4).

Lo Scotch Tape Test, o peeling test, è stato condotto secondo protocollo (striscia di nastro di peso noto, sensibilità bilancia 0,1 mg, adesione 90 s; prova ripetuta quattro volte per punto) e ha quantificato la massa di materiale lapideo rilasciato (TRM) come indicatore di coesione superficiale [ASTM International (2008); Bernardo (2021)]. I risultati mostrano differenze significative tra i prodotti: le aree trattate con SPC-14 (facciata) e SPC-

Tab. 4 | Risultati dei test colorimetrici [D'Alessandro Restauri (2020)

AREA	L*	a*	b*	ΔE	ΔL	ΔL/ΔE	Co
Tal quale	74,79	1,45	15,22	3,63	3,36	0,93	15,29
SPC-8	78,15	1,17	13,89				
Tal quale	73,46	1,53	15,89	1,79	1,47	0,82	15,96
SPC-9	74,93	1,09	16,81				
Tal quale	77,73	-0,93	13,08	0,92	0,9	0,98	13,12
SPC-14	78,62	-0,9	13,28				

Tab. 5 | Risultati dello Scotch Tape Test [D'Alessandro Restauri (2020)

AREA	Test nr.	Pf-Pi (g)	Released (mg/cm^2)	mass Standard deviation
Tal quale	1	0,1719	15,63	
	2	0,0334	3,04	
	3	0,0079	0,72	
	4	0,0082	0,75	
	Total released mass		**20,13**	**7,15**
SPC-14	1	0,0028	0,25	
	2	0,0109	0,99	
	3	0,0129	1,17	
	4	0,0131	1,19	
	Total released mass		**3,61**	**0,44**
Tal quale	1	0,5536	50,33	
	2	0,1062	9,65	
	3	0,0401	3,65	
	4	0,0282	2,56	
	Total released mass		**66,19**	**22,73**
SPC-8	1	0,3580	32,55	
	2	0,0588	5,35	
	3	0,0712	6,47	
	4	0,0215	1,95	
	Total released mass		**46,32**	**14,11**
SPC-9	1	0,0273	2,48	
	2	0,0227	2,06	
	3	0,0063	0,57	
	4	0,0101	0,92	
	Total released mass		**6,04**	**0,91**

9 (ipogeo) hanno presentato rispettivamente una riduzione del materiale distaccato del ~80% e del ~90% rispetto allo stato naturale non trattato, mentre l'area trattata con SPC-8 ha evidenziato una riduzione di circa 30%. Questi risultati indicano una maggiore efficacia di SPC-9 e SPC-14 nel migliorare la coesione superficiale del substrato lapideo, con SPC-9 particolarmente performante nelle condizioni ipogee indagate (Tab. 5).

Il test di assorbimento con la spugna a contatto (metodo UNI 11432:2011; Wa espresso in $mg \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$; 5 ml, 1 min) ha evidenziato forti differenze dipendenti dal contesto e dalla formulazione applicata: nell'area SPC-14 (facciata) il valore Wa è risultato di circa 20 $mg \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$, coerente con una pietra relativamente compatta; nelle superfici ipogee non trattate la calcarenite ha mostrato un assorbimento molto elevato (Wa ≈ 95 $mg \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$), probabilmente influenzato dall'elevata rugosità superficiale, dalla spruzzatura e dalla presenza di sali igroscopici. Nella zona SPC-8 l'assorbimento è rimasto elevato (Wa ≈ 63 $mg \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$), mentre nella zona SPC-9 si è osservata una forte diminuzione (Wa ≈ 8 $mg \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$), confermando la capacità di SPC-9 di ridurre l'ingresso capillare dell'acqua nel substrato.

Dal punto di vista metodologico, i risultati sottolineano l'importanza di utilizzare protocolli multiparametrici (termografia + prove meccaniche/strutturali + prove chimico-fisiche e biologiche) e di adottare un *follow-up* temporale: la stabilizzazione igrometrica completa delle murature richiede tempi fisiologici lunghi, stimati in 12–36 mesi dopo l'eliminazione della causa, periodo durante il quale è opportuno impiegare misure attive (ventilazione controllata, deumidificatori) associate alla rimozione preventiva dei sali e al ripristino di intonaci e finiture traspiranti.

Infine, va ricordato che i test di valutazione dell'efficacia consolidante (cromia, coesione, idrorepellenza) forniscono indicazioni utili ma non esaustive: la durabilità nel tempo dipende da molte variabili (formulazione chimica, profondità di penetrazione, condizioni microclimatiche locali, presenza residua di sali, azione biologica). Per quanto riguarda la documentazione, la frammentarietà delle informazioni relative agli interventi pregressi limita l'analisi retrospettiva: è pertanto necessario integrare i rilievi con attività di ricognizione archivistica, raccolta delle schede tecniche e pianificazione di campagne di monitoraggio continuative e sistematiche per un periodo minimo di 24–36 mesi al fine di valutare la reale efficacia e la durabilità delle misure adottate. [UNI EN 15886; UNI 11432:2011; ASTM International (2008); Campanella (2021); Cardellicchio (2023); Gabriele (2022); Scrano (2020); D'Alessandro Restauri (2020); Bernardo (2021)].

5.2.4.2 Considerazioni finali

L'analisi condotta su San Pietro Barisano conferma che la qualità e l'efficacia degli interventi conservativi dipendono in modo cruciale dalla diagnostica eseguita prima, durante e dopo i lavori: la sequenza conoscitiva è la condizione necessaria per progettare misure coerenti, compatibili e durature. Le indagini svolte, e in particolare le sperimentazioni condotte nell'ambito del progetto "SMART CITIES" e l'installazione del dispositivo CNT-Domodry, hanno infatti dimostrato come singoli successi puntuali (es. riduzione locale della risalita capillare) non risolvano meccanicamente né la complessità delle alterazioni pregresse né la fragilità complessiva dell'organismo architettonico.

Dalla ricostruzione storico-materiale e dalle analisi diagnostiche emergono cause multiple e interrelate del degrado: la natura altamente porosa e variabile della calcarenite, l'uso di materiali igroscopici, condizioni microclimatiche sfavorevoli (elevata umidità relativa, scarsa ventilazione, illuminazione), lunghi periodi di abbandono e funzioni storiche particolari (ossario/putridario) hanno favorito l'accumulo di sali solubili — in particolare nitrati — e lo sviluppo di colonizzazioni biologiche. Questi fattori hanno alimentato cicli di cristallizzazione/dissoluzione dei sali e processi di biodeterioramento, con conseguenti alveolizzazione, perdita di coesione superficiale, distacchi di intonaco e danneggiamenti degli

apparati pittorici e ceramici.

Dall'analisi degli interventi effettuati sulla Chiesa di San Pietro Barisano emerge chiaramente la mancanza di un progetto di conservazione unificato: la prassi dominante è stata l'intervento "in emergenza" su singole problematiche. Anche le sperimentazioni del progetto ministeriale si sono concentrate su specifici aspetti del degrado, senza inserirsi in una sequenza operativa complessiva. L'unico elemento che si distingue è la sperimentazione di consolidanti supportata da tecniche diagnostiche non distruttive, eseguita dopo l'installazione preliminare dell'impianto CNT.

Da questa esperienza è tuttavia possibile estrarre un protocollo operativo di *best practices*: la prima azione è una ricognizione storico-critica seguita dalla redazione di un piano diagnostico che privilegi, in prima istanza, analisi non distruttive (osservazioni macroscopiche, rilievo termo-igrometrico, termografia IR, test colorimetrici, peeling test, prove di assorbimento) e riservi prove invasive (gravimetriche, microprelievi, diffrazione a raggi X, spettroscopie, microtomografie) soltanto ai punti indicati come rappresentativi dalle indagini preliminari. I campioni invasivi dovrebbero provenire, ove possibile, da parti già staccate o degradate; in alternativa, si dovranno adottare tecniche minimamente aggressive (nastro adesivo, raschiatura con bisturi sterile).

La pianificazione degli interventi deve seguire una logica complementare e sequenziale: in primo luogo eliminare o ridurre la causa (ad esempio tramite sistema di deumidificazione appropriato come CNT-Domodry), quindi intervenire sul microclima (ventilazione controllata o deumidificazione) per favorire l'evaporazione controllata e stabilizzare le murature, e solo successivamente procedere con operazioni di desalinizzazione, trattamento del biodeterioramento, pulizia, consolidamento e ripristino delle superfici. L'installazione del CNT è condizione necessaria ma non sufficiente: senza la rimozione selettiva dei sali e la sostituzione delle finiture incompatibili non si ottiene il completo recupero conservativo.

Per il trattamento del biodeterioramento è essenziale identificare le specie presenti (fotoautotrofe ed eterotrofe) e adottare strategie che agiscano in modo combinato; le esperienze condotte a San Pietro Barisano suggeriscono che impacchi o applicazioni locali di prodotti a base naturale (ad es. miscela di glicoalcaloidi) possono rappresentare soluzioni sostenibili ed efficaci, soprattutto se usate con prodotti fungicidi appropriati e integrate in una procedura che preveda la rimozione dei residui e la verifica a medio termine della persistenza dell'effetto. Gli idrogel a base di alginato si sono dimostrati utili ma richiedono condizioni di asciugatura controllata (termoventilazione) per essere rimossi efficacemente su substrati molto porosi.

La pulitura delle superfici lapidee deve privilegiare metodi meccanici delicati (spazzole in larice) o cicli di lavaggio con acqua demineralizzata, sempre dopo prove preliminari su aree nascoste per evitare abrasioni. Solo a pulitura avvenuta è opportuno procedere al consolidamento e alla protezione del substrato: dove possibile la scelta prioritaria è l'impiego di malte e ricette tradizionali compatibili; nel contesto materano la reintonacatura in tre strati (strato di base più grossolano con aggregati locali, 1–3 cm; strato intermedio fine, 3–4 mm; finitura a latte di calce) garantisce compatibilità chimica, traspirabilità e continuità visiva dell'intervento e deve essere preferita salvo comprovata necessità di consolidanti commerciali. Quando si adottano agenti consolidanti commerciali (resine acriliche), è fondamentale verificarne penetrazione, effetto sulla porosità, biodiversità e assenza di alterazioni cromatiche a seguito di prove ripetute in sito.

Infine, la vicenda della chiesa evidenzia l'importanza della documentazione e della trasparenza tecnica: ogni fase (diagnosi, scelta dei materiali, fasi di cantiere, monitoraggi) deve essere registrata in schede tecniche e report di cantiere disponibili per valutazioni retrospettive e per la replicabilità degli interventi. I Sassi di Matera costituiscono un patrimonio unico che richiede manutenzione continua e programmata: combinare conoscenze storiche, diagnostica chimico-fisica, sperimentazione controllata e monitoraggio continuativo è la condizione per passare da interventi episodici a

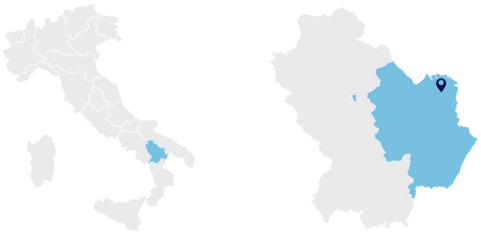
politiche di conservazione sostenibili nel tempo.

In sintesi, San Pietro Barisano conferma che interventi efficaci nascono da conoscenza approfondita, sequenze operative ordinate e protocolli documentati; le sperimentazioni qui condotte forniscono indicazioni utili per definire pratiche ripetibili e compatibili che coniughino tutela del carattere storico-materico e protezione delle superfici e delle opere interne, perseguendo la durabilità e la sostenibilità delle azioni conservativo-restaurative.

5.3

CHIESA DI SAN FRANCESCO D'ASSISI

5.3 Chiesa di San Francesco D'Assisi



Localizzazione:	Matera, MT
Anno/Epoca di costruzione:	XI-XII secolo
Tipologia edilizia:	Architettura religiosa
Destinazione d'uso:	Chiesa parrocchiale
Proprietà:	Arcidiocesi di Matera-Irsina
Diagnosi e monitoraggio:	Indagini geologiche, termografia IR, analisi termo-igrometriche, campionamenti litologici, analisi diffrattometriche, scotch tape test, test colorimetrico, water absorption test
Tecnologia costruttiva:	Muratura portante in conci di tufo



5.3.1 Analisi del contesto

5.3.1.1 Contesto territoriale

Il contesto territoriale e urbano di riferimento è lo stesso descritto nel caso studio della Chiesa di San Pietro Barisano, cui si rimanda per un inquadramento dettagliato. In questa sede si richiamano solo brevemente gli elementi essenziali utili alla comprensione del sito, sottolineando come anche la Chiesa di San Francesco d'Assisi si inserisca nel tessuto storico dei Sassi di Matera, caratterizzato da una fitta stratificazione di strutture rupestri e architetture costruite, in un equilibrio complesso tra morfologia naturale e insediamento antropico. Tale contesto, già approfonditamente trattato nella sezione precedente, rappresenta il quadro indispensabile per interpretare la genesi, le trasformazioni e le criticità conservative dell'edificio. Inquadramento geografico e climatico.

5.3.1.2 Evoluzione storica e architettonica

La Chiesa di San Francesco d'Assisi si colloca nella parte occidentale dei Sassi, nella cosiddetta zona del "*Piano*", in posizione centrale tra la Civita, Via del Corso e Piazza del Sedile. Il suo sviluppo è il risultato di continui adattamenti funzionali e formali che, a partire da un nucleo ipogeo, hanno prodotto nel corso dei secoli un organismo complesso dotato di cella campanaria e convento, quest'ultimo ormai scomparso.

Le fasi più antiche emergono dalla configurazione della facciata primitiva, oggi in parte occultata: la presenza, oltre la copertura della cella campanaria, di una finestra strombata decentrata rispetto al portale, e tracce di modanature dello zoccolo rinvenute sotto la pavimentazione d'accesso alla cella, rimandano a una facciata tardo-duecentesca orientata verso la Civita. La costruzione trecentesca della chiesa è tradizionalmente collegata al lascito testamentario del barone Buccardo Tovarelli (morto nel 1270) e alla vicinanza del cenobio rupestre dei Santi Pietro e Paolo; una muratura spessa circa 2,5 m, addossata alla presunta facciata e caratterizzata dalla modanatura a toro che prosegue verso l'esterno, suggerisce la sovrapposizione di fasi costruttive e la presenza di un fronte originario poi occultato da interventi successivi. [Delle Cave (2018)]

Elemento cruciale per datare e interpretare le trasformazioni è la "cella campanaria": vano quadrangolare voltato a crociera con snelli costoloni impostati su peducci scolpiti a motivi antropomorfi e zoomorfi e dotato in origine di un piccolo portale trilobato (oggi tompagnato). Le caratteristiche tipologiche e formali collocano la cella fra la metà del XIII secolo e la prima metà del XIV secolo; alcuni rilievi stratigrafici e i tagli nella muratura necessari per impostare la volta fanno però propendere per l'ipotesi che la cella sia stata eretta dopo la prima chiesa di fine Duecento, addossandosi a una facciata preesistente e provocandone in parte l'occlusione. [Altavilla (1986); Delle Cave (2018)]

Nel corso della prima metà del XIV secolo si compie una ristrutturazione planimetrica rilevante. L'avancorpo della cella e le limitazioni orografiche del pianoro a ovest, delimitato dalle depressioni di Piazza Sedile, Via Margherita e dal versante tra Via del Corso e Via delle Beccherie, inducono la nuova chiesa a svilupparsi in senso ortogonale rispetto all'originaria, assumendo modelli funzionali tipici dell'architettura francescana minore: navata unica, copertura lignea a capriate, arco trionfale acuto e abside piatta voltata a crociera.

I rilievi eseguiti sulla parete laterale destra hanno riportato alla luce una finestra strombata e archivoltata, la presenza dell'arco trionfale e, sopra l'attuale solaio, una sequenza di quattordici capriate lignee decorate che si estendono dall'arco trionfale fino all'area di facciata, a oltre un metro dall'attuale fronte. Le capriate, conservate in buona parte, presentano una decorazione a tempera su fondo bianco con motivi aniconici, girali, intrecci geometrici e figure zoomorfe tratte dai bestiari medievali; alcune capriate mostrano segni di ritocco o parziale rifacimento. Per analogia stilistica con coperture lignee pugliesi (Bitonto, Nardò) e con il soffitto della cattedrale di Matera, la decorazione lignea è riferibile a un arco

cronologico compreso tra il primo ventennio e la metà del XIV secolo. [Delle Cave (2018)]

Il XV secolo segna un'ampia stagione di ampliamenti e decori. L'ordine francescano, in espansione in Basilicata, utilizza le rendite offerte dalle famiglie più abbienti per rinnovare la chiesa. La finestra della parete destra viene trasformata da sesto acuto ad architravata e decorata con motivi floreali; le pareti absidali vengono affrescate (oggi in parte occultate dal coro); il portale della cella campanaria è parzialmente tompagnato e quel vano assume la funzione di sacrestia, rivestito di dipinti tardogotici con figure di santi in finte edicole trilobate.

Tra XV e XVI secolo la chiesa è interessata dall'apertura delle cappelle laterali: sul lato sinistro l'inglobamento di campate del chiostro consente la realizzazione di cappelle funerarie, come dimostra la presenza della cappella di San Francesco Glorioso con sepolture della famiglia Malvinni già documentate nel 1525; lungo il fronte sinistro è stata rinvenuta una finestra a sesto acuto con lunetta decorata, da riferire al XV secolo. Un affresco della Madonna in trono con Bambino, databile tra fine XV e inizio XVI secolo, è emerso nella cappella dell'Immacolata.

La costruzione delle cappelle di destra è documentata da un atto notarile del 3 febbraio 1582 che parla dell'erezione di "*tre arconi e pilastri*" con rapido termine di esecuzione e che porta alla tompagnatura definitiva della finestra trecentesca e all'occupazione di aree precedentemente adibite a botteghe. La cronaca di fine '700 di A. Copeti segnala ulteriori ampliamenti nei primi anni del Seicento, mentre tra XVI e XVII secolo viene realizzato il campanile a vela e il retro dell'edificio assume l'attuale sviluppo rettilineo con cornice a dentelli. [Delle Cave (2018)]

Nel XVII secolo, sotto la guida del vescovo Vincenzo Lanfranchi e del Padre Maestro dell'ordine Bernardino De Martinis, si susseguono lavori di restauro che interessano cappelle, altari, copertura e capriate. Viene ridisegnato il soffitto con lacunari e medaglioni, previsione che si collega alla presenza di una grande scultura lignea dell'Immacolata quale centro del programma decorativo.

Alla prima metà del Settecento risale una fase importante di ridefinizione della facciata. Si hanno notizie di una proposta progettuale del 1743 dell'architetto Vito Valentino di Bitonto, seguita da quella di Tommaso Pennetta nel 1751. Pennetta rinuncia nel gennaio 1752 e la perdita dei disegni non permette di attribuire con certezza l'autore dell'esito finale, che tuttavia risulta di gusto tardo barocco, frutto probabilmente di impianti e adattamenti successivi.

Tra il 1751 e il 1756 l'apparato decorativo interno viene completato da interventi artistici attribuiti a Carlo Casino di Milano, Domenico Preziosi di Napoli e Ciriaco d'Alesio di Altamura: la decorazione a stucco delle finestre, della porta maggiore, degli archi e delle cappelle viene restaurata, la cantoria lignea intagliata e dorata assume un ruolo di fulcro visivo (ospitando pannelli di un polittico quattrocentesco attribuito a Lazzaro Bastiani) e nel 1751 sono collocati gli stalli del coro ligneo. Il nuovo assetto comporta la tamponatura dell'oculo nell'abside per far posto all'organo, l'apertura di due finestroni sulla parete destra e la creazione di un nuovo accesso alla cella campanaria con conseguente occultamento di affreschi antichi. Nel presbiterio è collocato l'altare maggiore proveniente dall'Abbazia benedettina di Sant'Angelo di Montescaglioso, a conferma degli scambi liturgici e materiali tra istituti religiosi della regione.

La soppressione del convento, decretata il 25 luglio 1812, determina il trasferimento della cura della chiesa a sacerdoti nominati dal Capitolo della Cattedrale; nel corso dell'Ottocento e del Novecento la chiesa subisce interventi connessi a esigenze urbanistiche e conservative: nei primi decenni del XX secolo il sagrato settecentesco viene eliminato per la creazione dell'asse viario di Corso Umberto (oggi Via del Corso), sostituendo la scalinata curvilinea in pietra con una scala a due rampe addossata alla facciata.

Nel 1934 l'antico soffitto ligneo seicentesco viene rimosso e sostituito con una struttura in putrelle e tavelloni; nel 1945 si eseguono restauri degli stucchi e nuove decorazioni sul soffitto e la chiesa viene riaperta al culto, mentre nel 1949 è chiusa per la sostituzione del

pavimento di pietra calcarea con lastre di Trani.

Le vetrate policrome della facciata con le raffigurazioni di San Francesco, dell'Immacolata e di Sant'Antonio sono realizzate negli anni 1950–51. Durante i lavori di sistemazione di Piazza San Francesco (progetto dell'arch. L. Rota) è stato infine recuperato, sotto la scalinata novecentesca, il sagrato del XVIII secolo in mattoni di cotto a listelli e alcuni gradini originari, restituendo elementi utili alla lettura stratigrafica dell'ingresso.

5.3.2 Diagnosi preliminare

5.3.2.1 Metodologia diagnostica

La valutazione dello stato di conservazione della chiesa di San Francesco d'Assisi si è svolta su piani temporali e metodologici distinti, che riflettono la natura delle diverse campagne di intervento e la disponibilità di accesso alle parti strutturali e ipogee dell'edificio.

Le prime indagini, condotte in concomitanza con il primo lotto di lavori statici attuati nella seconda metà del XX secolo, avevano carattere essenzialmente geotecnico e strutturale. In questa fase è stato possibile rilevare il quadro fessurativo delle strutture portanti grazie all'erezione di impalcature, allo smontaggio di arredi e all'apertura di varchi che hanno consentito l'ispezione delle cavità sottostanti.

L'indagine sul terreno di fondazione è stata eseguita mediante quattro perforazioni con carotaggio continuo fino a 16 m di profondità rispetto al piano di campagna per fornire la stratigrafia utile a valutare la necessità e le modalità di eventuali interventi di consolidamento del banco calcarenitico di fondazione.

In occasione di successivi interventi (1982) furono inoltre eseguite perforazioni integrate per approfondire gli aspetti geologici necessari alla progettazione di opere di sostegno e consolidamento. Queste indagini geotecniche hanno costituito la base per la comprensione del rapporto tra comportamento strutturale della fabbrica e caratteristiche del sottosuolo.

Le campagne diagnostiche più recenti, realizzate nel contesto delle sperimentazioni connesse al progetto ministeriale "SMART CITIES" e alla successiva installazione del sistema CNT-Domodry, hanno adottato un approccio multi-analitico rivolto sia alla caratterizzazione dei materiali da costruzione sia al monitoraggio microclimatico e igrometrico degli ambienti. Tale approccio è finalizzato a integrare la conoscenza storica e stratigrafica della fabbrica con dati strumentali in grado di orientare interventi mirati e misurabili nel tempo.

Per il monitoraggio microclimatico sono stati impiegati strumenti portatili per la misura dei parametri termo-igrometrici ambientali e superficiali [Falchi (2018)]:

- Termoigrometro Hanna Instruments modello HI 18564 per la registrazione dei parametri ambientali
- Termoigrometro a contatto Gann Hydromette BL UNI 11 con elettrodo attivo B 55 BI per la misura delle superfici murarie (misure riportate in sede di campagna diagnostica)

Per verificare la presenza di umidità da risalita capillare si è fatto ricorso all'indagine termografica mediante termocamera Testo modello 820-2 Kit, scelta motivata dalle caratteristiche tecniche dello strumento (risoluzione geometrica di 640x480 pixel con super risoluzione di 1280x940 pixel, risoluzione termica di 0,04 °C e IFOV di o,71 mrad) e dalla sua capacità di fornire uno screening non invasivo delle anomalie lungo lo sviluppo verticale delle pareti.

Va inoltre sottolineato che, nell'ambito del progetto SMART CITIES, la caratterizzazione dei materiali è stata sviluppata in modo mirato alle aree oggetto di sperimentazione (navata, ipogeo, facciata) e ha integrato misure strumentali con prelievi minimamente invasivi quando necessari per analisi di laboratorio.

È opportuno chiarire che le informazioni relative ai metodi diagnostici più dettagliati (strumentazione, campionamenti e protocolli analitici) si riferiscono prevalentemente alla fase più recente di sperimentazione promossa dal progetto SMART CITIES e alle attività collegate

all'installazione del dispositivo CNT-Domodry; per gli interventi precedenti alla campagna sperimentale (in particolare quelli degli anni '80 e del primo restauro statico) non sono disponibili allo stato documentazione analitica completa sui protocolli diagnostici impiegati. Questa differenza temporale e di dettaglio metodologico va tenuta presente nella lettura complessiva dei dati.

5.3.2.1 Stato di conservazione

Le indagini geotecniche e il rilievo del quadro fessurativo eseguiti nel corso dei lavori degli anni Ottanta, integrati dai successivi sondaggi, mostrano un quadro di forte eterogeneità del banco di calcarenite su cui poggia la chiesa.

Dalle stratigrafie emergono tre ordini di problemi interconnessi:

- Marcata variabilità puntuale del grado di diagenesi della calcarenite
- Presenza di cavità artificiali nel sottosuolo
- Stato diffuso di fratturazione della roccia

La variabilità di diagenesi non segue un andamento regolare con la profondità ma si manifesta talvolta con sottili livelli intercalati che generano, nello spazio di pochi metri, comportamenti dal tipo lapideo compatto a porosità e consistenze quasi sabbiose e debolmente cementate; tale eterogeneità spiega in larga misura le vistose oscillazioni locali delle proprietà meccaniche e della durabilità del supporto roccioso.

Le perforazioni hanno rilevato cavità con altezze interne di circa 2,2 m, 2,4 m e 2,8 m i cui tetti si trovano tra 8,5 e 14 m sotto il piano campagna; lo sviluppo e la profondità di questi vuoti sono compatibili con cavità artificiali e suggeriscono connessioni con il sistema ipogeo sovrastante (in particolare la grotta della chiesa dei SS. Pietro e Paolo) e con diramazioni della cavea del Sasso Caveoso, mentre una connessione diretta con il Sasso Barisano è ritenuta improbabile data la distanza.

Le fratture osservate presentano per lo più andamento sub-verticale con inclinazioni di circa 60–70° rispetto al piano orizzontale; in alcuni casi le superfici di frattura assumono andamento lievemente curvo. La friabilità e l'eterogeneità del materiale hanno limitato la possibilità di eseguire analisi superficiali approfondite volte a stabilire eventuali scorrimenti relativi, ricementazioni o una precisa cronologia delle fratture, sebbene alcuni approfondimenti siano stati possibili analizzando fratture osservabili nelle cavità sotterranee.

Per quanto riguarda lo stato conservativo delle superfici esterne ed interne, le campagne diagnostiche più recenti hanno messo in evidenza una significativa eterogeneità del degrado in funzione dell'esposizione: il fronte occidentale della facciata, maggiormente esposto ai venti dominanti, mostra un maggiore effetto erosivo e una più pronunciata alveolizzazione rispetto agli altri prospetti.

Le ispezioni in loco, integrate con le ricognizioni storiche e le attività di restauro, hanno documentato un'estesa diffusione di efflorescenze e sub-efflorescenze saline, patine biologiche, distacchi di intonaco, esfoliazione delle pellicole pittoriche, decoesione e polverizzazione delle superfici lapidee, nonché incrostazioni calcaree in corrispondenza delle superfici maggiormente interessate dall'umidità. [Bernardo (2021); Bernardo (2022); Campanella (2021); Cardellicchio (2023); Falchi (2018); Gabriele (2022); Guida (2018); Lucchi (2018) Review]

Le indagini termografiche (Fig. 74) e le valutazioni microclimatiche (Tab. 6) svolte nelle campagne diagnostiche hanno individuato nell'umidità da risalita capillare una delle cause primarie dei fenomeni di degrado osservati. L'acqua ascendente ha favorito il trasporto e la deposizione di sali solubili e la formazione di incrostazioni calcaree,

Tab. 6 | Parametri ambientali rilevati nelle campagne diagnostiche del 2019, 2020 e 2022

	02/10/2019		01/09/2020		05/05/2022	
	Interno	Esterno	Interno	Esterno	Interno	Esterno
UR [%]	54,4	51,6	50,8	47,5	60,0	52,0
T_{aria} [°C]	25,9	25,9	25,5	24,2	22,0	25,0
$T_{rugiada}$ [°C]	15,9	15,1	14,5	12,3	13,8	14,4

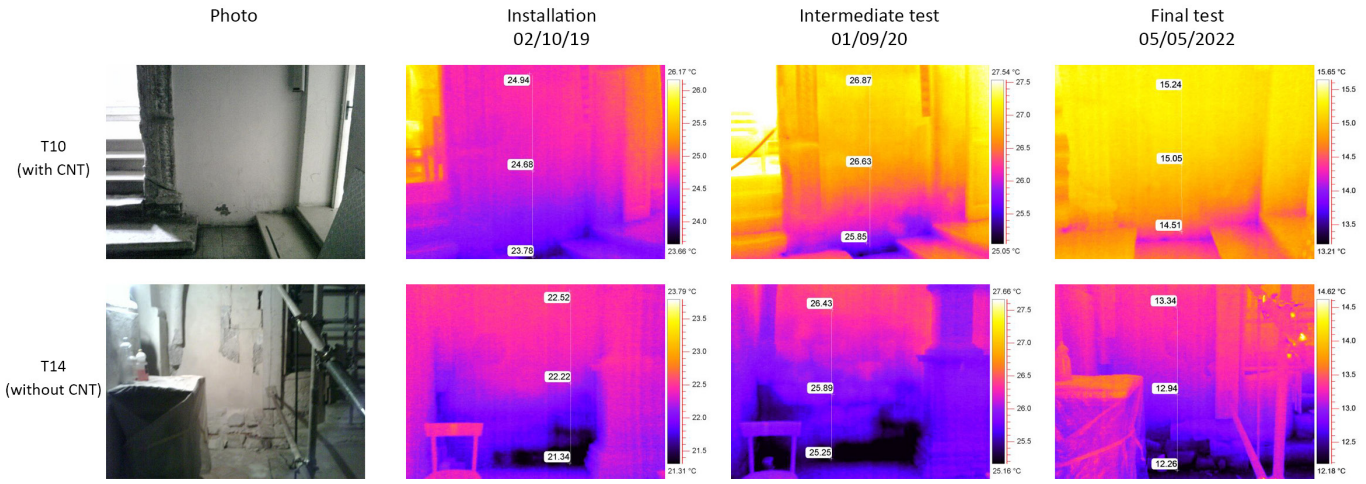


Fig. 74 | Termografie IR, con indicazione delle temperature lungo la parete, effettuate durante la campagna diagnostica negli anni 2019, 2020 e 2022

alterando il comportamento igrometrico delle superfici. Inoltre, la scarsa ventilazione degli ambienti interni e le ampie oscillazioni termo-igrometriche esterne hanno incrementato i cicli di cristallizzazione e dissoluzione dei sali, responsabili di alveolizzazione, perdita di coesione delle superfici e accelerazione dei processi di biodeterioramento.

In sintesi, lo stato conservativo della chiesa risulta dalla sovrapposizione di fragilità litologiche e strutturali (variabilità diagenetica, cavità, fratturazione) e di fattori ambientali e d'uso (microclima interno, esposizione, storia di abbandono e funzioni d'uso), per i quali una lettura integrata dei dati diagnostici è indispensabile per progettare interventi di consolidamento e misure efficaci di controllo dell'umidità.

5.3.3 Il progetto di risanamento

1980: Lavori di consolidamento statico e manutenzione straordinaria

A seguito della verifica del quadro fessurativo e delle condizioni geotecniche emerse dai sondaggi, l'intervento del 1980 (direzione Ing. M. Larocca, geom. M. De Simmeo; impresa esecutrice FONDEDILE S.p.A.) è stato concepito come un ampio intervento di consolidamento e manutenzione straordinaria volto a ripristinare la capacità portante dell'organismo murario e a mitigare le vulnerabilità legate alle cavità e alle fratture di fondazione. Per non introdurre ulteriori stati di coazione nelle strutture esistenti si è scelto di adottare il sistema dei reticoli cementati invece dell'impiego di tiranti tipo Widag, la cui tesatura avrebbe potuto alterare lo stato tensionale preesistente.

Per realizzare i reticoli cementati sono state praticate complessivamente 354 perforazioni con sonda elettrica rotativa nella muratura tufacea, con lunghezze variabili tra 0,7 e 5,5 m per un'ampiezza totale di 731,4 m. Le zone interessate dalle perforazioni includono: sacrestia, area absidale della Cappella Tramontano, parete esterna dell'abside, zona del rosone esterno absidale, telai di concatenamento dell'abside, prospetto esterno, angolo destro del coro, parete sinistra della zona absidale interna e Cappella di San Francesco.

Per migliorare la coesione delle murature sono state eseguite iniezioni con legante cementizio a composizione acqua-cemento, applicate in particolare sul lato destro del prospetto esterno, sulla parete della Cappella Tramontano e sull'abside del coro.

L'intervento ha previsto la demolizione parziale o totale di porzioni murarie degradate. Quattro finestre e un comignolo sul prospetto laterale

destro sono stati rimossi per consentire la ricostruzione e sono stati sostituiti 58 tufini in facciata, reintegrando il paramento dove necessario.

Lavori di pulitura e ripristino sono stati eseguiti su molte componenti esterne ed interne: pavimentazione in tufo, prospetti laterali destro e sinistro, scalinata esterna della zona absidale, prospetto esterno della Cappella Tramontano, prospetto posteriore, rosone, zona del coro, obelischi sui basamenti, statue, zona alta della facciata a vela, cornici, finestre e l'intera facciata principale.

Sono stati eseguiti diversi lavori anche per quanto riguarda le coperture:

- Cappelle laterali: sostituzione di tegole e tavolato
- Navata centrale e abside: riutilizzo del materiale originario, ove possibile; rinforzo delle capriate con legno di abete
- Cappelle (lato sinistro), navata centrale, cappelle a due falde, sacrestia, abside: realizzazione di un manto impermeabile con Viapol (spessore 4 mm)

Per risolvere problemi puntuali di instabilità e distacco di elementi lapidei (statue, cornicioni, marcapiani) sono state praticate perforazioni sui conci contigui e applicate staffe in ottone; le zone consolidate sono state sigillate con malta a base di resine epossidiche termoindurenti.

Sono state eseguite perforazioni di sondaggio addizionali per 5 m sino a un'altezza di indagine pari a 15 m, a supporto della caratterizzazione del sottosuolo e del quadro fessurativo.

Le nuove indagini hanno confermato la necessità di pianificare ulteriori interventi di consolidamento sulla roccia di fondazione, sulle fondazioni stesse e sulle strutture murarie sovrastanti.

Sulla scorta del quadro fessurativo e dello studio geologico e geotecnico del terreno viene suggerita una serie di interventi di consolidamento che interessino la roccia di fondazione, le fondazioni e le strutture murarie della chiesa.

1982: Lavori di consolidamento statico

Nel 1982 la chiesa di San Francesco d'Assisi fu oggetto di un nuovo intervento di consolidamento statico, diretto dall'ing. M. Larocca e dal geom. V. Nicoletti, con la supervisione delle Soprintendenze ai Beni Ambientali e Architettonici e ai Beni Artistici e Storici per le rispettive competenze. L'intervento rappresentava una prosecuzione e un approfondimento delle operazioni di messa in sicurezza già avviate nel 1980, resesi necessarie dopo il terremoto del 23 novembre 1980, che aveva evidenziato vulnerabilità latenti e fenomeni di dissesto localizzato.

Durante le ispezioni preliminari si riscontrarono lievi manifestazioni di schiacciamento nelle pilastrate laterali, una lesione significativa nella volta della chiesetta ipogea dei SS. Pietro e Paolo, e fessurazioni diffuse di modesta entità in altri elementi strutturali. Dai rilievi fu inoltre accertato che alcune porzioni murarie dell'edificio principale poggiavano su cavità vuote, riconducibili proprio alla presenza della chiesetta sotterranea, condizione che comprometteva la distribuzione dei carichi e contribuiva alla formazione delle lesioni.

Le lavorazioni furono articolate in due ambiti principali: il consolidamento della chiesa superiore e il rafforzamento delle cavità sottostanti.

Per la parte superiore dell'edificio, le operazioni principali riguardarono il preconsolidamento dei pilastri e delle arcate. I pilastri furono cerchiati e ammorsati ai setti retrostanti tramite iniezioni di miscele cementizie in perforazioni predisposte e armate con barre d'acciaio ad aderenza migliorata, al fine di migliorare la collaborazione tra i diversi corpi murari. Analogamente, le arcate sovrastanti furono consolidate mediante iniezioni cementizie realizzate da perforazioni disposte a raggiera, anch'esse armate con barre metalliche, per ristabilire la continuità strutturale e ridurre il rischio di cedimenti locali.

In questa fase furono eseguite 32 perforazioni in muratura di tufo del diametro di 40 mm, per un totale di circa 445 m lineari, destinate al consolidamento dei pilastri, e perforazioni da 50

mm per l'irrigidimento dei cosiddetti "martelli". In entrambi i casi furono impiegati tondi in acciaio ad aderenza migliorata Ø18 mm e Ø26 mm, con iniezioni di miscela acqua-cemento a completamento del riempimento dei fori.

Contestualmente, nella chiesetta dei SS. Pietro e Paolo e nelle cavità ipogee sottostanti la chiesa furono realizzati interventi di consolidamento e risarcitura delle lesioni. Qui le fratture della volta furono trattate mediante chiodature e iniezioni cementizie eseguite da perforazioni disposte a raggiera, anch'esse armate con barre d'acciaio ad aderenza migliorata, disposte secondo archi concentrici per migliorare la resistenza alla spinta. In corrispondenza dei punti di appoggio delle strutture sovrastanti furono inoltre costruiti nuovi setti murari in blocchi di tufo, con funzione di supporto e di redistribuzione dei carichi verticali.

A completamento dell'intervento, furono eseguite perforazioni geognostiche di indagine finalizzate alla caratterizzazione dell'insieme calcarenitico di fondazione e alla valutazione dell'efficacia dei consolidamenti eseguiti. Parallelamente si procedette al ripristino degli intonaci, degli stucchi e delle pitture, operazione che consentì di restituire leggibilità alle superfici e di verificare in maniera diretta l'evoluzione del quadro fessurativo dopo l'intervento.

2018-2020: Sperimentazioni nel progetto "SMART CITIES" e installazione dispositivi CNT-Domodry

Nel contesto delle sperimentazioni condotte nell'ambito del progetto "SMART CITIES", la Chiesa di San Francesco d'Assisi è stata oggetto di un intervento combinato che ha affiancato l'installazione del sistema CNT-Domodry (per il contrasto della risalita capillare) a un programma di test per la rimozione delle colonizzazioni biologiche e per il consolidamento delle superfici lapidee.

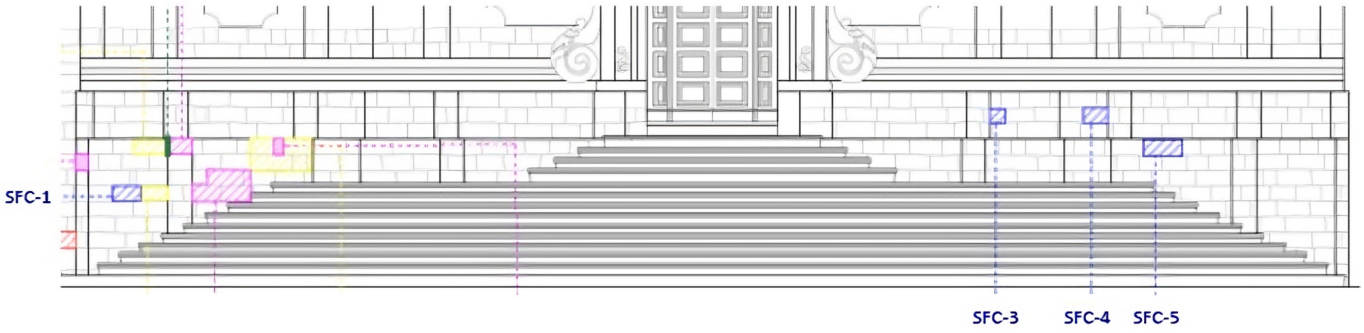
Il dispositivo Domodry, modello CNT-R15 (raggio sferico 15m), è stato installato in data 2019/09/13 con l'intento di coprire gran parte della superficie della chiesa. Alcune zone sono state lasciate fuori dal raggio d'azione per consentire un confronto diretto fra aree coperte e non coperte dall'azione della CNT per consentire un confronto diretto fra le aree e valutare l'efficacia della tecnologia.

Come emerso dalla campagna diagnostica preliminare i fenomeni di degrado più evidenti erano la perdita di materiale per alveolizzazione ed erosione, alterazione cromatica delle superfici e degrado estetico aggravato dai precedenti interventi con malte o protettivi non sempre compatibili con la calcarenite locale [Gizzi (2016)].

Il protocollo operativo per le sperimentazioni sul controllo biologico è risultato conforme alle pratiche consolidate nel restauro scientifico: identificazione delle specie microbiche (batteri e funghi), scelta mirata dei biocidi o prodotti biologici, applicazione dei trattamenti, verifica dell'efficacia, pulizia delle superfici e successivo consolidamento/protezione del substrato. Tale protocollo è documentato nelle campagne diagnostiche e sperimentali consultate. [Falchi (2018); Gabriele (2022); Guida (2018); D'Alessandro Restauri (2020)]

Per le prove sulla facciata sono stati predisposti

Fig. 75 | Stralcio del prospetto principale della Chiesa di San Francesco D'Assisi con localizzazione dei campioni



campioni numerati e trattati con procedure differenziate (Fig. 75):

- Sui campioni SFP1, SFP2, SFP3 è stato applicato uno spruzzo di detergente commerciale per la detersione iniziale
- Per il consolidamento della superficie sono stati testati due agenti commerciali a base di resine acriliche; il protocollo di applicazione definito per il "tipo 1" prevedeva una mano a pennello seguita da una mano a spruzzo fino a saturazione, con diluizione in acqua 1:10. Tale schema è stato applicato, fra gli altri, ai campioni SFC1, SFC3, SFC4, SFC5, SFC7
- Le operazioni di pulizia preliminare, eseguite in funzione dello stato di degrado, hanno previsto la spazzolatura con spazzole in saggina (campioni SFC2, SFC3) e la spazzolatura seguita da lavaggio con acqua demineralizzata (campione SFC1) per rimuovere residui incoerenti di superficie
- Per la risarcitura dei giunti è stata preparata ed applicata una malta tufo-calce in rapporto 3:1 sui campioni già consolidati, per verificare compatibilità plastica e adesiva tra risarcitura e consolidamento
- Per valutare l'effetto di agenti idrorepellenti, sui campioni SFC10 e SFC12 è stato impiegato uno spray consolidante con componente idrorepellente, mentre sul campione SFC11 è stato applicato lo stesso spray senza idrorepellente; ciò ha permesso un confronto diretto su traspirabilità e comportamento in presenza di acqua meteorica.

5.3.4 Risultati

5.3.4.1 Monitoraggio post-intervento

Le valutazioni post-intervento condotte dopo l'attivazione del sistema CNT-Domodry si sono basate su controlli periodici (termografie, prove non distruttive in situ e test di adesione) eseguiti a intervalli definiti per verificare l'efficacia nel tempo sia della tecnologia di deumidificazione sia dei prodotti applicati alle superfici lapidee. È importante sottolineare che le informazioni qui riportate fanno riferimento esclusivamente al monitoraggio eseguito nell'ambito del progetto sperimentale.

I rilievi termografici sono stati eseguiti con una termocamera TESTO modello 820-2 Kit in occasione dell'installazione del dispositivo CNT con mappatura iniziale del 2019/10/02 e della verifica finale a distanza di 3 anni dall'installazione il 2022/05/05. In occasione di queste indagini sono stati altresì rilevati i parametri ambientali.

Il confronto tra i rilievi termografici ha evidenziato una netta differenza fra l'area coperta dall'azione del dispositivo (termogramma T10) e un'area di controllo non coperta (T14). In T10 si è osservata una diminuzione delle anomalie termiche compatibili con la presenza di umidità da risalita capillare, mentre in T14 la risalita capillare risultava ancora rilevabile come nel primo saggio termografico, confermando quindi un'efficacia locale del CNT ma suggerendo la necessità di estendere il trattamento per proteggere l'intero organismo edilizio.

Tuttavia l'eliminazione dell'umidità riscontrata non è di per sé risolutiva: rimangono infatti presenti efflorescenze e sub-efflorescenze saline formatesi in seguito al naturale processo di asciugatura delle murature. Di conseguenza il monitoraggio ha indicato la necessità di interventi successivi volti alla desalinizzazione delle superfici, prima di procedere con consolidanti o protettivi su vasta scala.

Per quantificare l'impatto dei trattamenti di pulizia e consolidamento sono state eseguite tre prove *in situ* riferite a campioni trattati e di controllo: test colorimetrico, *water absorption test*, *scotch tape test*.

Le misurazioni per il test colorimetrico (UNI EN 15886:2019 "Conservazione dei Beni Culturali - Metodi di prova - Misura del colore delle superfici") [UNI EN 15886:2019] sono state eseguite con uno spettrofotometro Konica Minolta CM-2600d, apertura Ø 8

mm, componente speculare esclusa (SCE), illuminante D65, angolo di visione 10° [Bernardo (2021)].

In quasi tutte le aree trattate non sono state registrate variazioni cromatiche apprezzabili (ΔE<5). Uniche eccezioni sono rappresentate dalle zone SFC1 e SFC4, trattate con consolidante di tipo 1, che hanno mostrato valori di ΔE rispettivamente pari a 7,4 e 13, valori che indicano una variazione cromatica percepibile e pertanto vanno considerati criticamente prima di estendere il trattamento.

Il *Water Absorption Test* (UNI 11432:2011 "Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Misura della capacità di assorbimento di acqua mediante spugna di contatto") [UNI 11432:2011] è stato eseguito sia sulle aree trattate che su quelle non trattate mediante l'applicazione di 5 ml d'acqua e un tempo di contatto di 1 min.

Questo test ha consentito di quantificare una riduzione dell'assorbimento d'acqua di circa il 50% nei campioni SFC1, SFC6, SFC7 rispetto alle superfici lapidee non trattate. Mentre, nel campione SFC4 tale riduzione è stata limitata al 30%.

Lo *Scotch Tape Test* (ASTM D3359-08 "*Standard test methods for measuring adhesion by tape test*") [ASTM D3359-08] è stato eseguito con strisce di carta adesiva (50x22 mm), pesate con bilancia analitica (sensibilità 0,1 mg), applicate 90 s e rimosse. Ciascuna prova è stata ripetuta quattro volte in ciascun punto ed è stata seguita da una valutazione del materiale rimosso (TRM) e della massa per singolo "strappo" (RM, mg/cm^2). [Bernardo (2021)]

Le zone SFC-5 e SFC-7 (consolidante tipo 1) hanno mostrato il TRM più basso, suggerendo la migliore efficacia in termini di coesione superficiale tra le opzioni testate. Nessuna variazione è stata registrata nella zona SFC6 rispetto alla superficie non trattata; anche nella zona SFC4 l'applicazione dei prodotti non sembra aver dato buoni risultati.

Analizzando il valore RM per singolo strappo, non si osservano differenze significative neanche nel campione SFC-1, rispetto alla superficie non trattata. Inoltre, in tutti i casi il valore RM più elevato si registra nell'ultimo strappo, probabilmente per rimozione della porzione più superficiale e coerente del materiale.

I dati raccolti mostrano risultati eterogenei: alcuni consolidanti (tipo 1) migliorano coesione e idrorepellenza su particolari campioni (SFC5, SFC7), ma altri trattamenti inducono variazioni cromatiche apprezzabili (SFC1, SFC4) o risultati limitati (SFC6, SFC4). Questo quadro evidenzia tre punti critici:

- Eterogeneità del substrato (calcarenite con variabilità locale) produce risposte differenziate ai medesimi prodotti: la stessa formulazione può comportarsi in modo diverso su punti contigui
- Compatibilità e traspirabilità: l'uso di consolidanti a base acrilica può ridurre l'assorbimento d'acqua a breve termine, ma può anche compromettere la traspirazione del supporto e favorire l'accumulo di sali in profondità se la superficie non viene preventivamente desalizzata
- Impatto estetico: variazioni cromatiche non trascurabili (ΔE > 5) sono critiche in contesti monumentali e impongono limiti all'estensione dei trattamenti che alterano la percezione visiva

5.3.4.2 Considerazioni finali

L'analisi complessiva degli interventi e delle campagne diagnostiche condotte su San Francesco d'Assisi conferma che la qualità e la durabilità degli interventi di restauro e risanamento sono strettamente condizionate da un protocollo diagnostico e di monitoraggio rigoroso, applicato prima, durante e dopo le lavorazioni.

Le indagini storiche, stratigrafiche, geotecniche e microclimatiche hanno permesso di ricondurre le alterazioni osservate a cause multiple e interrelate: eterogeneità e fratturazione della calcarenite di fondazione, presenza di cavità sotterranee, esposizione a condizioni microclimatiche critiche.

Gli interventi di consolidamento e manutenzione straordinaria realizzati a partire dal 1980 (reticoli

cementati, iniezioni cementizie, sigillature con resine epossidiche, manti impermeabili bituminosi, cuci-scuci) hanno risposto all'urgenza di ripristinare la capacità portante e la stabilità, tenendo conto della presenza di cavità e fessurazioni. Tuttavia, l'ampiezza e la modalità di tali lavorazioni hanno presentato criticità pratiche e concettuali. L'elevato numero di perforazioni e le demolizioni/ricostruzioni parziali hanno comportato un grado significativo di invasività sull'organismo edilizio, riducendo in alcuni casi la reversibilità degli interventi e alterando la lettura stratigrafica delle superfici; ciò richiede una documentazione accurata a posteriori e giustificazioni progettuali puntuali. In termini materici, l'impiego massiccio di leganti cementizi, sigillanti sintetici e membrane bituminose ha introdotto elementi con caratteristiche di permeabilità al vapore, rigidezza e comportamento igrometrico non sempre compatibili con la calcarenite e le malte tradizionali, esponendo l'edificio a rischi di accumulo locale di umidità, migrazione/accumulo salino e concentrazione di sollecitazioni in corrispondenza dei giunti tra materiali diversi. Queste problematiche sono particolarmente rilevanti in contesti come i Sassi, dove la compatibilità fisico-chimica dei materiali è cruciale per la durabilità degli interventi.

Le sperimentazioni e il monitoraggio condotti nell'ambito del progetto "SMART CITIES" (in cui sono state effettuate prove su biocidi, idrogel e consolidanti commerciali, nonché l'installazione di dispositivi CNT-Domodry) hanno fornito informazioni operative importanti ma anche limiti chiari.

L'installazione del dispositivo CNT ha dimostrato efficacia nell'arresto della risalita capillare, ma tale efficacia è risultata parziale e circoscritta: la deumidificazione delle murature non elimina i processi di degrado già instaurati (presenza di sali, colonizzazioni microbiche, alterazioni delle pellicole pittoriche), di conseguenza la tecnologia CNT va considerata come uno strumento utile all'interno di un programma integrato e non come soluzione isolata.

Le prove su pulitura biologica e consolidamento hanno evidenziato comportamenti differenziati a seconda dei prodotti e dei punti di applicazione: alcuni consolidanti acrilici hanno ridotto l'assorbimento d'acqua e la perdita di materiale in determinate aree, mentre in altre hanno determinato variazioni cromatiche visibili (valori $\Delta E > 5$ rilevati in punti trattati) o efficacia limitata. Per questo motivo ogni prodotto deve essere validato su un numero rappresentativo di punti e monitorato nel tempo con prove non distruttive (colorimetria, test di permeabilità, scotch-tape, test di assorbimento) prima di una applicazione estesa.

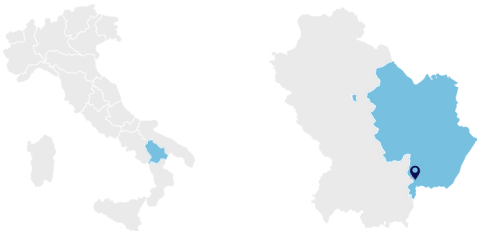
Dalle esperienze sperimentali emergono indicazioni operative concrete e vincolanti per una strategia efficace sulla chiesa di San Francesco d'Assisi: estendere con criterio la deumidificazione (valutando l'incremento del campo d'azione del CNT o soluzioni complementari) al fine di stabilizzare il microclima dell'intero organismo; realizzare prima della fase di consolidamento un programma di desalinizzazione e di disinfestazione microbiologica; selezionare prodotti e tecniche mediante prove estensive e monitoraggio costante; privilegiare interventi a bassa invasività e con materiali compatibili e sostenibili; documentare ogni fase con rilievi e fotografie e programmare un monitoraggio non invasivo a medio–lungo termine.

Va richiamata con forza la questione della compatibilità materica e della reversibilità: dove gli interventi precedenti hanno introdotto materiali rigidi e poco traspiranti (cementi, resine acriliche, membrane bituminose) è opportuno valutare azioni correttive mirate, tese a ripristinare percorsi di traspirazione e suddividere in modo più omogeneo i regimi igrometrici. Le soluzioni future dovranno perseguire la massima compatibilità fisico-chimica con la calcarenite locale, la minimizzazione dell'impatto visivo e l'adozione di protocolli di manutenzione programmata che riducano la necessità di interventi emergenziali. Solo un piano organico, sequenziale e monitorato potrà garantire la conservazione sostenibile e duratura dell'edificio e del suo apparato decorativo.

5.4

CASTELLO DEI CONTI CARAFA

5.4 Castello dei Conti Carafa



Localizzazione:	Colobraro, MT
Anno/Epoca di costruzione:	IX-XII secolo
Tipologia edilizia:	Castello
Destinazione d'uso:	Culturale
Proprietà:	Comune di Colobraro
Diagnosi e monitoraggio:	Termografia IR, analisi termo-igrometriche, analisi ponderali, analisi al microscopio ottico, rilievo con drone e stazione totale
Tecnologia costruttiva:	Muratura portante mista in pietre naturali e laterizio con volte in laterizio



5.4.1 Analisi del contesto

5.4.1.1 Contesto territoriale

Il Castello dei Conti Carafa sorge sulla sommità del centro abitato di Colobraro (provincia di Matera), arroccato a 665 m s.l.m. sulle pendici meridionali del Monte Calvario; la sua posizione dominante consente una visuale ampia che comprende il Golfo di Taranto, le valli dei fiumi Sinni, Sarmento e Agri e le creste del massiccio del Pollino (Dolcedorme), elementi che definiscono il paesaggio e la rilevanza territoriale del sito. [Crispino (2017); Vitale (2018)]

Dal punto di vista geologico, la Carta Geologica d'Italia scala 1:25000 (Foglio 523–Rotondella) inquadra Colobraro nel Flysch Numidico (Fig. 76): la successione è composta da quarzareniti giallastre, mal classate, in strati di 2–10 m con interstrati sottili di argille marnose e siltiti; alla base si registrano alternanze di marne brune e livelli sottili di quarzareniti con fenomeni di bioturbazione, slump e presenza di olistoliti calcarei [ISPRA (2016) Foglio 523-Rotondella]. Questa configurazione litologia, eterogenea per composizione e permeabilità, comporta potenziali criticità di tipo idrogeologico: la presenza di livelli argillosi a bassa permeabilità, alternati a strati più permeabili, favorisce l'accumulo di acqua nel sottosuolo e il rallentamento del drenaggio, condizioni che, unite alla morfologia collinare e alla posizione dominante del sito, possono accentuare fenomeni di risalita capillare nelle strutture murarie.

Il castello occupa il punto più elevato del borgo e vi si accede attraverso percorsi ripidi che discendono lungo il versante sud-occidentale dell'altura. Tale conformazione, se da un lato ne ha storicamente garantito la funzione difensiva, dall'altro ne evidenzia oggi l'isolamento e le difficoltà logistiche legate all'inaccessibilità tipica dell'entroterra lucano. La collocazione topografica, dunque, non solo condiziona le dinamiche di drenaggio e accumulo idrico, ma impone anche strategie operative mirate per la gestione del cantiere e per la salvaguardia dell'edificio.

Le origini del nucleo abitato di Colobraro risalgono, secondo alcune fonti, alla fondazione di un cenobio basiliano nell'XI secolo; altre ricostruzioni collocano invece la formazione del borgo e del sistema fortificato nel XII secolo. Tale stratificazione storica ha definito un impianto urbano compatto, in cui il castello rappresenta il fulcro insediativo e simbolico.

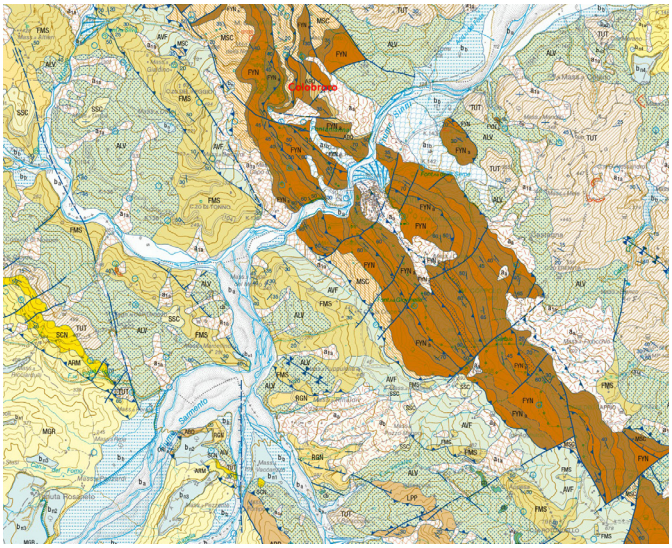


Fig. 76 | Stralcio Carta Geologica d'Italia 1:25.000, F.523-Rotondella

Sul piano culturale, Colobraro presenta una forte identità legata sia alla memoria storica sia al patrimonio immateriale. Il toponimo, secondo Giacomo Racioppi, deriverebbe dal latino *coluber* (serpente), in riferimento alla presenza di "*scorzoni*" (termine dialettale tipico dell'Italia Meridionale per indicare il biacco, un serpente comune e non velenoso) nelle aree circostanti.

Nel secondo dopoguerra il paese ha acquisito notorietà per le leggende sul rito del "fascino" e sulla sfortuna, divenendo un simbolo del folklore lucano. Particolarmente nota è la leggenda del «Monakikkj», spirito o folletto dei sotterranei del castello, figura che appartiene al patrimonio demo-etno-antropologico locale e che continua a permeare la narrazione collettiva e turistica del luogo. Come riportato nella tradizione popolare:

"*Gente, gente che per strada andate,*

che volete? che cercate?

La gioia, la felicità? O l'amore, fortuna e denari?

Ecco, mi vedete e mi sentite.
Tutti appresso scappate
e questo rosso cappello di prendere sperate.
Ma se veramente fortunati volete essere
qualche cosa dovete capire:
sfortuna, malocchio e jella
nella testa stanno e oscurano la vita bella.
Anche se mi pigli e mi rubi il cappello, lo stesso,
ricordati, che il monachicchio con una pernacchia sempre ti fa fesso! " [Regione Basilicata (2014)]

Negli ultimi anni il recupero del Castello dei Conti Carafa, sottoposto a vincolo ai sensi della L. 1089/39 per la tutela delle cose di interesse artistico e storico, si è inserito in un più ampio programma di riqualificazione del centro storico, comprendente la realizzazione di percorsi pedonali, il rifacimento della piazza antistante la chiesa matrice e la pavimentazione dello spazio antistante il castello. Questi interventi, cofinanziati anche attraverso i programmi PIOT (Pacchetto Integrato di Offerta Turistica), hanno contribuito al miglioramento della qualità urbana e alla valorizzazione turistica del borgo.

Parallelamente, l'Amministrazione Comunale ha promosso l'evento estivo itinerante "Sogno di una notte a Quel Paese", un percorso teatrale che si conclude proprio tra le vestigia del castello. L'iniziativa, riconosciuta dalla Regione Basilicata e dall'APT come patrimonio culturale immateriale (D.G.R. 958/2015) e inserita tra i dieci macro-attrattori regionali, ha registrato un forte successo di pubblico, superando i 20.000 visitatori a edizione.

Questo contesto di rinnovata attenzione e valorizzazione culturale offre oggi l'opportunità di integrare gli interventi di risanamento conservativo in una strategia di gestione sostenibile del bene, rafforzando la sinergia tra tutela, fruizione e promozione del territorio. Tuttavia, tale prospettiva richiede una riflessione attenta sulla compatibilità tra soluzioni tecniche e vincoli storico-artistici, nonché una valutazione degli eventuali impatti estetici, ambientali e percettivi. In questo quadro, la conoscenza delle condizioni geotecniche e morfologiche del sito, unita alla comprensione del suo valore identitario e paesaggistico, costituisce una base indispensabile per definire strategie di intervento efficaci e rispettose del contesto.

5.4.1.2 Evoluzione storica e architettonica

Il Castello dei Conti Carafa rappresenta un esempio emblematico di architettura fortificata che riflette la complessa evoluzione funzionale e morfologica del patrimonio architettonico della Basilicata interna. Le origini dell'edificio restano incerte e coprono un ampio arco temporale tra il IX e il XII secolo [Crispino (2017)]: secondo alcuni manoscritti del 1787, il castello risalirebbe già all'804 ad opera del barone Antonio Caffo, mentre altre fonti indicano il XII secolo come periodo più probabile della costruzione.

L'incertezza sull'epoca di costruzione del castello non meraviglia se si considera che la valle del Sinni non ha mai costituito una via di penetrazione verso il mare Ionio e/o Tirreno, per cui per i Castelli della valle del Sinni non è facile recuperare precise indicazioni.

Nei secoli, il castello è stato soggetto a numerosi passaggi di proprietà: dal 1117 appartenne ad Albereda di Chiaromonto, dal 1119 al Conte Bertaimo d'Andria che lo donò a Ugone e Margherita, Conti di Chiaromonto; nel 1270 passò ai signori Angioini Taxino de Iovino, quindi a Eustachio de Jovenale da Colobraro; nel 1463 a Roberto Sanseverino, Principe di Salerno; nel 1562 a Eleonora Comite. Successivamente, nel 1617 fu acquisito dai Carafa della Stadera di Napoli e, nel 1732, dalla famiglia Donnaperna, che ne mantenne la proprietà fino all'Unità d'Italia; successivamente il castello passò ai Brancalasso di Tursi, entrando in uno stato di progressivo abbandono e degrado.

Eventi naturali e interventi umani hanno profondamente modificato l'edificio. Il terremoto del 1856, insieme al graduale abbandono dei proprietari, provocò danni significativi. Parti importanti, tra cui la torre quadrangolare e un'ala del castello, furono demolite per preservare la struttura restante e creare spazio per nuove costruzioni, come il

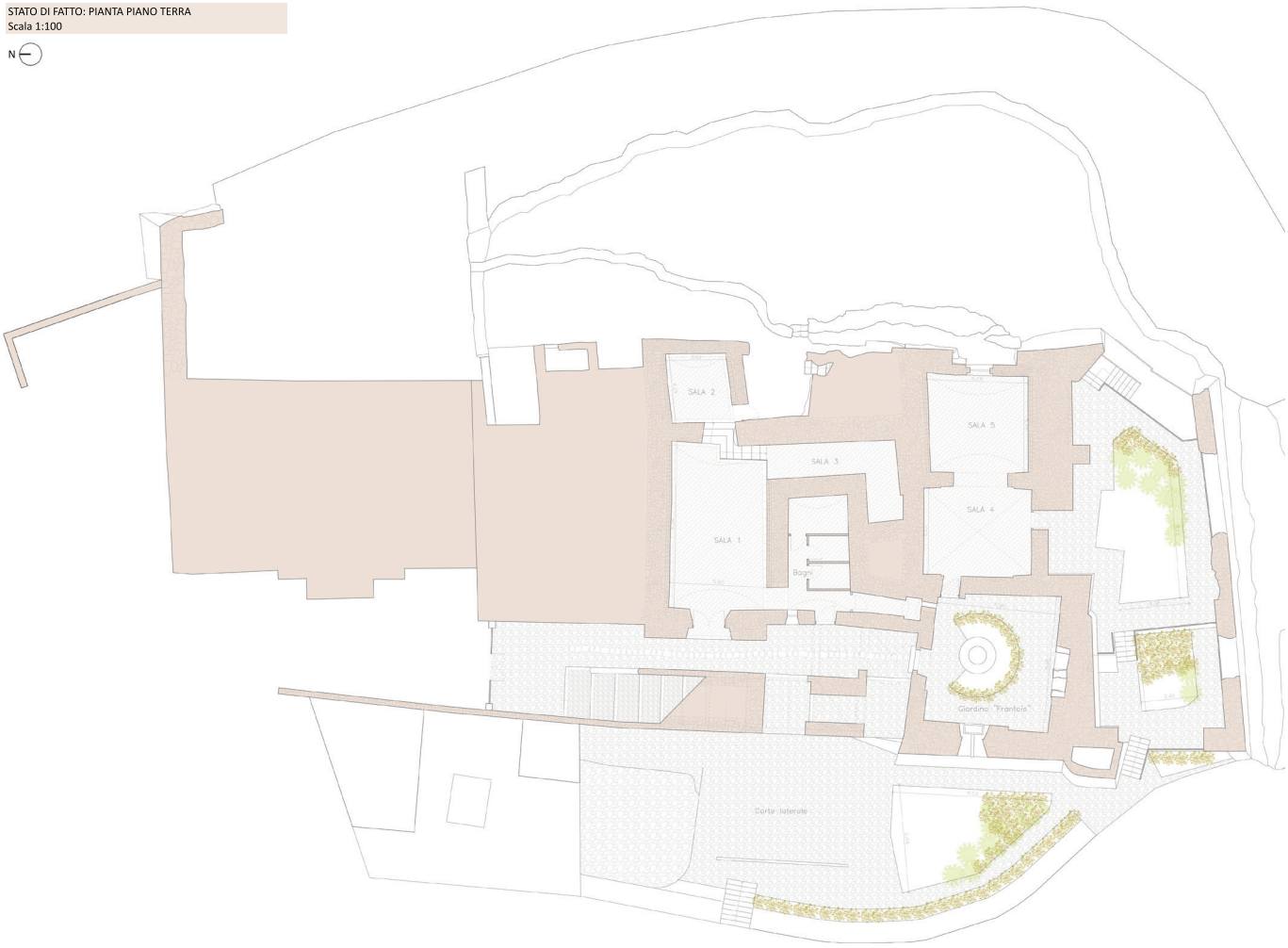


Fig. 77 | Pianta piano terra: stato di fatto aggiornato a novembre 2024

serbatoio dell'acquedotto pubblico. Oggi, sul lato nord-est sopravvive un residuato delle mura di cinta con feritoie; a nord è ancora visibile una torre angioina e lacerti murari che testimoniano la presenza di un ponte levatoio, mentre la scalinata di accesso dal borgo al castello è ancora intatta. L'antica torre quadrilatera è stata abbattuta e gli ambienti circostanti furono adattati ad usi rurali, come stalle o depositi (Fig. 77-78).

Nonostante il castello sia ridotto a rudere, alcune fonti, come il Bretagna, forniscono informazioni sulla struttura originale. Prima dell'ampliamento del Cinquecento a opera dei Carafa, l'edificio comprendeva oltre quaranta vani al primo piano e grandi magazzini, atri e corti al piano terra. Successivamente, con la costruzione di muraglioni, si aggiunse un ulteriore piano, comprendente sei sale e una scuderia. Una galleria sotterranea, oggi non più esistente, collegava il castello alla cappella gentilizia dell'Icona.

L'impianto originario rispondeva a esigenze strategico-militari, con caratteristiche tipiche di un castello medievale massiccio e rudimentale, mentre le abitazioni circostanti si svilupparono come un borgo a ventaglio, compatto e in pietra, alle falde della rocca. Con il tempo, la struttura si trasformò in un grande e austero palazzo cinquecentesco, destinato a residenza extraurbana dei signori feudatari. La famiglia Carafa ampliò ulteriormente l'edificio costruendo una grande sala e altre quattro stanze sul lato ovest; al piano terra erano presenti tre volte parallele sostenute da due file di colonne quadrate e la scuderia per gli



Fig. 78 | Pianta primo piano: stato di fatto aggiornato a novembre 2024

armaioli e gli scudieri.

Dal punto di vista costruttivo, il castello presenta murature portanti in pietra naturale (proveniente dalle vicine valli fluviali) intervallate da strati di fango, malta e frammenti di pietra e mattoni. Particolarmente rilevanti sono le volte a botte e a crociera in mattoni pieni, insolite per la zona, che testimoniano una conoscenza avanzata delle tecniche costruttive dell'epoca (Fig. 79-80-81).

Al piano terra si trovano cinque stanze con volte a botte e a crociera, mentre la grande sala rettangolare a est, oggi trasformata in giardino, originariamente aveva un tetto in legno, come evidenziato dalle nicchie per le travi nelle pareti perimetrali. Nel giardino si conserva ancora una macina, testimonianza dell'uso funzionale dell'edificio durante il periodo di abbandono e adattamento ad attività rurali (Fig. 82).

Il primo piano comprende due stanze e un'ampia terrazza esterna, che conserva i resti dell'atrio d'ingresso originario, accessibile tramite scala esterna (Fig. 83) e diviso in due zone distinte, come mostra una nicchia nel muro con apertura a tripla arcata (Fig. 84). Da questo atrio si accedeva a tre stanze quadrate, due a ovest e una a est; a ovest si trova un grande terrapieno adiacente al serbatoio dell'acquedotto pubblico (Fig. 85).

Nel 1980 il Comune di Colobraro ha acquisito il castello, avviando una serie di interventi di restauro e consolidamento tuttora in corso, con l'obiettivo di preservare la struttura esistente, valorizzarne gli elementi storici e consentire una



Fig. 79 | Volta a botte della Sala 1, foto del 29/06/2023



Fig. 80 | Volta a crociera della Sala 4, foto del 29/06/2023



Fig. 81 | Volta a botte della Sala 5, foto del 29/06/2023



Fig. 82 | Giardino frantoio, foto del 29/06/2023



Fig. 83 | Scala d'accesso al primo piano, foto del 29/06/2023



Fig. 84 | Terrazza sud, foto del 29/06/2023



Fig. 85 | Sala 6, foto del 29/06/2023

fruizione compatibile con le esigenze di tutela e promozione culturale del borgo.

5.4.2 Diagnosi preliminare

5.4.2.1 Metodologia diagnostica

La campagna diagnostica condotta per il progetto di restauro del Castello dei Conti Carafa si fonda su due fasi documentate, la campagna di rilievo e acquisizione dati realizzata nel maggio 2009 e la campagna diagnostica integrata avviata nel 2022 per l'ultimo restauro ancora in corso, mentre non risultano reperibili evidenze documentali circa eventuali campagne diagnostiche svolte in corrispondenza degli interventi eseguiti tra il 2010 e il 2017.

Nel 2009, operando sul monumento nello stato di rudere e tenuto conto dell'inaccessibilità di alcune porzioni, la strategia diagnostica ha privilegiato una combinazione di rilievo indiretto (strumentale e fotogrammetrico) e rilievo diretto.

Per il rilievo topografico strumentale è stata impiegata una stazione totale Kolida KTS442R con distanziometro elettronico e precisione angolare di 2°; è stata quindi allestita una rete di riferimento locale composta da 43 punti fissi materializzati mediante chiodi topografici e marker, cui sono state collegate 27 stazioni di ripresa e le cui coordinate X–Y–Z hanno permesso di registrare complessivamente 3.679 punti battuti. Tale rete ha consentito la definizione geometrica dell'impianto a più livelli e ha costituito la base per la caratterizzazione materica preliminare del manufatto.

Il rilievo diretto ha integrato il rilievo strumentale mediante trilaterazioni, allineamenti e disegni "fil di ferro" per le porzioni non raggiungibili con la stazione totale; a partire dai punti di triangolazione sono stati redatti dettagli in scala 1:50 (talvolta 1:20) con annotazione puntuale di lesioni, fessurazioni, irregolarità, incavi, tracce di rivestimenti e di interventi pregressi.

Il rilievo indiretto fotogrammetrico ha permesso la formazione di fotopiani per prospetti e sezioni mediante acquisizioni effettuate con piano focale parallelo alle pareti oppure, in spazi stretti, tramite immagini oblique opportunamente raddrizzate e mosaicizzate. La restituzione grafica è stata sviluppata in Archicad 12 (.pln) ed esportata in .dwg; per la codifica dei paramenti murari sono stati utilizzati retini custom.

Nonostante la presenza spesso infestante di vegetazione, il rilievo ha coperto la maggior parte degli ambienti, con l'eccezione di porzioni definite "zone buie", in particolare l'area retrostante il serbatoio idrico, non accessibile per motivi di sicurezza a causa della morfologia fortemente scoscesa e dell'ostruzione visiva determinata dalla vegetazione, e di un locale al piano terra ostruito da materiali di risulta.

Si osserva criticamente che il rilievo del 2009, eseguito a monte di ogni operazione di sgombero stratigrafico, ha fornito una documentazione geomorfometrica essenziale ma necessariamente parziale: la rimozione successiva degli accumuli e dei materiali di crollo ha reso necessarie integrazioni sostanziali della lettura stratigrafica e della restituzione grafica.

Dal punto di vista informatico, la trasposizione automatica dei dati di rilievo diretto (trilaterazioni, allineamenti) verso ambiente CAD ha presentato limiti di interoperabilità e tempi operativi elevati; inoltre, l'impiego di retini non standardizzati ha ridotto la replicabilità



Fig. 86 | Campagna diagnostica con termocamera IR



Fig. 87 | Prelievo di campioni di efflorescenze saline, foto del 15/10/2024



Fig. 88 | Raccolta di provini in loco, foto del 15/10/2024

semantica degli elaborati.

Infine, il computo metrico del progetto definitivo prevedeva altresì voci per analisi di laboratorio delle malte esistenti (prelievi su muratura secondo indicazione del DL) e per indagini termografiche o soniche sui maschi murari di forte spessore, a testimonianza della necessità di approfondimenti materici e di verifica volumetrica.

La metodologia adottata per la campagna diagnostica riferita al progetto di risanamento avviato nel 2022 si fonda su un approccio integrato e gerarchizzato, finalizzato a ottenere informazioni mirate per le scelte conservative senza compromettere i caratteri storico-architettonici del bene. Gli obiettivi primari hanno riguardato: la definizione delle condizioni di degrado correlate ai processi igrometrici; la tipologia e lo stato dei materiali costruttivi; le criticità di accessibilità e le implicazioni operative per il cantiere; la definizione di interventi reversibili e compatibili con i vincoli di tutela.

A valle di questa finalità sono stati combinati rilievi d'archivio e conoscitivi (analisi della documentazione progettuale preesistente), rilievo fotografico e topografico, tecniche di *imaging* e indagini di laboratorio, privilegiando metodi non distruttivi e, dove strettamente necessario, procedure minimamente invasive.

La prima fase ha previsto un'ispezione visiva sistematica finalizzata a mappare i dissesti, le aree con evidenti fenomeni di umidità e le criticità strutturali e conservative; l'ispezione è stata integrata da una campagna fotografica ad alta definizione (fotocamera digitale 64 MP, f/1,8, obiettivo 26 mm con stabilizzazione ottica) effettuata in condizioni di luce naturale e artificiale, per documentare la morfologia dei degradi e fornire una base per la fotogrammetria. Per il rilievo metrico e per l'analisi morfologica è stata inoltre utilizzata una mappatura 3D dettagliata dell'edificio, messa a disposizione dal Comune di Colobraro, che ha consentito di restituire planimetrie e sezioni aggiornate e di pianificare l'accesso nelle aree di difficile raggiungibilità.

A supporto dell'analisi visiva, è stata eseguita una

campagna termografica con una termocamera Testo 890-2 Kit (risoluzione 640×480 pixel con super risoluzione 1280×960 pixel, sensibilità termica 0,04 °C, IFOV 0,71 mrad), strumento che ha permesso di individuare disomogeneità termiche correlate a ponti termici, cavità, infiltrazioni e differenti contenuti d'umidità nelle superfici murarie, fornendo indicazioni spazialmente precise utili per dirigere i prelievi e le indagini successive [Delli Santi (2015)] (Fig. 86). L'impiego di termografia è stato orientato soprattutto alle porzioni note per fenomeni igrometrici, come rilevato nelle ispezioni preliminari [Bernardo (2024) TEMA; Caroselli (2021); Falchi (2018); Roche (2012)].

A integrazione delle indagini termografiche sono state eseguite delle prove ponderali finalizzate alla determinazione quantitativa del contenuto d'acqua nelle murature. Il campionamento è stato effettuato in occasione dell'installazione dei dispositivi CNT-Domodry (novembre 2025) e i campioni sono stati successivamente inviati al laboratorio per l'analisi. Sono stati analizzati tre campioni (S1-P, S2-P, S3-P), prelevati in muratura a profondità comprese tra 5 e 10 cm ad un'altezza dal piano di calpestio tra i 35 e i 55 cm.

Le determinazioni sono state eseguite secondo la norma UNI EN 11085:2003 "Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione del contenuto d'acqua: Metodo ponderale" [UNI EN 11085:2003]. I campioni estratti in sito sono stati messi in una provetta in vetro con chiusura ermetica e successivamente pesati in laboratorio utilizzando una bilancia con una precisione di 0,001 g. Lo stesso campione è stato essiccato a 105 °C fino a massa costante in una stufa elettrica da laboratorio, in grado di mantenere la temperatura di essiccazione con una stabilità e uniformità di ±2 °C. Prima di ogni pesatura, il campione è stato raffreddato in un essiccatore con gel di silice con indicatore (cloruro di cobalto) fino a temperatura ambiente.

Il contenuto d'acqua di ciascun campione è stato ottenuto dalla relazione "umidità [%] = W_w-D_w)/ D_w x100" (dove D_w è il peso del campione secco e W_w il peso del campione umido).

Per la caratterizzazione materica sono



Fig. 89 | Sala 1, foto del 06/06/2009



Fig. 90 | Giardino Frantoio, foto del 06/06/2009



Fig. 91 | Vista sulla scala e sul primo piano, foto del 06/06/2009



Fig. 92 | Vista sulla scalinata di accesso al primo piano, foto del 06/06/2009



Fig. 93 | Degradi Sala 1, foto del 29/06/2023



Fig. 94 | Efflorescenze saline sulla pavimentazione della Sala 1, foto del 06/06/2009

stati prelevati campioni esclusivamente da materiale già distaccato o da frammenti la cui rimozione non avrebbe alterato l'integrità dell'opera, con l'esplicito intento di mantenere il campionamento non invasivo (Fig. 87-88). I campioni sono stati analizzati in laboratorio mediante microscopio ottico ZEISS Axio Zoom V16 (luce trasmessa e riflessa; ingrandimenti da 7× a 112×; diaframma motorizzato; fotocamera 8,3 MP).

Queste analisi microscopiche hanno avuto lo scopo di sostenere le scelte sui materiali di compatibilità e sui trattamenti conservativi da adottare, oltre a comprendere eventuali problemi dovuti ai precedenti interventi.

L'approccio ha privilegiato la sequenza "dall'esterno verso l'interno": ispezione e imaging per identificare le zone critiche, termografia e rilievo 3D per definire la distribuzione spaziale dei problemi, analisi di laboratorio su campioni non invasivi per caratterizzare i materiali e validare le ipotesi diagnostiche. Tale sequenza consente di limitare i carotaggi e gli interventi invasivi riducendo il rischio di alterare il bene.

Va comunque sottolineato, in modo critico, che la diagnosi qui descritta si riferisce prevalentemente alla campagna eseguita in funzione dell'ultimo progetto di restauro ancora in corso; per gli interventi precedenti non sono disponibili informazioni sulle eventuali indagini diagnostiche condotte, il che costituisce una lacuna significativa nella ricostruzione storica delle fasi di degrado e nella valutazione della efficacia delle azioni conservative passate.

5.4.2.1 Stato di conservazione

Il quadro di conservazione del Castello dei Conti Carafa risulta eterogeneo e stratificato nel tempo: i rilievi condotti nel 2009 documentano lo stato del manufatto prima degli interventi di completamento e dei lavori successivi, mentre la campagna diagnostica del 2022 descrive lo stato attuale delle strutture a valle delle azioni eseguite tra il 2009 e le fasi successive (per le quali non sono disponibili dettagli diagnostici). È pertanto necessario leggere le evidenze diagnostiche in chiave storicizzata, distinguendo le condizioni pre-intervento da

quelle conseguenti alle opere realizzate e agli effetti indotti dalle tecniche impiegate.

Il rilievo del 2009 ha evidenziato un quadro di frammentarietà diffusa (Fig. 89-90-91): presenza estesa di piante infestanti e crolli, locali ostruiti da materiale di risulta e porzioni non accessibili (aree retrostanti il serbatoio idrico classificate).

Sul piano strutturale si registravano situazioni differenziate per singoli elementi: volte in condizioni statiche discrete nelle Sale 1, 2 e 3 e nei locali oggi destinati a servizi; condizioni mediocri per le Sale 4 e 5; parziali crolli delle coperture nel passaggio tra la scalinata esterna e il locale con la macina; volta del "giardino frantoio" e solaio ligneo dell'attuale giardino a sud crollati. Queste condizioni hanno imposto, fin dalla prima fase di intervento, misure di emergenza volte al puntellamento e al consolidamento locale prima di qualsiasi lavoro sulle superfici.

Dall'analisi conoscitiva delle strutture voltate è emerso che esse sono costituite da una struttura in accoltellato di mattoni sottili, la quale definisce il sesto della volta. Su tale struttura è stato successivamente eseguito un getto di conglomerato cementizio impiegato come rinfianco e legante strutturale.

Le strutture in elevazione si presentavano in condizioni eterogenee sia dal punto di vista costruttivo sia per quanto riguarda lo stato di degrado. Le differenze costruttive riscontrate sono state ricondotte a due fattori principali: la successione degli interventi di ampliamento e integrazione succedutisi nel corso del tempo e gli interventi di consolidamento eseguiti in passato.

Un altro elemento significativo è rappresentato dalla rampa di accesso, costituita da una cordonata delimitata ai due lati da parapetti in pietra, coronati da un corrimano in massello di arenaria di notevole spessore (40×50 cm). È stato verificato che molti dei pezzi mancanti del corrimano sono stati reimpiegati per la realizzazione di murature a secco di tompagno o di sostegno in vari punti del castello (Fig. 92).

Le campagne diagnostiche eseguite a partire dal 2022, effettuate sullo stato post-interventi, ha evidenziato uno stato di conservazione



Fig. 95 | Efflorescenze saline sui piedritti dell'arco tra le sale 4 e 5, foto del 29/06/2023



Fig. 96 | Rigonfiamento e distacco dell'intonaco nei locali adibiti a servizi igienici, foto del 15/10/2024



Fig. 97 | Esfoliazioni degli elementi lapidei, foto del 15/10/2024



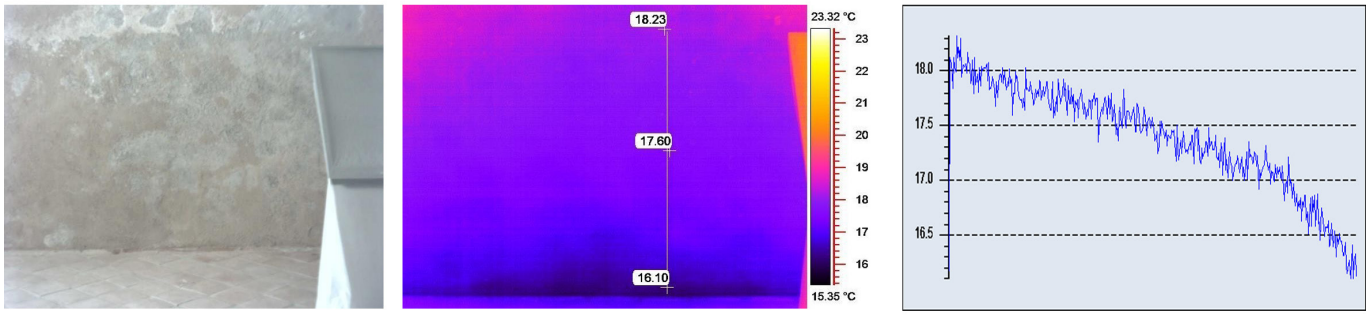
Fig. 98 | Analisi dello stato di conservazione: Sezioni A-A' e Prospetto Sud

eterogeneo e caratterizzato da un quadro patologico a prevalente origine igrometrica.

L'esame visivo e il rilievo fotografico documentano manifestazioni tipiche di murature interessate da risalita capillare: fronti di risalita con efflorescenze e sub-efflorescenze saline, rigonfiamenti e distacchi dell'intonaco, esfoliazione della pellicola pittorica, fessurazioni, alterazioni cromatiche con annerimenti e colature, oltre a fenomeni di colonizzazione biologica (Fig. 93-94-95-96-97-98).

Le alterazioni risultano maggiormente

T01 (Room 01) - 2023/06/29



T03 (Room 05) - 2023/06/29

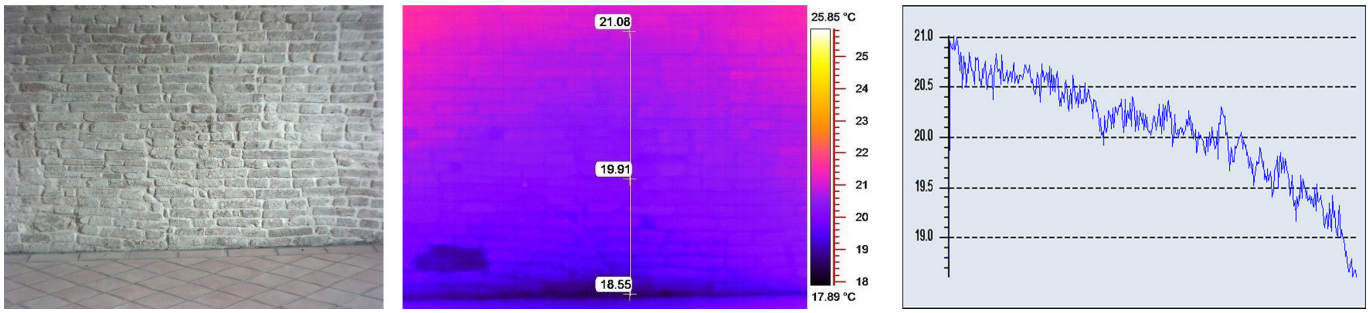
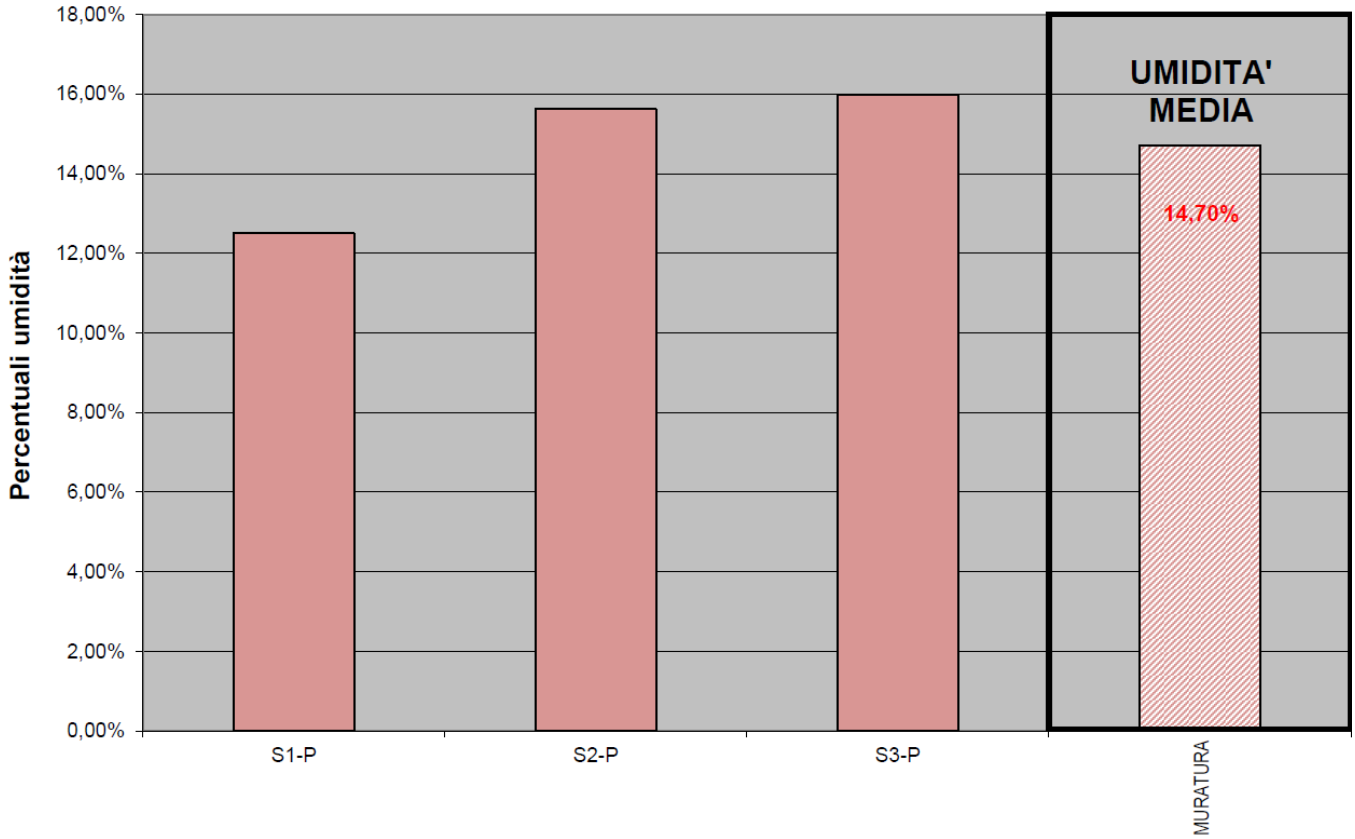


Fig. 99 | Risultati dell'indagine termografica del 2023 nelle Sale 1 e 5

Fig. 100 | Grafico dell'umidità rilevata mediante le prove ponderali eseguite sui tre campioni murari del Castello Carafa nel novembre 2025



concentrate al piano terra, con accumuli salini nelle fasce inferiori e sulla pavimentazione. Nella Sala 01 si riscontra una presenza diffusa di efflorescenze saline lungo l'intero sviluppo verticale delle murature, incluso l'intradosso della volta.

La diagnosi strumentale conferma e approfondisce il quadro emerso dalle indagini fotografiche. La termografia IR ha evidenziato discontinuità termiche e anomalie coerenti con la presenza di umidità da risalita capillare (Fig. 99): le analisi ponderali hanno fornito una quantificazione diretta del contenuto d'acqua nei campioni prelevati, con una media globale dei tre campioni pari al 14,70% di umidità (Fig. 100).

Nel dettaglio, il campione S1-P, prelevato nella sala 4 su muratura facciavista, ha evidenziato un contenuto d'acqua pari al 12,50%, mentre i campioni SP-2 ed SP-3, prelevati nella sala 1 su muratura intonacata, hanno registrato valori leggermente superiori, rispettivamente 15,62% e 15,99%.

I risultati mostrano dunque la presenza di un contenuto d'acqua significativo all'interno delle porzioni murarie indagate, coerente con le anomalie termiche precedentemente individuate.

Le analisi microscopiche sui campioni hanno confermato la presenza di sali igroscopici, elemento chiave nella genesi delle efflorescenze e sub-efflorescenze riscontrate sulle superfici (Fig. 101).

L'analisi con microscopia ottica ha consentito di caratterizzare la presenza di intonaci con aggregati di granulometria superiore a 2 mm e omogeneità compositiva scadente. Tale composizione indica l'utilizzo di malte di qualità non ottimale, con matrice poco coesa e scarsa resistenza agli stress meccanici indotti dalla cristallizzazione salina, caratteristiche che spiegano l'accentuazione dei rigonfiamenti e i distacchi dell'intonaco osservati *in situ* a distanza di pochi anni dalla messa in opera degli stessi [Dong (2021); Ergenc (2021); Valdez (2024)].

Al quadro legato alla presenza di umidità da risalita capillare si sommano fattori termo-igrometrici e d'uso che aggravano le condizioni di degrado: condizioni microclimatiche sfavorevoli, ventilazione insufficiente e impiego di finiture non traspiranti hanno favorito il degrado delle finiture e la persistenza di macchie e colature soprattutto in prossimità delle aperture e degli elementi lignei (travi, architravi). Tali fenomeni segnalano sia infiltrazioni puntiformi e difetti nei sistemi di raccolta e convogliamento delle acque meteoriche, sia possibili incompatibilità materiche dei trattamenti applicati agli elementi lignei che, a contatto con l'umidità, generano rigature e colature sulle superfici murarie adiacenti. Inoltre, interventi pregressi eseguiti con materiali e tecniche incompatibili ed inadeguati, in particolare iniezioni cementizie e la posa di bauletti in calcestruzzo sulle creste murarie, hanno altresì avuto un impatto estetico negativo sulla conservazione delle superfici a facciavista.

In termini diagnostici il quadro si configura, pertanto, come il risultato di una concausalità fra risalita capillare e presenza diffusa di sali igroscopici, inadeguate proprietà fisico-meccaniche degli intonaci e fattori esogeni legati alla gestione delle acque superficiali e a interventi non compatibili.

5.4.3 Il progetto di risanamento

Il programma di risanamento, conservazione e rifunzionalizzazione del Castello dei Conti Carafa si articola in quattro fasi distinte: tre campagne realizzate tra il 2009 e il 2019 e una quarta fase di completamento tuttora in corso.

2009: Restauro conservativo del Castello Carafa

Il primo intervento sul Castello dei Conti Carafa, avviato nel 2009 con un finanziamento di circa €800.000 (programma regionale/CIPE) e affidato a un raggruppamento guidato dallo studio "MEGARIDE Architettura & Ingegneria - Studio associato" sotto la responsabilità del RUP Geom. Antonio Rinaldi, ha assunto carattere di prima fase di messa in sicurezza e conoscenza del bene.

Gli obiettivi dichiarati erano l'acquisizione di informazioni dell'impianto edilizio in parte perduto, il consolidamento strutturale dell'edificio e la messa in sicurezza di alcuni aree per la parziale fruizione pubblica, con l'obbiettivo di ricostituire laddove possibile il funzionamento statico originale dell'impianto edilizio, eseguendo interventi integrativi allo schema statico/costruttivo originario esclusivamente laddove non risulti possibile garantir in altro modo la stabilità dell'edificato e la sicurezza dei luoghi.

L'intervento è stato pianificato come azione preliminare di un progetto più ampio e si è concentrato sull'area occidentale dello sperone, dove permanevano le strutture in elevazione più significative. L'area orientale fu lasciata a operazioni di sola pulizia e indagine conoscitiva a causa di fenomeni di subsidenza e di accessibilità limitata.

La lettura critica dell'insieme evidenzia come la priorità alla messa in sicurezza abbia spesso prevalso sull'azione preventiva sulle cause reali del degrado (regimazione delle acque, drenaggio e gestione delle infiltrazioni), con conseguenze rilevanti sulla durabilità degli interventi successivi.

La fase di liberazione e scavo è stata impostata con criteri archeologici e filologici: estirpazione della vegetazione infestante (anche mediante appositi diserbanti) e delle radici profonde, rimozione e catalogazione dei conci e dei frammenti architettonici recuperabili, e scavo di liberazione finalizzato alla ricostruzione virtuale delle fasi costruttive. Questa attività ha permesso il recupero di materiale da riutilizzare *in situ* negli interventi di restauro o negli allestimenti museali e la ricostruzione della storia costruttiva; rimane quindi fondamentale precisare che i reperti sono stati debitamente catalogati e che il materiale di riporto è stato gestito con procedure controllate per evitare perdite informative.

Fig. 101 | A) Distacco dell'intonaco nella Sala 1; B) Prelievo del campione dall'intonaco già distaccato nella Sala 1; C-D) Analisi dell'intonaco al microscopio ottico



Per la messa in sicurezza delle strutture e per ridurre il rischio di collasso durante le operazioni successive si è adottato un sistema provvisionale di puntellamento preventivo con centinature lignee sagomate sugli intradossi e gabbie di tubolari metallici ancorate su zavorre esterne per contenere maschi murari snelli soggetti alle azioni orizzontali del vento e del sisma.

Il consolidamento statico delle strutture orizzontali ha previsto il ripristino degli accoltellati in laterizio mancanti, la pulizia e la stilatura dei giunti, la rimozione del riempimento superiore incoerente o scarsamente compatto e l'esecuzione di una cappa in cls armato con rete metallica ancorata all'intradosso.

Tale intervento, anche se tende a modificare lo schema statico originario, è stato motivato dall'esigenza immediata di contrastare le spinte orizzontali delle volte, ormai prive di piedritti, e garantire la sicurezza.

Gli interventi previsti sulle murature in elevazione in pietrame hanno seguito le seguenti fasi esecutive:

- Pulitura o la scaracciatura dei giunti
- Sostituzione o integrazione delle parti mancanti o ammalorate mediante la tecnica del "cuci scuci"
- Riempimento delle cavità con iniezioni di malta di calce previa analisi delle malte originarie
- Rimozione di elementi impropri (getti di calcestruzzo, parti in lapillo o forati, ecc,) e la loro sostituzione con muratura analoga a quella preesistente.

Per le murature in laterizio sono state previste modalità analoghe, con l'integrazione di microiniezioni di resina epossidica per il trattamento di microfratture o disconnessioni locali della muratura.

La tecnica delle iniezioni è stata codificata nel progetto con prescrizioni tecniche dettagliate: perforazioni meccaniche a rotazione (diametro 20–35 mm), inserimento di tubetti di immissione e "testimoni", iniezioni a bassa pressione con controllo dei volumi e delle pressioni (0,5–1,5 atm iniziali e aumento di pressione con la quota), lavaggio delle vie di iniezione e sigillatura finale dei fori. È stato inoltre definito un numero indicativo di iniezioni per metro quadro (indicativamente 2–4 iniezioni a m^2) ma si sottolinea che l'intervallo ottimale sarà definito in opera in funzione della tessitura e della presenza di vuoti.

Le creste murarie sono state trattate con malte tixotropiche a ritiro controllato e con appositi additivi fluidificanti ed elasticizzanti per minimizzare fessurazioni che avrebbero potuto compromettere la funzione protettiva della stessa.

Infine, per alcuni cantonali sottili e alti, la cui capacità resistente alle azioni orizzontali appariva compromessa, è stata prevista la posa di chiodature armate

Le opere di sistemazione e sicurezza per la fruizione anticipano in modo selettivo alcune lavorazioni destinate a restare definitive. L'impostazione del progetto si colloca in un equilibrio complesso tra esigenze conservative, funzionali e di sicurezza pubblica, con l'obiettivo di restituire al bene una condizione di stabilità strutturale e di accessibilità controllata, mantenendo nel contempo la leggibilità storica del manufatto.

Un intervento significativo riguarda il restauro della rampa di accesso principale. La scelta progettuale è stata quella di promuoverne il recupero, la pulitura e la ricollocazione dei conci originari presenti in sito, con l'obiettivo di ricostituire quanto più fedelmente possibile la configurazione originaria della rampa, garantendo la continuità materica e formale del manufatto. Qualora non fosse stato possibile integrare l'intero elemento con materiale originale, le parti mancanti sono state previste in cemento vibrato, espressamente selezionato per rendere l'intervento riconoscibile.

Parallelamente, il progetto ha previsto una serie di misure di sicurezza volte alla protezione del monumento e dei visitatori. È stata progettata una recinzione perimetrale di carattere permanente, destinata a impedire accessi non autorizzati nelle aree non ancora accessibili, consentendo al contempo la chiusura controllata del complesso. Tale recinzione, realizzata con

elementi metallici semplici, è stata concepita come un'infrastruttura reversibile e di basso impatto visivo, coerente con il carattere di rudere del castello. Analogo approccio è stato adottato per le protezioni interne: la ringhiera di sicurezza destinata ai salti di quota è realizzata in acciaio tipo COR-TEN.

Dal punto di vista conoscitivo, il progetto prevedeva analisi di laboratorio sulle malte esistenti e indagini termografiche/soniche sui maschi spessi; resta tuttavia ambigua la misura in cui i risultati analitici abbiano effettivamente guidato le scelte di cantiere: la diffusione documentata di malte cementizie e di interventi invasivi suggerisce che, in alcuni casi, le decisioni siano state dettate da urgenze strutturali e vincoli economico-tempestivi piuttosto che da una piena integrazione delle caratterizzazioni materiche. Inoltre, non è risultata adeguatamente documentata una fase continuativa di monitoraggio post-opera (sensori igrometrici, registri operativi, misure salinometriche) che consentisse di valutare l'efficacia delle misure adottate rispetto alla risalita capillare.

2010-2016: Completamento funzionale

Il secondo intervento, avviato tra il 2010 e il 2016 e finanziato per un importo complessivo di 200.000 euro nell'ambito dell'Asse IV dei PIOT (Pacchetti Integrati di Offerta Turistica) – PO FESR Basilicata 2007/2013, rappresenta una fase di completamento funzionale mirata alla rifunzionalizzazione parziale del Castello dei Conti Carafa. L'operazione, in coerenza con le strategie regionali di valorizzazione integrata del patrimonio culturale delineate dal QSN – Priorità 5, Obiettivo IV.1, ha perseguito la finalità di rendere alcune porzioni del complesso architettonico idonee alla fruizione pubblica e a un uso culturale controllato, senza tuttavia esaurire il percorso di recupero complessivo dell'edificio.

Sul piano operativo, gli interventi si sono concentrati su alcune sale situate al piano terra (Sale 1 e 2) e al primo piano (Sale 5, 6 e terrazzo), con azioni mirate al miglioramento delle condizioni igienico-funzionali e alla riattivazione degli impianti di base. Le principali lavorazioni hanno riguardato la realizzazione degli intonaci e delle finiture interne, la posa dei nuovi impianti elettrici e idrico-fognanti, la realizzazione dei servizi igienici, la formazione dei massetti e delle pavimentazioni, e l'installazione di infissi interni ed esterni (porte e finestre) limitatamente ai vani oggetto di recupero. L'obiettivo dichiarato era quello di rendere nuovamente accessibili e utilizzabili gli ambienti principali, predisponendoli per attività espositive o culturali, senza compromettere l'autenticità materica e la leggibilità storica del manufatto.

2017: Progetto per il restauro, completamento funzionale e miglioramento della fruizione e la messa a valore del "patrimonio culturale materiale" del Castello Carafa

Nel 2014 inizia a delinearsi il quadro programmatico che rende possibile il terzo intervento sul Castello Carafa: la D.G.R. n. 1198 del 7 ottobre 2014 ("Valorizzazione, fruizione, gestione del patrimonio materiale dei beni culturali in ambito regionale - Avvio ricognizione volta alla costituzione di un Elenco di beni culturali suscettibili di interventi di 'ultimo miglio' finalizzato alla fruizione e gestione integrata pubblico-privata") e lo studio APT conseguente individuano il Castello di Colobraro tra i beni candidabili a interventi di "ultimo miglio".

Sulla base di tali indirizzi, con D.G.C. n. 13 del 23 febbraio 2016 viene approvato il progetto definitivo del "Restauro conservativo e completamento funzionale del Castello Carafa" (importo complessivo € 800.000,00) e si avvia l'iter per l'iscrizione del bene nell'Elenco Regionale dei Beni Culturali Regionali Tangibili di proprietà non statale (Determinazione Dir.le Ufficio Sistemi Culturali n. 11AC.2014/D.00513 del 13/11/2014).

Il progetto esecutivo viene quindi predisposto e affidato nel 2017 ai progettisti (Dott. Arch. Giuseppe Trabace capogruppo, Dott. Ing. Ottaviano V. De Angelis, Dott.ssa Arch. Veronica Vespe), con RUP Antonio Rinaldi; con delibera comunale n. 75 del 23/08/2017 il Comune approva la partecipazione all'Avviso Pubblico regionale (Azione 6C.6.7.1 — Asse 5, P.O. FESR Basilicata 2014–2020, "Basilicata

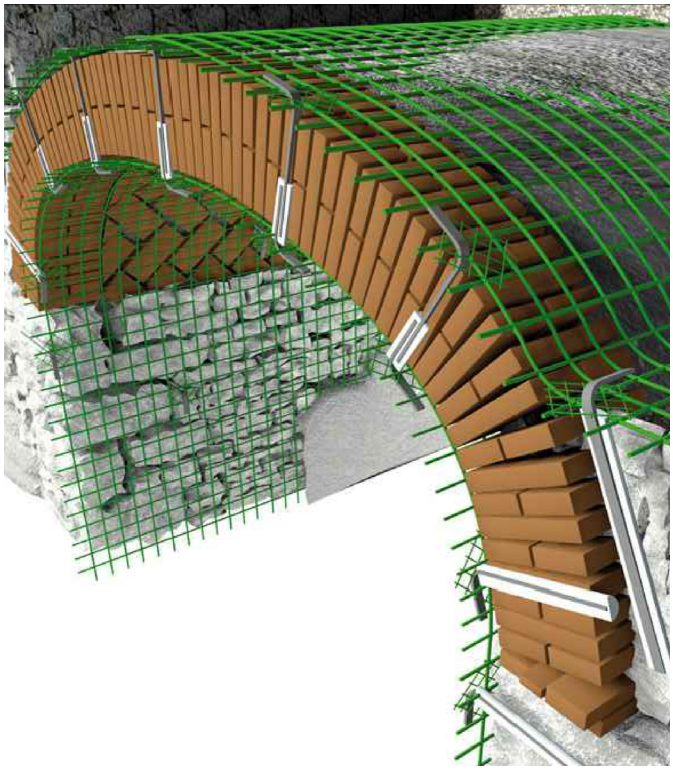


Fig. 102 | Intervento di consolidamento delle volte mediante cappa armata, dettaglio della Tav. 9 - Particolari costruttivi (Progetto definitivo del 2017)

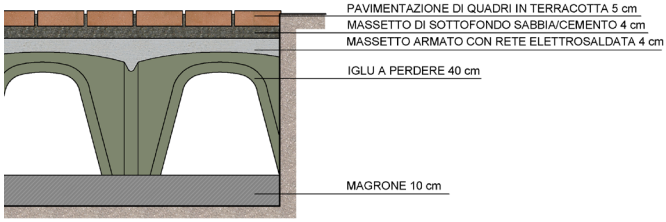


Fig. 103 | Intervento sulle chiusure orizzontali di base delle sale 4 e 5, dettaglio della Tav. 9 - Particolari costruttivi (Progetto definitivo del 2017)

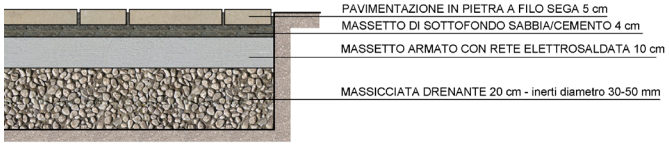


Fig. 104 | Intervento sulla pavimentazione del terrazzo nord, dettaglio della Tav. 9 - Particolari costruttivi (Progetto definitivo del 2017)

Attrattiva 2019") e affida al RUP l'incarico di attivare la redazione del progetto esecutivo (Determinazione n. 71 del 23/08/2017).

La scelta di inserire il progetto nell'Elenco Regionale dei Beni Culturali Regionali Tangibili e la connessione con azioni di marketing territoriale e reti APT costituiscono elementi rilevanti dal punto di vista strategico: essi legittimano l'investimento ma contemporaneamente impongono che le scelte tecniche siano coerenti con gli obiettivi di tutela a lungo termine.

Inscrivendosi in una più ampia strategia di valorizzazione territoriale, il progetto del 2017, oltre a migliorare l'offerta turistica, mira alla produzione di ricadute sociali ed economiche locali: rafforzamento della coesione comunitaria, incremento della ricettività e creazione di opportunità occupazionali.

Operativamente la proposta mira a trasformare il Castello Carafa da rudere consolidato in un presidio attivo di fruizione culturale in grado di ospitare esposizioni, eventi, laboratori e servizi (infopoint, book-shop, punti di ristoro, percorsi guidati) con l'obiettivo di allungare la stagionalità delle visite e stimolare flussi verso le strutture ricettive locali. Queste finalità giustificano anche la previsione di misure di governance (passaggio a forme di gestione mista pubblico-privata o indiretta) volte a garantire continuità di apertura, professionalità del servizio e programmazione in rete con altri attrattori regionali, tra i quali l'Evento "Magico e Fantastico" e iniziative APT in Valsinni, Senise, Nemoli, San Costantino.

Il progetto del 2017 prevedeva una serie di lavorazioni finalizzate al ripristino funzionale e alla fruizione pubblica del bene architettonico: ripristino delle finiture superficiali, realizzazione del nuovo impianto elettrico e dell'illuminazione, posa di massetti e pavimentazioni, restauro dei paramenti murari, installazione di cancelli, ringhiere, porte e infissi, nonché acquisizione di beni, forniture e servizi.

Dall'analisi congiunta delle relazioni tecniche e dei computi metrici emergono tre direttrici operative che hanno definito l'iter in cantiere:

- Interventi preliminari di liberazione e messa in sicurezza: pulizia da vegetazione, scavi e sbancamenti, svuotamento di locali da materiali di riporto e crollo
- Operazioni di consolidamento e integrazione delle murature: cuci-scuci, scaracciature profonde dei

giunti, iniezioni, inserimento di barre e ancoraggi

- Opere di finitura e completamento: ripristino degli intonaci, tinteggiature, posa di pavimentazioni e dotazioni impiantistiche

Prima di procedere al consolidamento strutturale dell'edificio, nei locali voltati e nelle porzioni con sopraccarichi o lesioni sono state previste centinature lignee conformate all'intradosso delle volte, mentre per il sostegno dei maschi murari isolati e snelli sono state realizzate "gabbie" di tubolari metallici con giunti meccanici ancorate su fondazioni zavorrate esterne.

Le volte e gli orizzontamenti hanno richiesto interventi di rinforzo mirati, quali: scaracciatura delle connessure, pulizia accurata di estradosso e intradosso, sigillatura e rincocciatura delle lesioni estradossali, inserimento di armature (tale procedimento ha incluso l'uso di tondini in acciaio di diametro minimo 6 mm fissati tramite perforazioni passanti e iniezione) e posa di reti elettrosaldate a supporto di cappe in calcestruzzo. Nei punti più critici è stato, altresì, previsto l'ancoraggio di controvolta in cls armato mediante ancoraggio chimico con fialoidi in vetro contenenti poliestere.

Dove le volte risultavano appesantite da materiale incoerente si è prevista la rimozione dei riempimenti pesanti e la realizzazione di rinfianchi alleggeriti («frenelli») o di interventi estradossali meno invasivi.

Sia le strutture murarie che i maschi murari isolati sono stati consolidati con operazioni di perforazione a rotazione per l'inserimento di barre ad aderenza migliorata (Diwidag, diametro foro fino a 30–35 mm).

Grande importanza è stata data al ripristino dell'integrità strutturale delle murature. Le operazioni previste e riportate nei documenti progettuali e di cantiere sono stati: scaracciatura profonda dei giunti (con martelletti demolitori per le murature in pietrame e operazioni manuali per quelle in laterizio), successiva pulizia delle superfici (con lavaggi profondi e acqua nebulizzata per i paramenti in pietrame, e spazzolatura ed eventuale soluzione acqua + acido cloridrico per i paramenti in laterizio), rabboccatura e stilatura dei giunti con malte "a lenta presa", protezione superficiale anti-sprays ed anti-manifesto idrorepellente, e ripristino degli intonaci preesistenti mediante rasatura con intonachino a base di calce, sabbia e terre naturali di spessore minimo 1,5 cm.

In questo contesto la tecnica del cuci-scuci è stata assunta come metodo operativo per le integrazioni di murature a vista: rimozione controllata degli elementi degradati, verifica del corretto alloggiamento dei nuovi conci mediante zeppe di legno, posa in opera definitiva con malte idonee e finitura dei giunti.

Per consolidare cavità e ristabilire continuità interna la documentazione prevede iniezioni controllate con malte pozzolaniche (calce idraulica + pozzolana in rapporto 1:1), eseguite "a pressione controllata fino a rifiuto", anche a più riprese. Mentre per microfratture e disgregazione degli elementi in laterizio viene prevista l'applicazione circoscritta di resine epossidiche, e laddove ritenuto necessario per particolari criticità locali si parla di iniezioni cementizie o "resine specifiche".

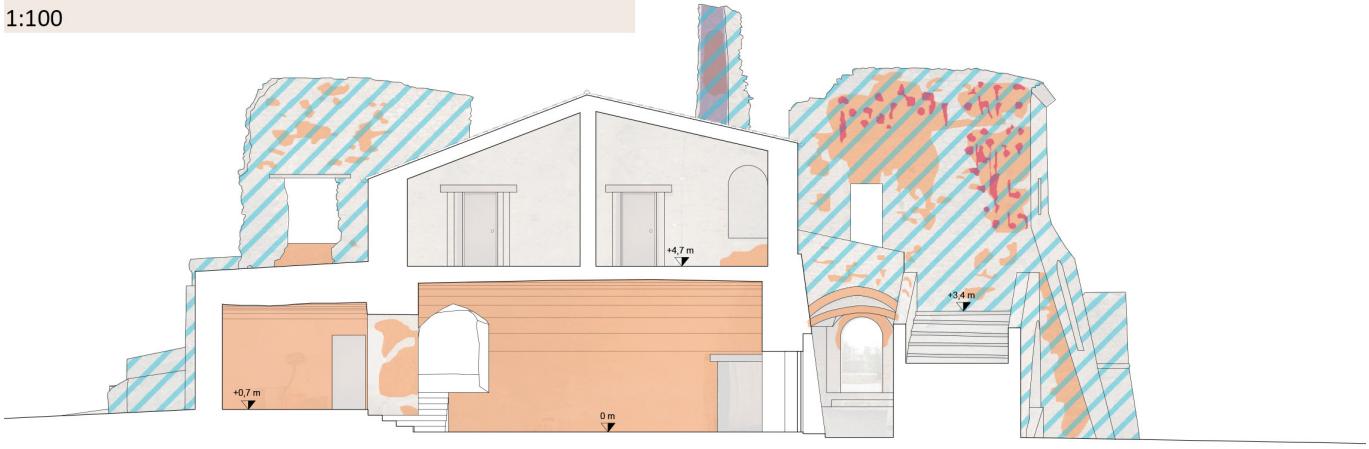
Bisogna evidenziare che se nel progetto viene posto l'accento sulla compatibilità materica mediante il riuso di conci e l'uso di malte a base di calce naturale, nel computo metrico figurano interventi da eseguire con leganti cementizi e resine epossidiche.

Per il controllo dell'umidità da risalita capillare, nelle Sale 4 e 5, è stato eseguito un vespaio aerato con casseri a perdere modulari in polipropilene rigenerato ad alta resistenza per creare un'intercapedine aerata al di sotto del piano di calpestio (Fig. 102-103). Ad integrazione di quanto ufficialmente documentato, le testimonianze orali raccolte riportano anche l'esecuzione di iniezioni chimiche contro l'umidità di risalita al di sotto del piano di calpestio degli stessi locali.

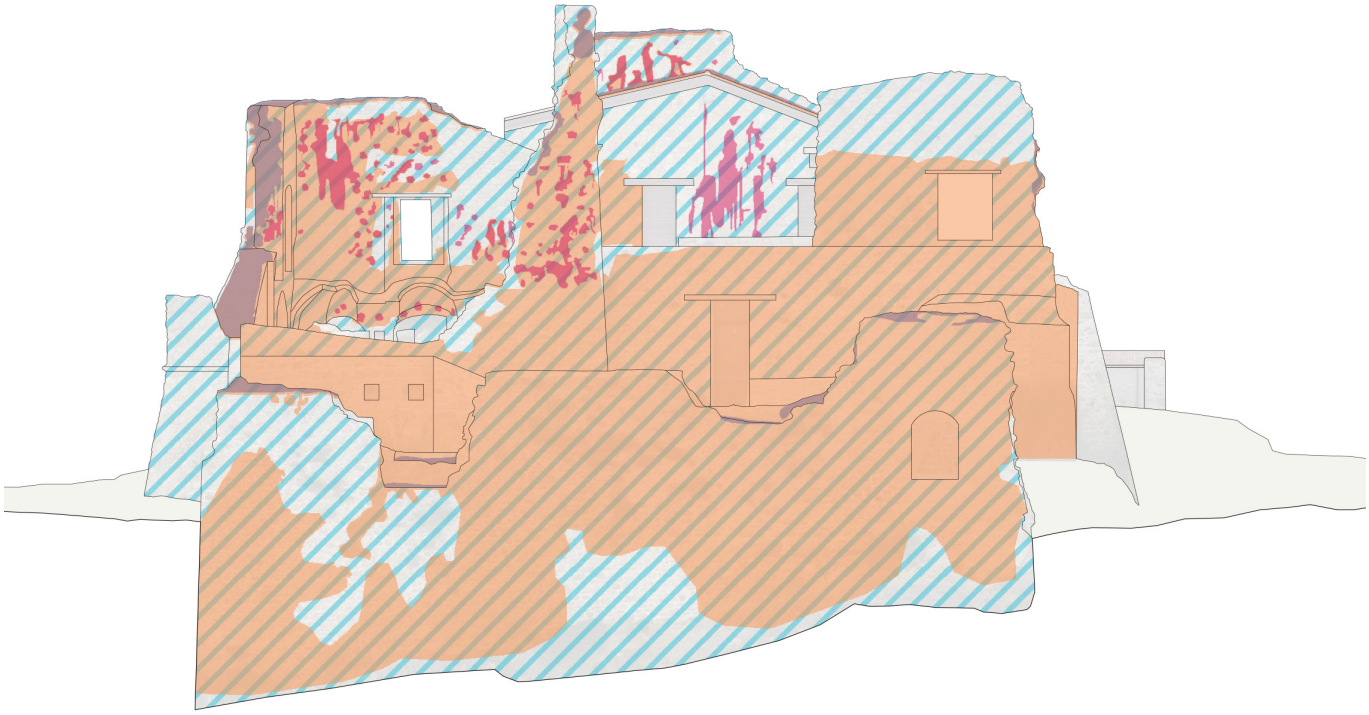
Gli elementi lignei (travi e architravi) sono stati trattati mediante applicazione di due strati di vernice monocomponente a base di resine alchidiche uretaniche in fase solvente con effetto satinato.

Per il completamento funzionale e la fruizione

SECTION A-A'
1:100



SOUTH ELEVATION
1:100



LEGEND

Cleaning (micro-sandblasting / manual cleaning / glyphosate herbicide) and refurbishment of existing plasterwork with macro-porous lime plasters

Photocatalytic water-repellent treatment

Scraping of cement drops and injections

Scraping and replacement of cocciopesto coffins

Fig. 105 | Tavola degli interventi: Sezioni A-A' e Prospetto Sud

sono stati previsti massetti di sottofondo in cls, rete elettrosaldata, e pavimentazioni in cotto locale fatto a mano (20x20–30x30 cm) posato con malta cementizia (Fig. 104).

Dopo la posa in opera, le pavimentazioni in cotto sono state lavate con acido tamponato, impregnante e applicazione a più mani di cera fino a completo assorbimento e lucidatura.

Per rendere l'edificio accessibile al pubblico sono state previste le seguenti azioni:

- Restauro della scala cordonata di accesso mediante il recupero e la ricollocazione dei conci esistenti del corrimano o, dove impossibile, attraverso l'integrazione di elementi in cemento vibrato che garantissero la distinguibilità dell'intervento
- Messa in sicurezza dei salti di quota con ringhiere in acciaio COR-TEN
- Realizzazione della recinzione di sicurezza perimetrale

2022: Riuso adattivo e adeguamento funzione, strutture e impiantistico

Con delibera della Giunta Comunale n. 134 del 15/11/2022 il Comune di Colobraro ha promosso un nuovo progetto di ampia scala per la rigenerazione del Castello Carafa, inserito nel più ampio progetto "Colobraro Sogno & Magia", affidandone la progettazione all'arch Teresa Amorosi con RUP geom. Egidio Tito. Con determina n. 155 del 18/12/2023 il Comune ha inoltre stipulato una convenzione con l'Università degli Studi della Basilicata e con il CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) per l'affidamento di consulenze tecnico-scientifiche relative al riuso adattivo e all'adeguamento funzionale del Castello Carafa.

Questa cornice istituzionale e scientifica rappresenta un punto di forza rilevante: introduce nel processo di progetto pratiche di ricerca applicata, l'uso di metodologie di monitoraggio e l'adozione di tecnologie di risanamento che possono garantire un approccio più rigoroso e tracciabile rispetto agli interventi realizzati in passato.

Le ragioni che hanno reso necessaria una nuova fase d'intervento sul Castello Carafa sono di carattere sia conservativo che funzionale. Nonostante i precedenti lavori, il manufatto mostrava diffuse situazioni di degrado, in particolare legate alla risalita capillare che si manifestano con alterazioni chimiche fisiche e biologiche che compromettono la conservazione dei materiali, la salubrità degli ambienti e la fruibilità del bene.

Partendo dall'esperienza degli interventi passati, il progetto del 2022 assume dunque un duplice impegno: risolvere alla radice le cause del degrado e restituire al Castello funzioni compatibili con un uso attivo e continuativo da parte della comunità.

Operativamente il progetto si articola su tre direttrici convergenti. La prima è costituita da azioni conservative non invasive finalizzate a interrompere i processi di degrado (in particolare l'umidità da risalita capillare) mediante sistemi di controllo e monitoraggio, materiali compatibili e tecniche innovative e reversibili. La seconda riguarda il risanamento delle superfici in modo da stabilizzare la conservazione dei paramenti murari e prevenire il ripetersi dei fenomeni di degrado. La terza linea d'azione è l'adeguamento e l'ampliamento delle dotazioni impiantistiche e tecnologiche (efficientamento energetico, sicurezza, digitalizzazione) e degli spazi, per rendere l'edificio effettivamente fruibile per attività culturali, sociali e turistiche.

Pertanto, il progetto di riuso adattivo non si limita a un restauro di emergenza, ma propone la trasformazione del Castello in un "polo integrato" dotato di laboratori creativi e spazi per eventi e servizi (accoglienza, informazione, sale per la comunità) che favoriscano co-creazione e scambio tra cittadini, istituzioni accademiche e centri di ricerca.

Questa scelta programmatica risponde a criteri di sostenibilità culturale ed economica (favorire la destagionalizzazione dei flussi turistici, valorizzare competenze locali e stimolare attività compatibili con la conservazione) ed è coerente con gli obiettivi nazionali e comunitari di rigenerazione, richiamati anche dal PNRR. Tuttavia, perché questa trasformazione produca risultati duraturi è indispensabile che alle

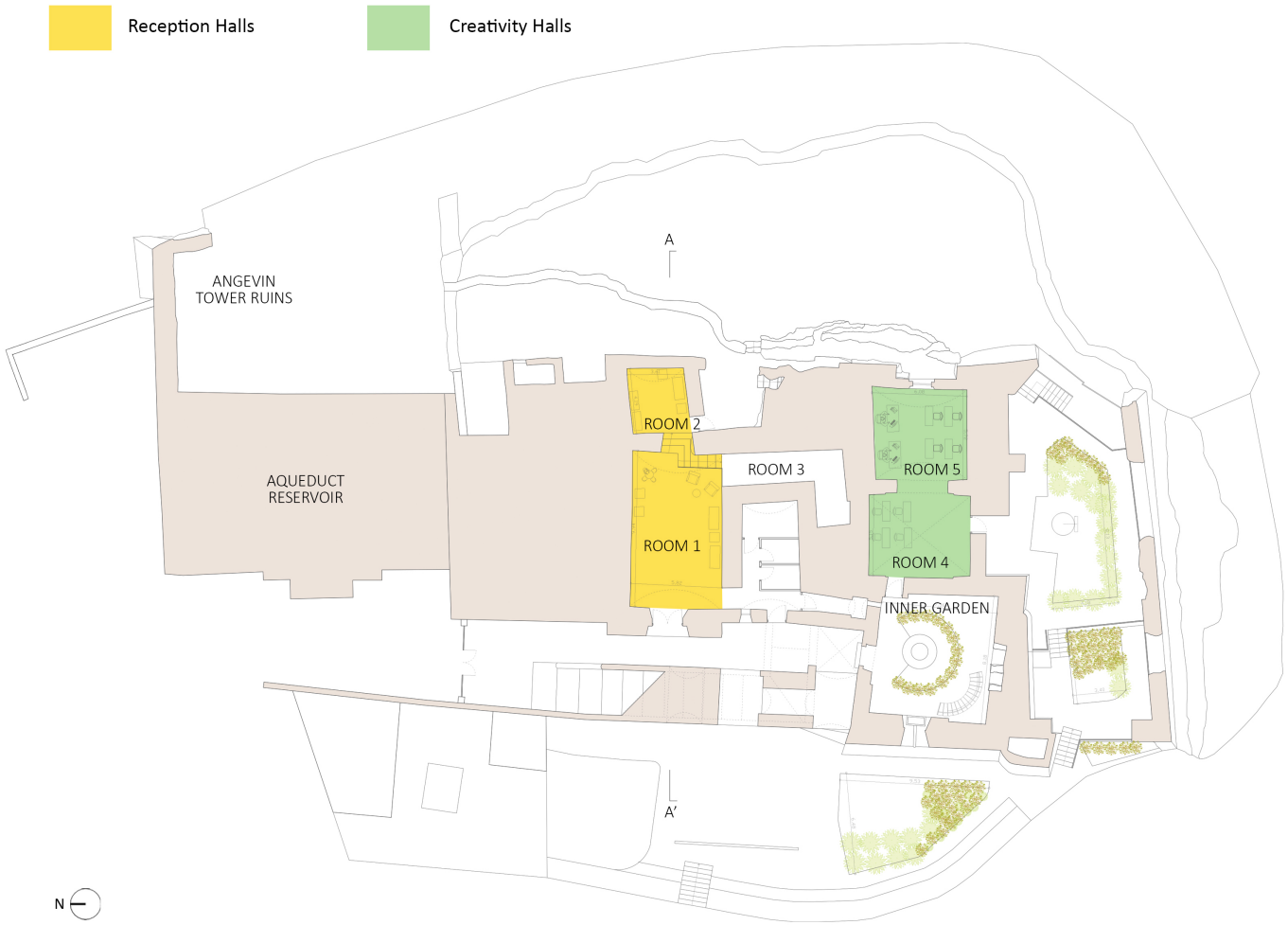


Fig. 106 | Pianta piano terra: progetto di rifunzionalizzazione degli spazi

scelte tecnologiche e funzionali corrispondano procedure rigorose di monitoraggio, protocolli per la verifica della compatibilità dei materiali e un piano di manutenzione programmata: altrimenti il rischio è che nuove funzioni vengano sovrapposte a problemi strutturali non risolti o che le soluzioni tecnologiche restino sperimentali e difficilmente manutenibili nel tempo.

Le scelte operative del progetto del 2022 richiamano esplicitamente i principi del restauro (minimo intervento, compatibilità, reversibilità e distinguibilità) e li traducono in un programma tecnico centrato su "attività conservative" delle superfici e sulle operazioni preventive necessarie a garantire la durabilità degli interventi.

Queste intenzioni metodologiche sono correttamente declinate nella documentazione progettuale: gli interventi non sono pensati come riparazioni isolate ma come un pacchetto coerente di azioni diagnostiche, di rimozione delle cause di degrado, di risanamento dei paramenti e di monitoraggio continuo dello stato di conservazione dell'edificio (Fig. 105).

Dal punto di vista operativo la linea è chiara: prima si elimina o si controlla la causa dei degradi (in particolare l'umidità da risalita capillare), poi si procede con la pulitura e il consolidamento dei paramenti e infine con la reintroduzione di finiture compatibili e traspiranti.

In coerenza con ciò il progetto prevede l'installazione, prima di qualsiasi altro intervento,

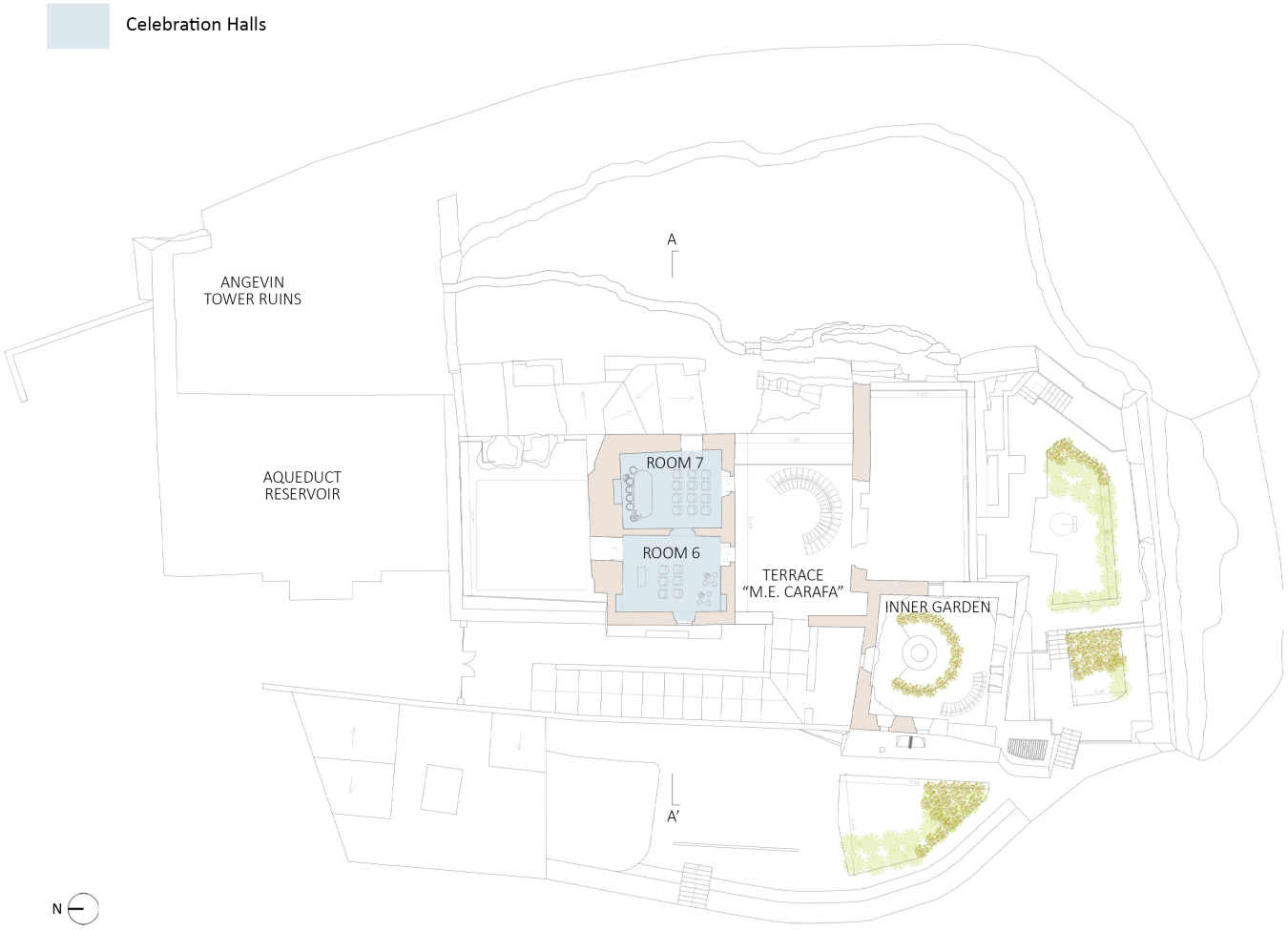


Fig. 107 | Pianta primo piano: progetto di rifunzionalizzazione degli spazi

di due dispositivi CNT-Domodry (raggio d'azione sferico di 15 m) dotati di sensori per il controllo non invasivo dell'umidità: tali sistemi sono pensati per deumidificare le murature e monitorarne il tasso di asciugatura, condizione ritenuta propedeutica e obbligatoria prima di applicare cicli di intonaco o di finitura [Bernardo (2024); Brevetto; Castelluccio (2019)].

L'adozione di questa tecnologia segna un passo avanti rispetto a interventi meramente correttivi, ma obbliga a richiedere protocolli di misura chiari (soglie di umidità accettabile, tempi di monitoraggio, criteri di intervento successivo) e a prevedere la condivisione dei dati con la Direzione Lavori e i soggetti di ricerca coinvolti.

All'interno, le murature degradate dall'umidità di risalita e dai cicli di cristallizzazione salina saranno trattate in modo sequenziale e mirato: si procederà innanzitutto allo svellimento e alla rimozione degli intonaci ammalorati e alla pulizia meccanica delle superfici mediante spazzolatura a secco, operazioni propedeutiche a qualsiasi intervento di risanamento.

Successivamente si eseguirà un "rinzaffo" a plot con malta minerale come ponte di adesione, seguito dall'applicazione di un ciclo certificato di intonaco macroporoso attivo, formulato specificamente per il risanamento delle murature degradate, con spessore complessivo indicato tra 2 e 4 cm in strati successivi; tali prodotti, selezionati per elevata permeabilità al vapore e capacità di inglobare

sali, sono necessari per stabilizzare i paramenti e consentire l'evaporazione controllata dell'umidità.

Dopo i necessari tempi di asciugatura le superfici verranno trattate con un intonachino ecologico a base di calce arricchito con nanoparticelle antismog, steso a mano con spessore di circa 0,5mm. Questa finitura, oltre a uniformare l'aspetto, è stata scelta per le sue proprietà traspiranti e per il potenziale effetto di miglioramento del microclima interno e riduzione dell'accumulo di sostanze inquinanti [Yang (2022)]. Le pareti saranno dunque rifinite con materiali ad alta traspirabilità per garantire durabilità e compatibilità igrometrica.

Per gli ambienti interni non intonacati si prevede invece:

- Pulizia con spazzolatura
- Consolidamento della stilatura dei giunti con idonei prodotti consolidanti per ambienti interni
- Trattamento idrofobizzante

Sulle superfici esterne il programma operativo prevede la rimozione preliminare della vegetazione infestante (debiotizzazione, con impiego localizzato di prodotto a base di glifosato), seguita dalla scrostatura delle colature cementizie e dalla pulitura mediante microsabbiatura; dovranno essere inoltre eliminate le barre e i ferri di armatura esposti.

Per la protezione superficiale dagli agenti atmosferici il progetto prevede l'applicazione di vernici autopulenti nanostrutturate a base di biossido di titanio (TiO2). Grazie alle sue proprietà fotocatalitiche, questo materiale non solo conferisce alle superfici trattate proprietà autopulenti e antimicrobiche, ma le rende anche superidrofile, migliorandone la resistenza agli agenti inquinanti. Inoltre, il TiO2 contribuisce a rendere l'aria più pulita riducendo la concentrazione di inquinanti come azoto, zolfo e ossidi di carbonio, e offre anche vantaggi in termini di comfort termico, favorendo il risparmio energetico nel raffreddamento degli edifici e mitigando l'effetto isola di calore urbana [Gholami (2023); Jedzejczak (2023); Meda (2022); Sandu (2021)].

Per le creste murarie ricoperte da malta cementizia, il materiale friabile verrà rimosso e poi ripristinato con cocciopesto. Infine, un piano di manutenzione preventiva e programmata accompagnerà gli interventi di restauro per garantire la protezione delle superfici e delle strutture nel tempo. Questo approccio integrato non solo preserverà la stabilità del castello, ma anche il suo valore storico e culturale, promuovendone così un utilizzo sicuro e sostenibile [Campanella (2021)].

Il progetto di rifunzionalizzazione degli spazi del Castello Carafa è un caso emblematico di trasformazione architettonica basata sui principi di resilienza e reversibilità, con particolare attenzione alla tutela del patrimonio storico e architettonico. Integrando ricerca e pratica progettuale, l'intervento non si limita alla conservazione materiale, ma promuove una riconfigurazione degli spazi che dialoghi con le dinamiche sociali, culturali ed economiche del territorio, inserendosi nelle strategie di sviluppo locale sostenibile. Pertanto si propone la realizzazione di un polo dinamico di promozione della co-creazione e sperimentazione con attività congiunte tra comune, CNT, università e comunità locali.

Sul piano metodologico il processo di progettazione valorizza i criteri della progettazione universale (*Universal Design*) ed ha integrato metodologie di *design thinking* e *systems thinking* per affrontare la complessità di un edificio storico in un contesto contemporaneo, concentrandosi sull'utente e sul suo rapporto dinamico con l'ambiente costruito [Avsec (2024); Baldassarre (2024); De Suoza (2024)]. L'impiego del *Life Cycle Thinking* ha consentito una valutazione olistica degli impatti ambientali, economici e sociali dell'intero ciclo di vita dell'edificio, supportando la scelta di materiali, tecnologie e soluzioni progettuali orientate alla sostenibilità.

La rifunzionalizzazione del castello ha previsto la suddivisione in diverse aree funzionali (Fig. 106-107). Le sale al piano terra sono state riservate all'accoglienza e all'informazione turistica, con particolare attenzione alla storia locale e alla promozione del patrimonio culturale. Le sale 1 e 2, con i loro soffitti a volta a botte, costituiranno

le "Sale dell'accoglienza" e saranno attrezzate con totem informativi e proiezioni olografiche per uno *storytelling* digitale capace di restituire la storia del castello e le sue leggende, inclusa quella del "Monachicchio".

In questo contesto, lo *storytelling* digitale si configura come uno strumento per valorizzare la memoria storica attraverso un'esperienza interattiva che coinvolge visitatori di tutte le età e abilità [Kasemsarn (2024); Rowe (2023)], in linea con i principi del design universale [Babalola (2024); Elnagar (2024); Lis (2024); Watchorn (2023)].

Nella stessa area si prevede anche un punto informativo e un bookshop dove sarà possibile acquistare materiali informativi e il tradizionale portafortuna di Colobraro, l'"abitino o *cingjok*".

Le Sale 4 e 5, con volte a crociera e a botte, sono invece concepite come "Sale della Creatività", con spazi multifunzionali per attività di *coworking*, progettazione partecipata e attività laboratoriali, dotati di arredi modulari e rimovibili (tavoli pieghevoli, sedute e pouf) che consentono rapide riconfigurazioni senza interferire con l'integrità materica degli ambienti, perseguendo così la duplice finalità di favorire l'uso continuativo del monumento e la sua cura attraverso la fruizione [Hamida (2021); Zhang (2022)].

Al primo piano, le "Sale delle Cerimonie" (sale 6 e 7) e la terrazza saranno attrezzati per celebrazioni civili, eventi ed attività comunitarie, la cui terrazza (intitolata a Michele Enrico Carafa) sarà predisposta per concerti e performance all'aperto mediante l'installazione di una copertura modulare e rimovibile. Anche in questo caso la modularità degli allestimenti e la reversibilità delle soluzioni sono principi guida, volti a preservare la leggibilità storica delle strutture e a permettere utilizza differenziati nel tempo.

Il Giardino interno ("Giardino Frantoio") e gli spazi verdi esterni del Castello Carafa costituiscono un unicum progettuale fondato sui principi della rigenerazione paesaggistica sostenibile e della reinterpretazione contemporanea dei giardini secchi giapponesi (Dry Garden/Karesansui) [Furlan (2024); Ding (2021); Cui (2024)] e coniugheranno la tutela del patrimonio storico con strategie ambientali e compositive ispirate ai paradigmi della resilienza climatica, del risparmio idrico e dell'integrazione armonica tra natura e architettura.

Nel Giardino Frantoio, la storica macina in pietra (testimonianza materiale delle antiche funzioni produttive del castello) diventa fulcro simbolico e paesaggistico dell'intervento. Essa sarà valorizzata attraverso operazioni di restauro conservativo, tra cui la pulizia e protezione delle strutture metalliche e l'installazione di un impianto di irrigazione automatizzato a basso consumo, integrato con un sistema di raccolta delle acque meteoriche. Le aiuole verranno riprogettate secondo il paradigma del Dry Garden, privilegiando essenze aromatiche e mediterranee a basso fabbisogno idrico, come melograni, lavanda e rosmarino, capaci di assicurare durabilità, profumi stagionali e un effetto cromatico coerente con il paesaggio lucano.

Gli elementi di arredo saranno pensati come parte integrante del linguaggio compositivo: una panca semicircolare su misura inviterà alla sosta e alla contemplazione, mentre una grata metallica in finitura canna di fucile chiuderà parzialmente l'apertura verso il cortile, garantendo protezione e permeabilità visiva senza compromettere l'estetica dell'insieme.

Gli spazi verdi esterni sviluppano e ampliano il medesimo impianto concettuale. Qui, l'ispirazione ai giardini giapponesi secchi viene interpretata come strumento di rigenerazione climatica e simbolica: rocce, ghiaia e vegetazione selezionata evocano paesaggi naturali astratti (ruscelli, montagne, stagni) attraverso un uso calibrato di elementi "secchi" e composizioni geometriche essenziali [Ding (2021)]. L'impiego di ghiaia bianca, oltre a costituire un richiamo estetico alla purezza e alla luce mediterranea, rappresenta una strategia di mitigazione dell'isola di calore e un dispositivo di regolazione del microclima urbano [Cui (2024)].

Il sistema vegetale privilegia specie autoctone e perenni, a manutenzione ridotta e alta capacità di adattamento climatico. Un impianto di irrigazione automatizzato, alimentato da serbatoi per la raccolta delle acque piovane,

garantirà l'efficienza idrica, mentre elementi decorativi (come una fontana in pietra) introdurranno una dimensione estetica e sensoriale coerente con la spiritualità del giardino "secco".

5.4.4 Risultati

5.4.4.2 Considerazioni finali

L'intervento sul Castello Carafa di Colobraro rappresenta un caso paradigmatico di evoluzione metodologica nella conservazione e rifunzionalizzazione del patrimonio storico, in cui si è progressivamente passati da operazioni di tipo emergenziale a un approccio integrato e sistemico basato su principi di sostenibilità, compatibilità materica e reversibilità.

Le prime campagne di intervento hanno avuto un carattere prevalentemente emergenziale e documentario, finalizzato alla stabilizzazione delle porzioni lesionate e alla messa in sicurezza dei volumi più vulnerabili. Queste operazioni hanno ridotto il rischio immediato di collasso strutturale, ma non hanno affrontato in modo organico le cause primarie del degrado, legate principalmente alla presenza di umidità di risalita, alla cristallizzazione salina e all'inefficacia dei sistemi di drenaggio.

Negli interventi del 2009, la qualità esecutiva delle lavorazioni è risultata accurata nella descrizione e nella sequenza metodologica e ha incluso pratiche tradizionali e compatibili come il cuci-scuci e il riutilizzo del materiale di recupero. Tuttavia, l'adozione diffusa di iniezioni cementizie, calcestruzzo e resine ha portato ad un consolidamento efficace nel breve termine, ma non sostenibile nel medio-lungo periodo, a causa dell'assenza di una strategia igrometrica e di monitoraggio continuo e dell'incompatibilità materica e dei danni estetici arrecati all'edificio.

Il nuovo ciclo di interventi, avviato nel 2022 e tuttora in corso, segna un passaggio cruciale verso una gestione più organica e interdisciplinare del restauro. Il progetto è supportato da accordi di collaborazione tra enti pubblici, università e centri di ricerca (CNR), che introducono pratiche di ricerca applicata, protocolli di monitoraggio strumentale e tecniche di risanamento reversibili ed innovative.

Tra gli strumenti diagnostici impiegati si segnalano indagini termografiche, rilievi 3D, analisi microscopiche e mappature dei sali, finalizzati a garantire la compatibilità dei materiali e la tracciabilità delle scelte tecniche. L'adozione di metodologie scientifiche ha elevato il livello qualitativo del processo, consentendo una conoscenza più profonda delle cause di degrado e una selezione mirata delle soluzioni conservative.

La convenzione scientifica rappresenta dunque un punto di forza sul piano metodologico e della sostenibilità territoriale, ma la sua efficacia dipende dalla capacità di tradurre la ricerca in azioni operative e meccanismi di governance chiari, con piani di trasferimento tecnico, protocolli di accettazione e un monitoraggio continuativo. Senza questa integrazione, il rischio è che l'innovazione rimanga confinata all'ambito teorico.

Dai risultati delle fasi già completate emergono priorità operative per consolidare la coerenza dell'intervento:

- eliminare o mitigare le cause primarie del degrado, in particolare quelle di natura igrometrica, mediante sistemi di drenaggio e convogliamento delle acque
- validare ogni soluzione tecnologica attraverso sperimentazioni controllate e verifiche misurabili e replicabili
- impiegare materiali compatibili e traspiranti, coerenti con la composizione chimico-fisica delle murature storiche
- istituire un piano di monitoraggio continuo, con registro digitale delle operazioni e dei risultati diagnostici
- predisporre un piano di manutenzione programmata e di governance gestionale, in grado di garantire la sostenibilità economica e tecnica del bene nel lungo periodo

Questo quadro indica un'evoluzione del progetto da un approccio reattivo e frammentato a una strategia integrata e predittiva, in linea

con i principi del *Life Cycle Thinking* (LCT) e dell'economia circolare, che mirano a prolungare la vita utile dei manufatti storici riducendo al minimo l'impatto ambientale.

Il progetto di rifunzionalizzazione del Castello Carafa ha superato la dimensione del semplice restauro, configurandosi come un modello di riuso adattivo. L'integrazione di *design thinking* e *systems thinking* ha consentito di affrontare la complessità del bene storico con un approccio olistico e multidimensionale, ponendo l'utente e la comunità al centro del processo progettuale.

La combinazione di soluzioni architettoniche reversibili, materiali sostenibili e tecnologie a basso impatto ha permesso di conciliare fruizione, tutela e innovazione, garantendo spazi flessibili, inclusivi e adattabili alle esigenze future.

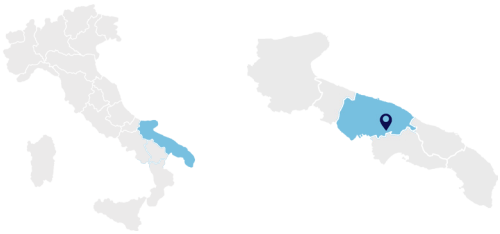
Questo metodo non si limita al caso di Colobraro: può essere replicato in altri contesti caratterizzati da criticità simili, dove gli interventi tradizionali hanno spesso generato incompatibilità materiche, carenze manutentive e perdita di identità architettonica.

Il successo del progetto dipenderà dalla trasformazione delle verifiche diagnostiche in prerequisiti operativi, dall'eliminazione sistemica delle cause di degrado e dalla documentazione continua di ogni fase attraverso protocolli scientifici. Solo in questo modo il Castello potrà diventare non solo un luogo restaurato, ma un laboratorio vivo di resilienza architettonica, un modello replicabile per la rigenerazione sostenibile del patrimonio culturale.

5.5

CHIESA DI SANTA MARIA ASSUNTA IN CIELO

5.5 Chiesa di Santa Maria Assunta in cielo



Localizzazione:	Lamadacqua, Noci, BA
Anno/Epoca di costruzione:	1961-1963
Tipologia edilizia:	Architettura religiosa
Destinazione d'uso:	Chiesa parrocchiale
Proprietà:	Parrocchia di Santa Maria della Natività (Noci, BA)
Diagnosi e monitoraggio:	Termografia IR, analisi termo-igrometriche, analisi chimiche, indagini geofischiche, carotaggi, prove sclerometriche, indagini ultrasoniche, rilievi con SAPR, Structural Health Monitoring
Tecnologia costruttiva:	Calcestruzzo armato e murature portanti in tufo di Mottola-Massafra



5.5.1 Analisi del contesto

5.5.1.1 Contesto territoriale

Il caso studio della chiesa di Santa Maria Assunta in Cielo nel Centro di Servizio di Lamadacqua, in agro di Noci (BA), si inserisce nell'ampio scenario delle politiche di riforma agraria avviate a partire dal Regio Decreto 215/1933 - "Nuove norme sulla bonifica integrale" e dalla successiva L. 841/1950 - "Norme per la espropriazione, bonifica, trasformazione ed assegnazione dei terreni ai contadini". Con questi provvedimenti prese avvio la Riforma Fondiaria di Puglia, Lucania e Molise e la redistribuzione delle terre demaniali e dei grandi latifondi a favore dei braccianti e dei piccoli coltivatori. Questa riforma non rappresentò soltanto un intervento di natura economica, ma generò profondi cambiamenti sociali e culturali nelle aree rurali del Mezzogiorno (Fig. 108), imponendo la creazione di nuovi insediamenti per ospitare i coloni e fornire loro i servizi indispensabili per una vita comunitaria organizzata. In questa prospettiva, la stabilità produttiva ed economica del territorio non poteva prescindere dalla presenza di attrezzature collettive destinate a sostenere anche lo sviluppo umano, spirituale e culturale delle nuove comunità agricole. Pertanto nacquero i Centri di Servizio [Bandini (1952); Camera dei Deputati (1946); De Leo (2012); Mecca (2012); Povellato (2012); Quartulli (2022)].

La loro collocazione veniva accuratamente scelta in relazione a criteri geo-economici e ambientali: la presenza di fonti d'acqua, l'incrocio di direttrici viarie, la giacitura del terreno e le condizioni climatiche erano tutti fattori che influenzavano la scelta del sito e l'organizzazione planimetrica dell'insediamento. I Centri si distinguevano per dimensione e dotazioni in tre categorie (CS1 piccolo, CS2 medio e CS3 grande) ciascuna caratterizzata da una specifica combinazione di edifici: scuola, chiesa, dispensario sanitario, spaccio, ambulatorio, alloggi e spazi ricreativi. La loro funzione andava ben oltre la semplice valorizzazione agricola, poiché mirava a una "bonifica umana", intesa come emancipazione culturale e sociale delle famiglie contadine.

In questo quadro si colloca il lavoro di Plinio e Paolo Marconi, progettisti del Centro Sociale di Lamadacqua e della relativa Chiesa di Santa Maria Assunta in Cielo.

La contrada di Lamadacqua (o Lama d'Acqua) trae il proprio nome dalla piccola lama che confluisce nella gravina di Castellaneta (TA). Il toponimo indica anche una specifica masseria della zona.

La toponomastica locale, con denominazioni come "Cancello del Prete" e "Cancello di Lenti", testimonia un passato agricolo e giuridico legato alle alienazioni fondiarie ottocentesche. L'area fu destinata a ospitare nuovi insediamenti rurali in seguito al diboscamento, nel XIX secolo, del Bosco di Bonelli (o Bosco delle Noci). In tale contesto, il Centro di Servizio di Lamadacqua fu realizzato a meno di un chilometro dal confine con il comune di Mottola (TA), in una posizione di cerniera tra le province di Bari e Taranto. L'insediamento rappresenta oggi una testimonianza significativa delle prime forme di organizzazione del territorio rurale pugliese in età moderna e costituisce un caso unico nel panorama del sud-est barese per le vicende progettuali e realizzative che lo caratterizzano.

La costruzione del Centro fu preceduta da una serie di atti amministrativi che ne documentano la genesi. Con delibera comunale n. 487 del 25 ottobre 1960, l'Amministrazione di Noci donò il suolo pubblico alla Sezione Speciale per la Riforma Fondiaria in Puglia, Lucania e Molise, e il mese successivo, il 18 novembre, il Servizio Lavori trasmise il progetto definitivo firmato da Plinio Marconi e dal relatore tecnico, l'ingegner Francesco Lorusso. I lavori furono affidati all'impresa Pietro Putignano, che ne prese in consegna il cantiere il 1° agosto 1961. Il complesso fu completato nel biennio 1961–1963, sulla base del progetto elaborato nel 1959, in coerenza con le direttive dell'Ente Riforma relative ai dimensionamenti e ai comprensori di riferimento.

Il Centro di Lamadacqua serviva un'area agricola comprendente circa 415 unità familiari, per una popolazione di circa 2000 abitanti, prevalentemente insediata nella porzione meridionale del territorio comunale.

Il progetto prevedeva la realizzazione di un borgo "semi-accentrato" con quattro edifici principali con funzioni distinte ed integrate (Fig. 109) [Intini (2021)]:

- Fabbricato A: spaccio, sala riunioni, due magazzini e un appartamento;
- Fabbricato B: ambulatorio medico, abitazione dell'ostetrica e quattro alloggi per gli insegnanti
- Fabbricato C: chiesa parrocchiale di Santa Maria Assunta in Cielo, canonica e ambienti di servizio (ufficio, sagrestia, sala catechismo e abitazione del parroco)
- Fabbricato D: scuola materna e elementare, dotate di refettorio, aula per attività collettive e spazi ricreativi.

L'intervento includeva inoltre opere di urbanizzazione primaria, come la sistemazione della viabilità interna, la realizzazione del verde pubblico e delle reti idrica, fognaria ed elettrica.

Dalle relazioni progettuali emergono anche i materiali costruttivi utilizzati: fondazioni in

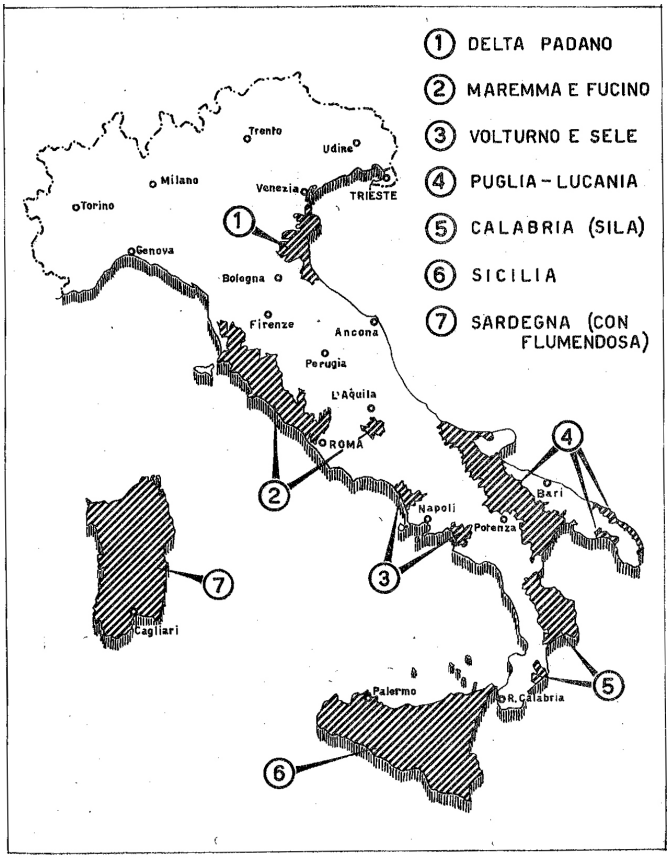
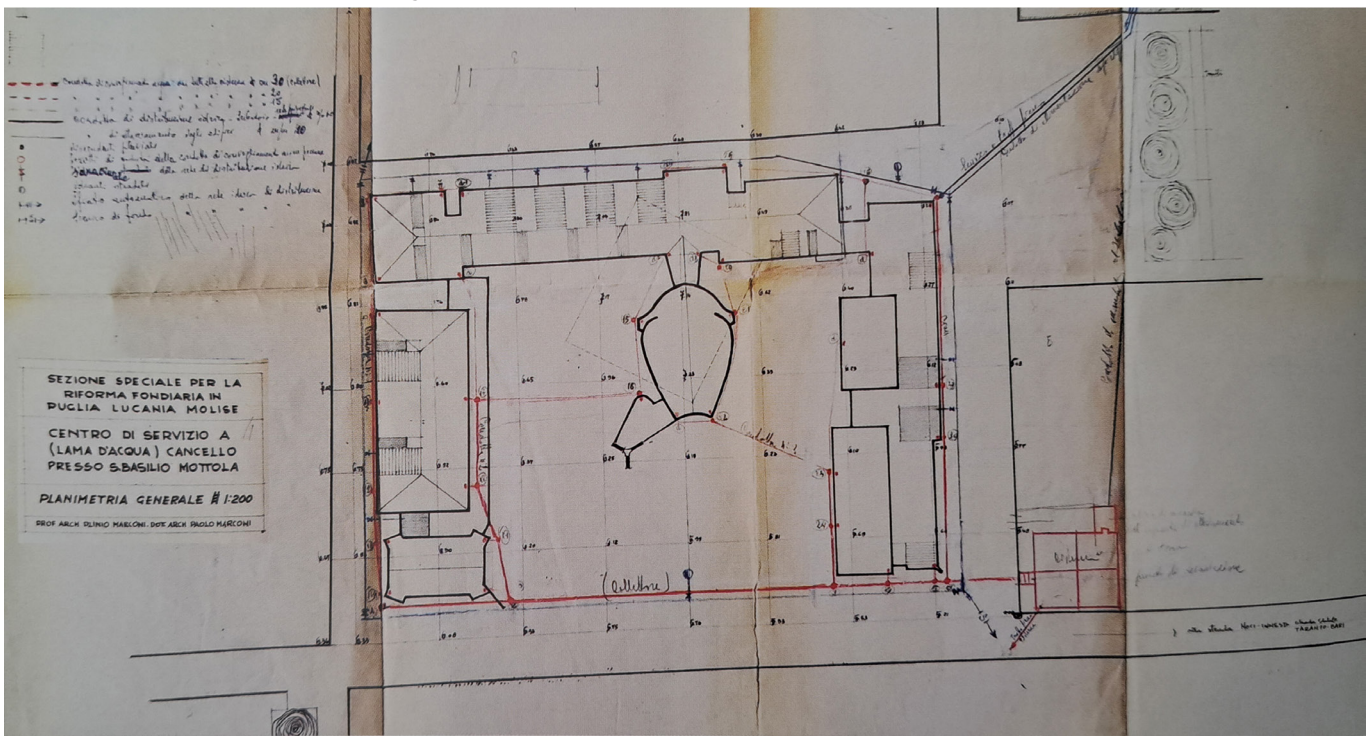


Fig. 108 | Zone di attuazione della Riforma Fondiaria [Bandini (1952)]

Fig. 109 | Centro di Servizio di Lamadacqua (Noci). Planimetria generale, scala 1:200, Plinio e Paolo Marconi, 1959-1963 (Archivio di Stato di Bari, ERSAP, Borgate, B. 67, f. 1)



conglomerato cementizio, murature in blocchi di tufo con zoccolatura in lastre di pietra calcarea, pavimentazioni in marmette, infissi in legno di abete e finiture superficiali con piastrelle o intonaco civile liscio. L'uso di materiali locali e facilmente reperibili rispondeva a esigenze economiche ma anche alla volontà di armonizzare l'opera con il paesaggio costruito circostante [Mecca (2012); Intini (2021)].

Dal punto di vista urbanistico, gli edifici sono disposti a formare un recinto aperto a "C", con la chiesa al centro, elemento ordinatore dell'intero impianto. Tale organizzazione consente di distinguere in modo netto l'area destinata ai servizi sociali e residenziali da quella educativa, più protetta e arretrata rispetto ai percorsi viari. Gli orientamenti, la distribuzione interna e l'illuminazione naturale degli ambienti furono studiati con attenzione, così come la relazione tra gli edifici e gli spazi aperti, concepiti per accogliere attività collettive e ricreative.

L'insieme testimonia un momento cruciale della storia dell'architettura rurale pugliese, in cui il linguaggio del moderno si confronta con la tradizione locale e con le istanze sociali della riforma agraria. Il Centro di Servizio di Lamadacqua rappresenta pertanto un documento di grande valore storico e architettonico, in cui la funzione religiosa e comunitaria della chiesa si intreccia con la pianificazione territoriale e con la ricerca di un'identità architettonica capace di esprimere, in forme nuove, le radici materiali e culturali del paesaggio agrario pugliese [Intini (2021)].

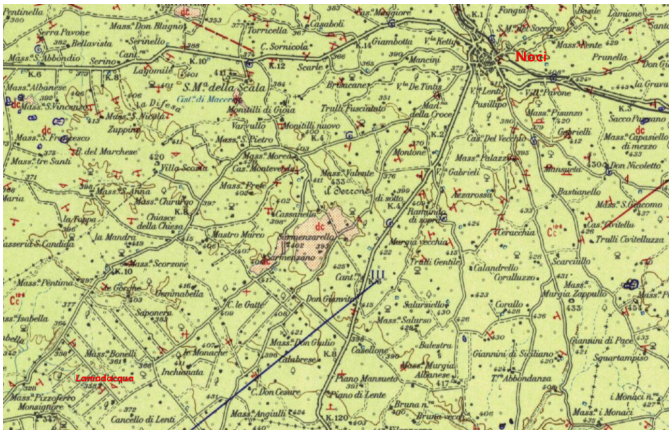


Fig. 110 | Stralcio Carta Geologica d'Italia 1:100.000, F.190-Monopoli

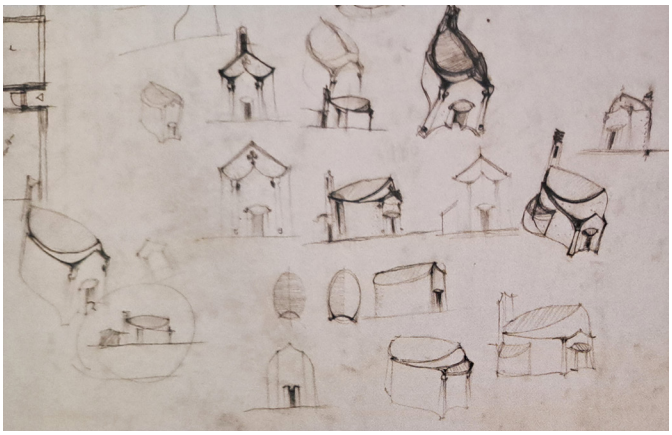


Fig. 111 | Disegni e schizzi di ipotesi preliminari della Chiesa di Santa Maria Assunta di Plinio e Paolo Marconi [Intini (2021)]

5.5.1.2 Evoluzione storica e architettonica

La chiesa di Santa Maria Assunta in Cielo si colloca su un substrato geologico dominato dal calcare di Altamura (calcari ceroidi e detritici, stratificati con abbondanti rudiste e livelli marnosi) [ISPRA-Monopoli] (Fig. 110).

Inserita all'interno del Centro di Servizio di Lamadacqua, la chiesa rappresenta un esempio significativo della ricerca progettuale condotta da Plinio e Paolo Marconi nel contesto delle politiche di riforma agraria del secondo dopoguerra.

La documentazione archivistica conservata nei Fondi Plinio e Paolo Marconi presso l'Archivio Centrale dello Stato di Roma ha permesso di ricostruire l'intero iter progettuale, dai primi schizzi concettuali fino alla realizzazione esecutiva, evidenziando la ripartizione dei compiti tra Plinio Marconi e il figlio Paolo e l'attenzione ai dettagli tecnici e architettonici. [Intini (2021)]

Fin dalle fasi iniziali il progetto assume come riferimento critico l'archetipo del trullo, ma lo rielabora radicalmente attraverso tecniche e soluzioni spaziali moderni (Fig. 111-112-113).

Il progetto, inizialmente firmato da Plinio Marconi nel 1959, vede dal 1960 il coinvolgimento del

figlio Paolo, il cui apporto emerge soprattutto nell'inserimento di caratteri barocchi, con l'uso di curve policentriche per la navata e per per gli elementi secondari (finestrelle e inserti vetrati), conferendo all'edificio sacro una spiccata identità formale.

La chiesa si innesta al centro dello schema ortogonale del centro di servizio, diventando il fulcro spaziale e simbolico dell'insediamento.

L'edificio si caratterizza per una copertura conica in calcestruzzo armato a spessore variabile, realizzata come conoide sezionato obliquamente rispetto all'asse principale, generando un'ellisse di intersezione che conferisce alla navata una pianta ovale policentrica, più adatta alle celebrazioni liturgiche (Fig. 114). Il vertice della volta si colloca direttamente sopra l'altare, punto focale della composizione, mentre due finestre verticali, invisibili dall'interno, garantiscono un'illuminazione radente che valorizza il rivestimento musivo della pala d'altare. Questa soluzione crea un crescendo spaziale ascendente, reinterpretando il linguaggio vernacolare del trullo in chiave liturgica.

Il campanile, separato ma collegato alla facciata, poggia su setti di sezione costante e presenta una cuspide centrale esagonale con tre guglie laterali disposte lungo i vertici di un triangolo. Le guglie, come braccia rivolte al cielo, allargandosi dalla cima alla base si congiungono alla centrale più alta e sfaccettata, divergendo e opponendo le facce piane, valorizzando il carattere verticale dell'insieme attraverso le potenzialità plastiche del cemento armato.

L'accesso alla chiesa è mediato da un piazzale-sagrato e da una veletta sporgente, che richiama formalmente i protiro o le caditoie delle masserie fortificate locali, anticipando l'ingresso con un piccolo atrio e un portale in legno a due ante con vetrate ovoidali.

All'interno, l'aula liturgica rispecchia la corrispondenza tra forma esterna e spazio interno (Fig. 115-116). Le pareti curvilinee accolgono il fedele in un abbraccio visivo e funzionale, guidando lo sguardo verso l'altare e il vertice della copertura conica. L'altare, inizialmente previsto in marmi rosa e nero in

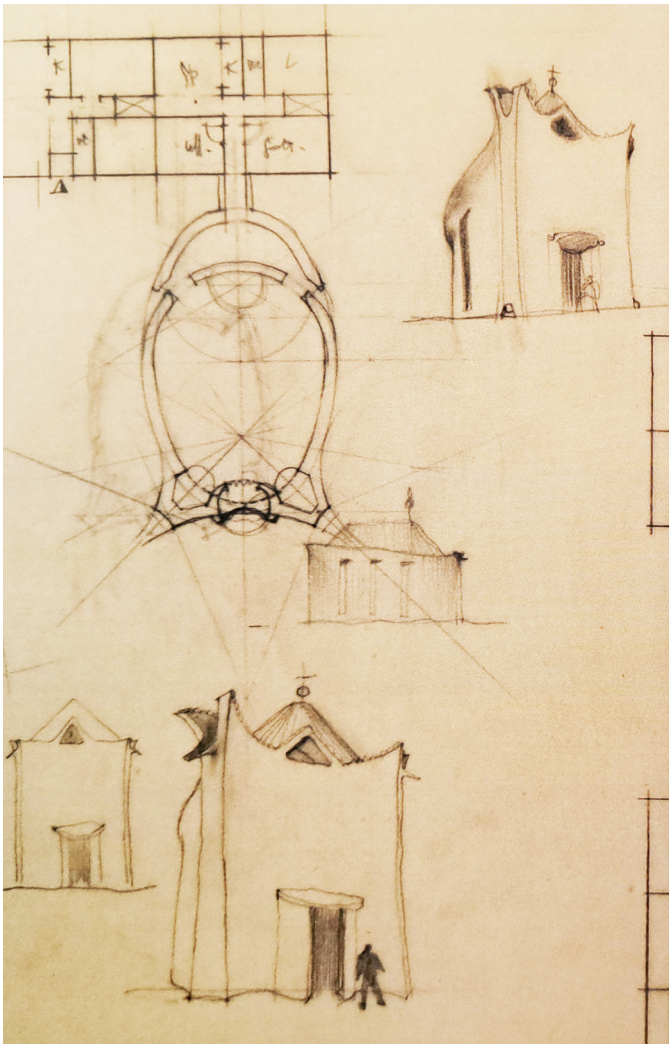


Fig. 112 | Disegni e schizzi di ipotesi preliminari della Chiesa di Santa Maria Assunta di Plinio e Paolo Marconi [Intini (2021)]

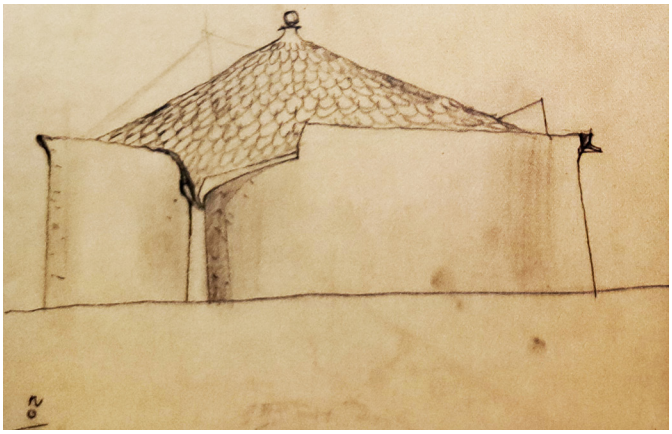


Fig. 113 | Disegni e schizzi di ipotesi preliminari della Chiesadi Santa Maria Assunta di Plinio e Paolo Marconi [Intini (2021)]

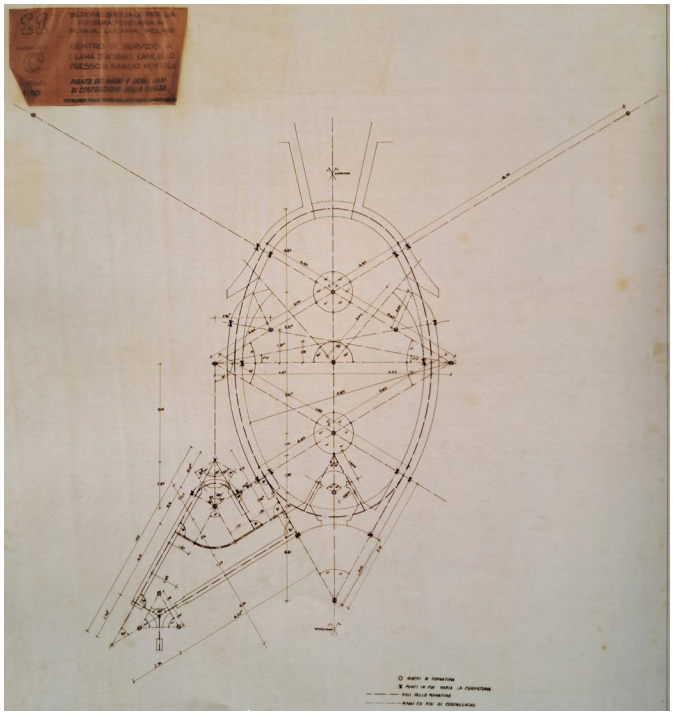


Fig. 114 | Pianta delle linee di costruzione della Chiesa di Santa Maria Assunta di Plinio e Paolo Marconi [Intini (2021)]



Fig. 115 | Interno della Chiesa di Santa Maria Assunta in Cielo: Vista verso l'ingresso (27-10-2022)



Fig. 116 | Interno della Chiesa di Santa Maria Assunta in Cielo: Vista verso l'altare (27-10-2022)

riferimento ai commessi marmorei barocchi, viene realizzato in cemento e graniglia per ragioni economiche e pratiche, mantenendo tuttavia la cromia originaria.

Gli stessi materiali definiscono pavimenti e stipiti dell'intero complesso, con unici elementi in marmo rappresentati dai pilastrini sagomati che racchiudono il tabernacolo. I pannelli murali a protezione delle superfici basse, non previsti in progetto ma presenti al completamento dei lavori, hanno spessore di circa 6 cm, divisi in due strati: quello nobile a vista e un sottostrato per il fissaggio, con altezza di 150 cm e larghezza di 30 cm.

Il battistero, collocato sotto il campanile, sfrutta un doppio gioco di curve per creare uno spazio protetto, mentre il pavimento, originariamente pensato in mattoni esagonali bianchi e sauro, viene sostituito da graniglie tricolore a effetto romboidale. Il predominante bianco delle superfici interne dilata lo spazio, bilanciato dalla parete di fondo grigio-cerulea e dalla pavimentazione decorata a losanghe. Le cromie bianco-nero-rosa valorizzano l'aula e dialogano con gli altri materiali compositi.

Dal punto di vista strutturale, l'edificio si compone di un involucro portante in muratura di conci di tufo calcarenitico a doppio paramento, con spessore medio di circa 75 cm. La copertura è in latero-cemento a doppio puntone, con travetti incastrati nella trave anulare e nel "cavalletto" centrale. A partire dalla trave di bordo si eleva il frontone rastremato in cemento armato, mentre la veletta a sbalzo sul portale è incastrata nell'architrave. Il campanile poggia su una pianta a Y, con quattro guglie, mentre la connessione tra murature e fondazioni è assicurata da travi di dimensioni maggiori direttamente posate sulla roccia.

La costruzione fu affidata all'impresa Putignano e realizzata tra il 1961 e il 1963, secondo il seguente cronoprogramma: affidamento dei lavori e realizzazione delle fondazioni nel 1961; benedizione della prima pietra il 13 febbraio 1962; scavo della fondazione del campanile il 18 aprile 1962; realizzazione della copertura tipo Alajmo (Fig. 117) e intonacature nel settembre-ottobre 1962; costruzione dei gradini dell'altare nell'ottobre 1962; ultimo giorno sul giornale

dei lavori il 19 aprile 1963; inaugurazione e consacrazione l'8 settembre 1963 da parte del vescovo di Conversano, monsignor Gregorio Falconieri.

Negli anni successivi l'edificio ha subito interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria a causa di degrado precoce, umidità e infiltrazioni.

La parrocchia subisce un declassamento a rettoria nel 1986, segnando l'inizio del declino del Centro di Servizi e nel 2004 la gestione del borgo passa alla Regione e nel 2014, su impulso della stessa Diocesi, vengono avviati gli studi per la conoscenza della storia e delle caratteristiche materiche e architettoniche della chiesa e, parallelamente, avviata la ricerca dei finanziamenti utili al restauro. Grazie a questi studi, il 14 ottobre 2015, è stata avanzata la segnalazione per l'interesse culturale alla Soprintendenza di Belle Arti, Archeologia e Paesaggio della Città Metropolitana di Bari. [Intini (2021)]

Primo e unico parroco fino al 2022 è stato don Pasquale Angelo Tinelli, che si è occupato della regolare celebrazione dei sacramenti e della manutenzione ordinaria dell'edificio.

Con il passaggio della cura pastorale all'arciprete-parroco della Chiesa Madre di Noci, la chiesa venne cautelativamente chiusa al culto a causa dell'importante stato di degrado, fino alla riapertura conseguente all'ultimo restauro nel 2018.


S. p. A. Ing. ALAJMO & C.
MILANO (109)
PIAZZA DUOMO, 19 - TELEF. 87.43.19

SICUREZZA: due sistemi frenanti: — entrambi efficienti, ma indipendenti tra loro.

SICUREZZA: due sistemi impermeabili: — entrambi efficienti, ma indipendenti tra loro.

Questo è il Brevetto 418-1780 della

TERRAZZA 900 ALAJMO

due sistemi impermeabili: entrambi, efficienti, ma indipendenti fra loro.

PRIMO SISTEMA IMPERMEABILE

SECONDO SISTEMA IMPERMEABILE

Fig. 117 | Volantino pubblicitario "Questo è il brevetto 418-1780 della Terrazza Alajmo S.A. Ing. Alajmo & C. Milano"

5.5.2 Diagnosi preliminare

5.5.2.1 Metodologia diagnostica

La campagna diagnostica che ha preceduto l'intervento di restauro conclusosi nel 2018 è stata l'unica di cui si disponga documentazione organica: non risultano infatti notizie di indagini diagnostiche eseguite in occasione dei precedenti interventi.

La strategia adottata in occasione degli ultimi interventi di restauro, ampiamente documentata nel testo degli arch. Intini [Intini (2021)], ha privilegiato una progressione logica delle informazioni di carattere generale e storico-archivistico verso indagini sempre più puntuali e strumentali, con l'obiettivo di ridurre l'incertezza progettuale e di definire interventi mirati e duraturi.

La prima fase ha riguardato la ricognizione archivistica e storica. La documentazione progettuale storica è stata acquisita e confrontata con lo stato di fatto in cantiere, permettendo di conoscere le soluzioni previste originariamente e le varianti esecutive introdotte in corso d'opera. Questo lavoro preliminare è stato fondamentale per orientare le successive indagini in modo selettivo, evitando scavi e carotaggi inutili e valorizzando le informazioni già disponibili.

A corollario della lettura d'archivio si è realizzato il rilievo dell'edificio mediante un approccio integrato digitale-tradizionale. Le riprese aeree con SAPR, curate dai geologi Serena De Venere e Massimiliano Colucci (coadiuvati dal

geologo Francesco Bianco per la campagna geognostica), hanno fornito la nuvola di punti dalla quale è stato ricavato un rilievo geometrico accurato della complessa volta conica ad asse decentrato e delle murature perimetrali a doppia curvatura.

Il rilievo fotogrammetrico, eseguito su un piano di volo impostato a griglia con assi paralleli, è stato poi processato con software specifici per ottenere fotopiani ortogonali e la planimetria dell'edificio; la scala e l'affidabilità metrico-cartografiche sono state garantite tramite una rete di punti di controllo preventivamente misurati. Il rilievo digitale è stato quindi integrato con misurazioni tradizionali in sito e con una catalogazione puntuale dei materiali costitutivi; le ortofoto derivate hanno infine

Fig. 118 | Riprese aeree SARS del 2015 [Intini (2021)]



Fig. 119 | Stato di conservazione della Chiesa di Lamadacqua nel 2011 [Intini (2021)]



permesso di mappare con precisione geometrie e l'estensione dei fenomeni di degrado visibili in superficie, fornendo la prima, indispensabile base per la programmazione delle prove (Fig. 118-119).

Per comprendere le caratteristiche del sottosuolo e le condizioni del piano di fondazione è stata condotta una campagna geofisica con:

- Prospezione sismica a rifrazione per la definizione del modello sismo-stratigrafico e dei parametri elasto-meccanici dei terreni;
- Prospezione sismica M.A.S.W. (Microtremor/analisi multi-canale) per la caratterizzazione sismica e l'attribuzione della categoria di sottosuolo ai sensi della normativa in vigore
- Prospezione geoelettrica multielettrodo finalizzata a individuare eventuali manufatti o cavità e a verificare lo stato di imbibizione dei terreni

Queste indagini, condotte in conformità al quadro normativo (D.M. 14 gennaio 2008 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni", Circolare applicativa del 2 febbraio n. 617, prescrizioni A.G.I. 1997, O.P.C.M. 3274/03 e successive modifiche, D.G.R. 153/04, O.P.C.M. 3519/06) e secondo le direttive del Piano dell'Autorità di Bacino della Puglia, del P.P.T.R., del P.T.A. e dell'Ufficio Parchi e Riserve, ha fornito dati essenziali per valutare eventuali criticità geotecniche e idrogeologiche e per calibrare le scelte progettuali delle fondazioni e delle opere di consolidamento.

Sulle murature e sulle strutture in calcestruzzo sono state eseguite prove non distruttive e indagini diretto-indirette, integrate con carotaggi a secco.

I carotaggi sono stati eseguiti con trapano carotatore elettrico a mano modello DBM 130 (Makita) e corona diamantata di diametro 51 mm, per verificare la tessitura muraria interna e la natura del nucleo tra i paramenti e per accertare lo stato del calcestruzzo di fondazione e del basamento del campanile.

Le prove non distruttive hanno compreso test

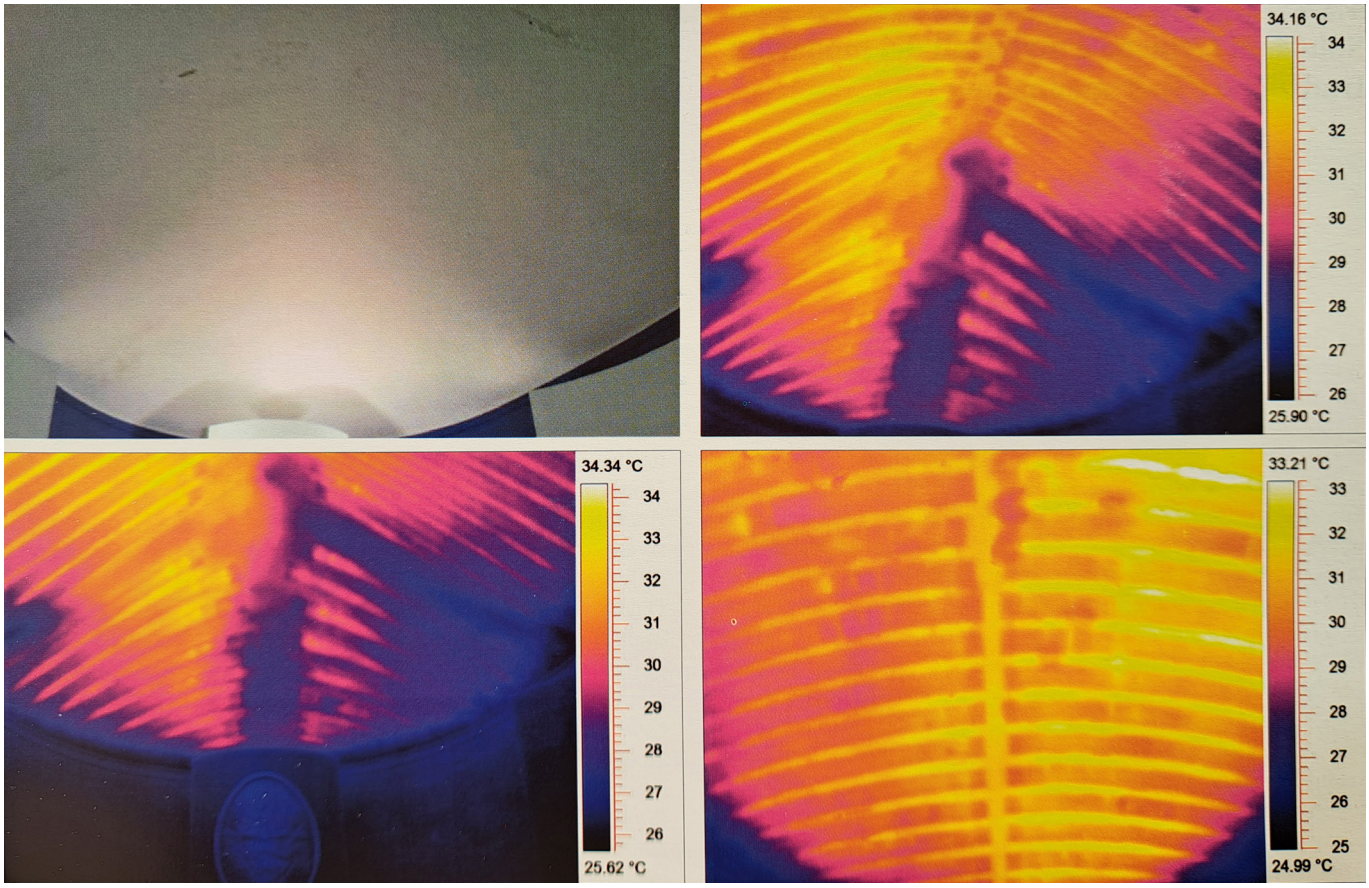


Fig. 120 | Campagna termografica condotta nel 2016 sull'intradosso della cupola su base ellittica [Intini (2021)]

sclerometrici (sclerometro meccanico a molla del tipo Schmidt) e indagini ultrasoniche con apparecchio digitale a valutazione del tempo di volo; l'approccio integrato ha previsto, per ciascuna stazione di misura, la determinazione di nove valori dell'indice di rimbalzo e percorsi di propagazione delle onde elastiche studiati appositamente, utilizzando metodi di trasmissione diretta, semidiretta e indiretta per la misura dei tempi di propagazione ultrasonori. Questa combinazione di metodi è stata adottata per ottenere stime più robuste delle caratteristiche meccaniche e per ridurre le incertezze tipiche dell'impiego isolato di una sola tecnica.

La termografia infrarossi è stata impiegata come strumento di dettaglio per la caratterizzazione dell'orditura della cupola su base ellittica e per la verifica della presenza di umidità nelle murature.

Le riprese infrarosse hanno consentito l'individuazione della trama di travetti e pignatte poggianti sul cordolo anulare e la presenza della trave di spina centrale definita "cavalletto", permettendo di riconoscere la tipologia costruttiva del solaio curvilineo e di delimitare le superfici interessate dall'umidità di risalita (Fig. 120). Le informazioni termografiche, opportunamente confrontate con le ortofoto e con i dati geofisici, hanno fornito un quadro coerente della distribuzione delle discontinuità e dei punti critici da sottoporre a indagine diretta.

Data la precarietà di alcuni elementi sottili e la rilevante presenza di calcestruzzo armato degradato (campanile, veletta sul portale, frontone), si è inoltre implementata una campagna di *Structural Health Monitoring* finalizzata all'identificazione dinamica: tramite stazioni accelerometriche posizionate secondo un progetto analitico sono state registrate

Fig. 121 | Stato di degrado degli elementi in calcestruzzo armato tra il 2014 e il 2017 [Intini (2021)]



Fig. 122 | Stato di degrado degli elementi in calcestruzzo armato tra il 2014 e il 2017 [Intini (2021)]



le risposte dinamiche del campanile in fase pre-intervento e post-intervento. Questo monitoraggio dinamico, condotto nell'ambito di una collaborazione tra il Laboratorio di Costruzioni in zona sismica del Politecnico di Bari (prof.ssa Dora Foti e prof.ssa Mariella Diaferio) e il prof. Salvador Ivorra Chorro dell'Università di Alicante, ha permesso di valutare la vulnerabilità degli elementi verticali sottili e di calibrare gli interventi di rinforzo in funzione delle frequenze proprie e dei modi di vibrare registrati.

5.5.2.1 Stato di conservazione

Gli esiti della campagna diagnostica preliminare all'ultimo restauro consentono di leggere lo stato di conservazione della chiesa di Santa Maria Assunta in Cielo come il risultato della combinazione di due fattori fondamentali [Intini (2021)]:

- Carenze esecutive e qualitative dei materiali da costruzione
- Vulnerabilità igrometrica delle murature in calcarenite, aggravata dall'applicazione di rivestimenti non compatibili

Le fonti d'archivio e i rilievi in situ convergono nel documentare difetti e criticità già presenti in fase di cantiere, tra cui la scarsa esperienza delle maestranze nella lavorazione del calcestruzzo, un controllo non sempre adeguato della granulometria degli inerti, l'insufficiente quantità e distribuzione delle armature e le criticità nelle connessioni tra il basamento e le guglie del campanile, elementi che le prove dirette (carotaggi, prove sclerometriche, indagini ultrasoniche) hanno confermato.

Lo stato di conservazione delle strutture in calcestruzzo è stato, altresì, aggravato dall'assenza e/o dal ridotto spessore del copriferro, spesso sostituito da un semplice strato di intonaco cementizio che ha favorito l'ossidazione dei ferri d'armatura con conseguente disgregazione e distacco del copriferro e peggioramento del quadro fessurativo (Fig. 121-122).

La vulnerabilità delle murature portanti è

in larga misura connessa alla sostituzione del calcare compatto previsto in progetto con "tufo Cozzigno" (presente nelle cave di Canosa) o con calcareniti similari a quelle provenienti dalle cave di Mottola-Massafra: tali materiali più polverulenti e porosi, hanno reso i paramenti murari particolarmente vulnerabili alla risalita capillare. Questa predisposizione è stata poi aggravata dall'applicazione, tra gli anni Settanta e Ottanta, di rivestimenti cementizi non traspiranti in luogo degli originari intonaci a base di calce naturale, con l'effetto di intrappolare umidità nel supporto murario e compromettere ulteriormente il naturale equilibrio igrometrico dell'involucro.

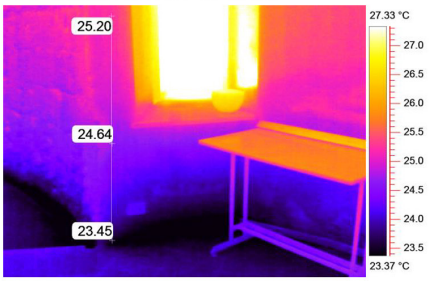
Le indagini geofisiche e geoelettriche hanno fornito un quadro coerente con le evidenze materiche, confermando la presenza, fino a circa -2m, di uno strato a bassa resistività (15–90 Ω·m) riconducibile a terreni limo-sabbiosi umidi. Sotto questo strato è stato rilevato un

Fig. 123 | Risultati delle indagini termografiche del 2017 e 2019

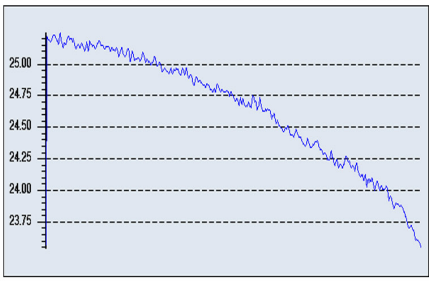
T04 - Foto (07-06-2017) - Installazione



T04 - Installazione (07-06-2017)



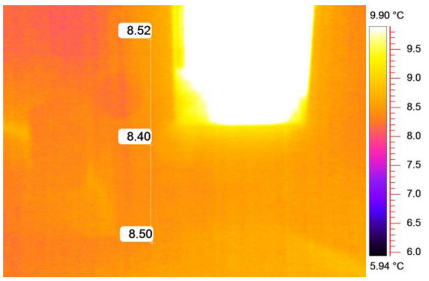
T04 - Profilo Termico - Installazione (07-06-2017)



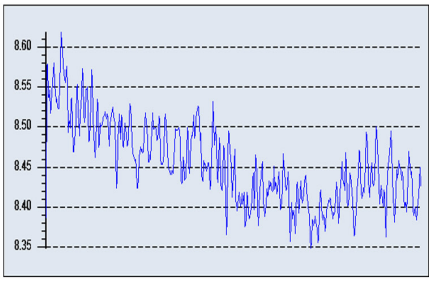
T04 - Foto (25-03-19) - Verifica Finale



T04 - Verifica Finale (25-03-19)



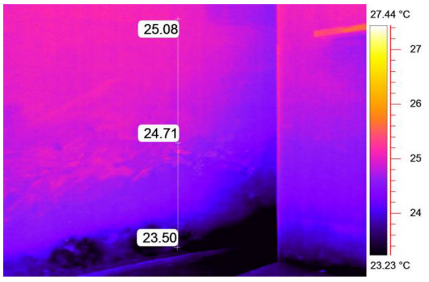
T04 - Profilo Termico - Verifica Finale (25-03-19)



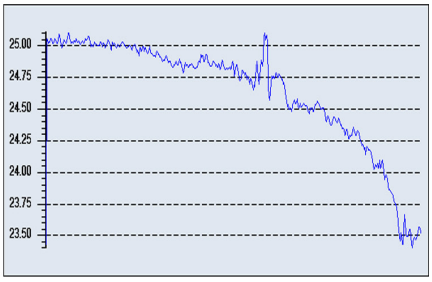
T06 - Foto (07-06-2017) - Installazione



T06 - Installazione (07-06-2017)



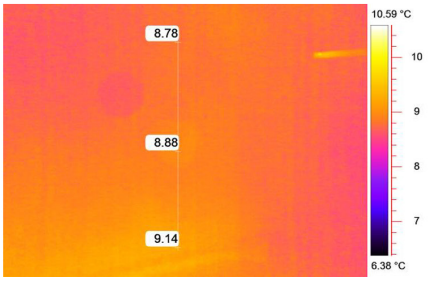
T06 - Profilo Termico - Installazione (07-06-2017)



T06 - Foto (25-03-19) - Verifica Finale



T06 - Verifica Finale (25-03-19)



T06 - Profilo Termico - Verifica Finale (25-03-19)

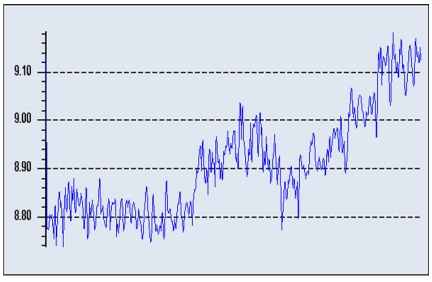


Fig. 124 | Stato di degrado delle superfici interne nel 2014 [Intini (2021)]



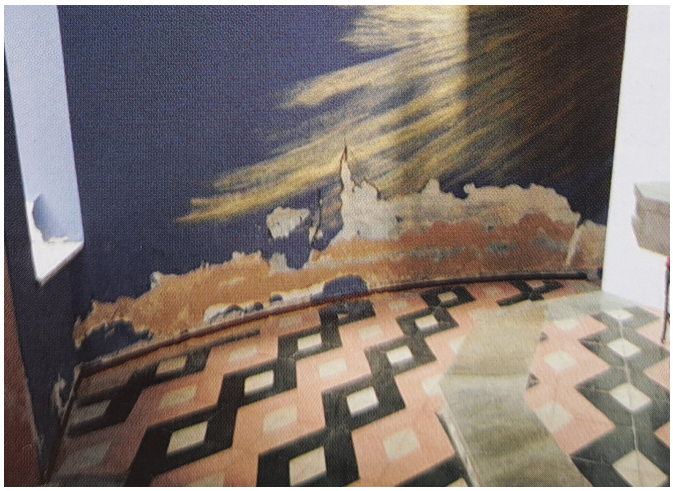


Fig. 125 | Stato di degrado delle superfici interne nel 2014 [Intini (2021)]

Fig. 126 | Stato di degrado delle superfici esterne nel 2014 [Intini (2021)]



livello di resistività più elevato (150–500 Ω·m) interpretato come calcare fratturato sino a circa -5,5 m. L'analisi sismica ha poi distinto tre sismostrati (A: limo-sabbioso fino ≈ -2,7 m; B: calcari molto fratturati fino ≈ -9,4 m; C: calcari più compatti fino ≈ -17 m).

Pur non emergendo fenomeni di risalita di falda (pieziometrie regionali intorno a 70 m s.l.m., sito a ≈ 360 m s.l.m.), la presenza di riporto superficiale umido e di calcareniti tenere giustifica la persistenza di fenomeni capillari che i rilievi termografici e le misurazioni d'umidità in situ hanno confermato (Fig. 123).

I riscontri visivi e strumentali documentano patologie diffuse e coerenti con le problematiche sopra indicate: esfoliazioni delle pellicole pittoriche al quarzo, efflorescenze saline su rivestimenti e pavimentazione, patine biologiche, colature, rigonfiamenti e distacchi degli intonaci, erosione dei pannelli in graniglia (Fig. 124-125-126).

All'interno i carotaggi hanno confermato la struttura a doppio paramento della muratura, con spessore della curvatura dell'aula di ≈ 0,70 m. Le carote estratte si sono presentate in parte non integre e molto friabili, indizio di perdita di coesione della calcarenite.

Le analisi chimiche sui rivestimenti in conglomerato cementizio granigliato hanno permesso di identificare inerti di marmo Rosso Verona (tonalità rosa), informazione che ha orientato le scelte conservative per le integrazioni delle lastre erose durante il restauro.

5.5.3 Il progetto di risanamento

La storia degli interventi di manutenzione e risanamento della chiesa di Santa Maria Assunta in Cielo fornisce la cornice entro cui si è impostato il progetto di restauro concluso nel 2018.

Già nel 1967 l'Ente Riforma aveva avviato interventi di manutenzione definiti come "lavori di risanamento alla chiesa e canonica di Lama d'Acqua in agro di S. Basilio-Mottola". Tuttavia,

tali interventi non risolsero i problemi strutturali e igrometrici che continuarono a manifestarsi nei decessi successivi.

Nel 1970 il parroco don Pasquale Tinelli segnala esplicitamente che i restauri eseguiti non avevano eliminato "il freddo e l'umidità", circostanza che rese necessaria l'installazione di un impianto di riscaldamento.

All'inizio degli anni Settanta un intervento devozionale, l'allestimento di una finta grotta dedicata alla Madonna di Lourdes nella cappella battesimale, alterò ulteriormente la configurazione originaria dell'edificio occultando due finestre ed il condotto per il passaggio delle funi per azionare le campane.

Nel 1973 fu redatto un nuovo progetto di manutenzione per affrontare i fenomeni di degrado superficiale, già manifestatisi a circa un decennio dalla costruzione. Gli interventi previsti in questa occasione furono:

- Ripristino degli intonaci deteriorati e applicazione di una pittura a base di calce, all'esterno, ed una in plastocoat, all'interno
- Modifica della grondaia e rimozione del pluviale incassato nella Cappella Battesimale
- Realizzazione di un vespaio aerato per la mitigazione dell'umidità da risalita capillare nella Cappella Battesimale, con successivo rifacimento della pavimentazione
- Ripristino degli infissi del battistero
- Adeguamento liturgico dell'altare

Negli anni successivi, ulteriori interventi hanno riguardato:

- Il rivestimento del muretto d'attico, originariamente coronato da lastre di pietra di Corigliano-Cursi, con mattoni in graniglia e, in epoca più recente, con scossaline metalliche;
- La stesura di una malta bicomponente cementizia a protezione della copertura, inizialmente protetta da uno strato bituminoso
- Canalizzazione esterna dei pluviali, originariamente incassati
- Rimozione delle tramogge ad imbuto in Eternit

Questi interventi, se hanno talvolta tamponato fenomeni localizzati, hanno anche modificato il comportamento igrometrico e la traspirabilità dell'involucro, indirizzando il deflusso delle acque direttamente sul terreno e contribuendo così a peggiorare condizioni di umidità di risalita capillare.

Alla luce degli approfondimenti diagnostici, il progetto di restauro 2017–2018 è stato definito a partire da principi consolidati del restauro (compatibilità, distinguibilità, reversibilità, minimo intervento e autenticità) e dal criterio operativo di salvaguardare la leggibilità formale del manufatto: le alterazioni ritenute testimonianze del tempo sono state mantenute quando non risultavano in conflitto con la sicurezza strutturale o con la tutela della concezione spaziale originaria.

Il finanziamento, coadiuvato da fondi 8×1000 della Conferenza Episcopale Italiana, ha permesso l'avvio dei lavori il 27 novembre 2017; il progetto, autorizzato dalla Soprintendenza ABAP per la Città Metropolitana di Bari con i pareri n. 677 (23/01/2017) e n. 8594 (07/09/2017), è stato eseguito da un raggruppamento di imprese specializzate (EdilCiccone s.r.l. per le opere generali; Domodry s.r.l. per le tecnologie di deumidificazione; Giannattasio Brevetti per elettropercussori e supporti campane; Impresa Bruno Vito per i pluviali; Elcon per gli impianti elettrici), per un importo complessivo di € 140.334,76 (IVA esclusa). I lavori si sono conclusi e sono stati consegnati il 13 settembre 2018.

Sul piano strutturale l'intervento ha mirato a trasformare elementi fragili in elementi con comportamento più duttile nei meccanismi di collasso, concentrandosi su campanile, veletta d'ingresso e frontone.

Per il campanile si è adottata una strategia composita (Fig. 127): una fasciatura con nastri in tessuto di fibre d'acciaio zincato a matrice inorganica è stata applicata su cinque livelli per ridurre la larghezza libera di inflessione e aumentare l'azione di confinamento; nastri

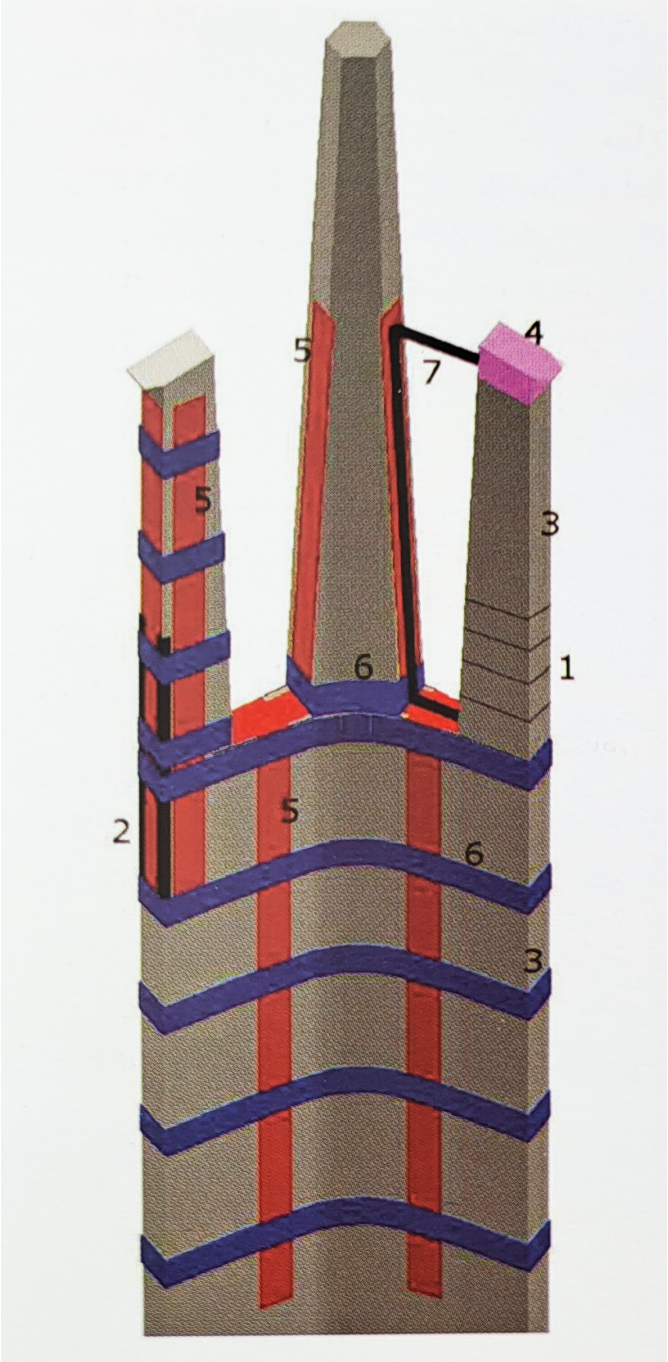


Fig. 127 | Rappresentazione schematica dell'ordine di inserimento dei presidi di rinforzo del campanile [Intini (2021)]

analoghi disposti verticalmente sul basamento (fino a quota 7,6 m) hanno rafforzato le zone soggette ad incremento di sollecitazioni per la presenza delle guglie mensolate. Le tre guglie sommitali sono state consolidate con telai trapezoidali in profili UPN 120 che hanno sostituito le putrelle originarie, mentre l'introduzione di angolari in acciaio, inchiodati con barre inox e avvolti dai nastri (i cosiddetti "calastrelli"), ha rinforzato i nodi basamento–guglie. Per gli elementi degradati in calcestruzzo si è eseguita la ricostruzione volumetrica con malte tixotropiche ad alta resistenza, spesso utilizzate anche per la passivazione delle armature corrose, applicate a spessore o colate entro casserature; dove necessario si sono incrementate le armature e infittito il passo delle staffe, con inghisaggi dei nuovi ferri realizzati mediante perforazioni e ancoraggi chimici. Il presidio antiribaltamento del frontone è stato ottenuto tramite ulteriore fasciatura in fibra d'acciaio e specifici interventi di sostegno alla veletta.

Le lavorazioni di ripristino delle strutture hanno incluso la rimozione delle parti decoese, la spazzolatura delle armature per l'asportazione delle incrostazioni ossidative, l'integrazione delle barre esistenti e la ricostruzione dei profili perduti, il tutto privilegiando tecniche e materiali compatibili.

Per le rifiniture superficiali è stata adottata una malta a base di cemento Portland appositamente formulata e additivata con passivante per armature per gli interventi di limitato spessore; per rimaneggi di profondità superiore a 3-4 cm si è previsto un getto in casseri con malta cementizia colabile e inerti selezionati (Fig. 128).

Dove il rivestimento cementizio esterno risultava così tenace che la rimozione avrebbe comportato perdita di materiale lapideo, si è limitata l'asportazione alle porzioni decoese, reintegrando con malta bastarda di calce e cemento. La rasatura finale con filler carbonatico e l'applicazione di una pittura a silicati hanno garantito una superficie traspirante e una resa cromatica compatibile con le finiture storiche.

Sono stati, inoltre, rimossi i vecchi discendenti in cemento-amianto rinvenuti all'interno delle murature e sostituiti con tubazioni in PEAD a giunti saldati; i pluviali esterni in PVC introdotti negli anni '80 sono stati eliminati e il nuovo sistema di deflusso è stato ricondotto alla soluzione originaria, occultato con tamponamenti in tavelline di laterizio e lasciando traccia interna nell'intonaco della cappella battesimale, in modo da non alterare

l'esteriorità dei fronti.

All'interno, le lastre in graniglia che rivestivano la parte inferiore delle murature, gravemente erose ma in buona parte recuperabili, si è adottato un sistema di reimpiego integrato: le lastre recuperabili sono state riposizionate su un sistema di aggancio a vista invisibile dall'esterno, distanziate di circa 2 cm dal supporto murario mediante profili e staffe in acciaio rimovibili, ottenendo una funzione simile a una facciata ventilata (Fig. 129-130).

Le superfici murarie sottostanti sono state regolarizzate con malte traspiranti a base di calce idraulica naturale NHL 3.5, per favorire l'evaporazione dell'umidità residua. Nel cantiere è stata altresì sperimentata la tecnologia CNT per interrompere la risalita capillare, scelta che è stata introdotta in via sperimentale con obiettivo di verificarne efficacia *in situ*.

Per quanto riguarda le cromie e le superfici interne, si è svolto un accurato di confronto tra documentazione iconografica, testimonianze orali e saggi mirati, per risalire alle scelte cromatiche originarie dell'area presbiteriale: un fondo di tono grigio chiaro, con il setto curvilineo dell'altare emergente su sfondo bianco in ocra molto chiaro. Sulla base di queste ricostruzioni si sono eseguite puliture, stuccature e ritinteggiature con materiali altamente traspiranti, eliminando strati superficiali degradati e ridando leggibilità alle campiture originali.

Le idropuliture ripetute sull'intradosso della cupola e sulle superfici superiori sono state seguite da interventi di stuccatura parziale e ritinteggiatura, in modo da mantenere più possibile il materiale esistente e limitare le rimozioni invasive.

La rimozione della "grotta" devozionale nella cappella battesimale ha permesso di liberare la visuale delle due finestre verticali del campanile e di recuperare il cavedio che originariamente ospitava le funi delle campane; tale cavedio è stato destinato al passaggio dei cavidotti per l'elettrificazione degli elettropercussori installati sui bronzi. Gli elementi recuperati dalla grotta sono stati, in seguito, parzialmente riutilizzati per realizzare una grotta più piccola in posizione

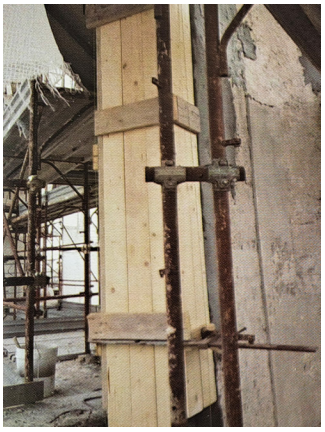




Fig. 128 | Ripristino delle finiture superficiali e dei copriferri degli elementi in calcestruzzo armato [Intini (2021)]

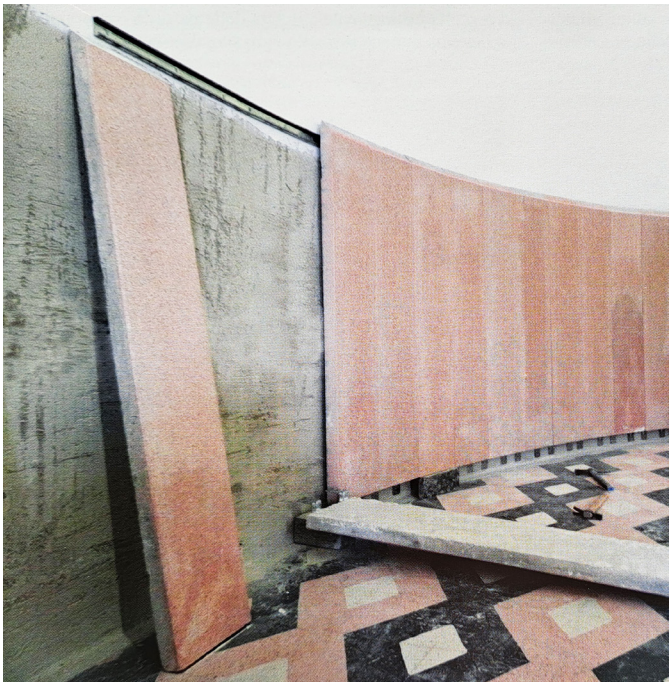


Fig. 129 | Ripristino dei rivestimenti in cemento granigliato [Intini (2021)]

Fig. 130 | Dettaglio del sistema a "parete ventilata" del rivestimenti in cemento granigliato, foto dell'ottobre 2022





Fig. 131 | Rimozione della "grotta" devozionale nella Cappella Battesimale [Intini (2021)]



Fig. 132 | Ricostruzione della "grotta" devozionale nella Cappella Battesimale [Intini (2021)]

defilata, consentendo di mantenere le tracce della storia del complesso, pur restituendone la leggibilità e la conservazione (Fig. 131-132).

A completamento dell'intervento sono state aggiornate le dotazioni impiantistiche: è stato introdotto un proiettore LED da 120 W, 3000 K, collocato in posizione fuori campo visivo diretto dall'aula per migliorare i livelli di illuminazione; sono state sfruttate tracce murarie esistenti per l'installazione senza ulteriore foratura; è stato installato un sottile sistema di protezione dalle scariche atmosferiche agganciato alla massa metallica del campanile, un tondino zincato Ø 8 mm verniciato in bianco applicato sul lato sud, soluzione discreta adottata nonostante la valutazione probabilistica avesse definito l'edificio "autoprotetto".

5.5.4 Risultati

5.5.4.1 Monitoraggio post-intervento

Il monitoraggio post-intervento della chiesa di Santa Maria Assunta in Cielo è stato concepito in continuità metodologica con la fase diagnostica preliminare, al fine di valutare nel tempo l'efficacia del restauro sia sotto il profilo strutturale sia rispetto ai fenomeni di umidità di risalita capillare. Le verifiche hanno riguardato due ambiti principali:

- Comportamento statico-strutturale degli elementi in calcestruzzo armato rinforzati (campanile, veletta, frontone)
- Comportamento termo-igrometrico dell'involucro edilizio e delle pavimentazioni

Per la parte strutturale le prove, condotte con metodologie di confronto pre- e post-intervento, hanno utilizzato misurazioni dirette di deformazione e vibrazione (estensimetri e prove dinamiche leggere con martinetto o martello strumentato), accompagnate da controlli sclerometrici localizzati per la stima della resistenza superficiale del calcestruzzo nelle zone di intervento. I risultati indicano un miglioramento medio di circa il 50% nelle prestazioni statiche, interpretato come riduzione delle deformazioni e incremento della rigidezza degli elementi rinforzati. Tale valore, pur non accompagnato da un protocollo di dettaglio (numero di punti, condizioni di carico e criteri di elaborazione), conferma un miglioramento significativo del comportamento strutturale globale, coerente con la maggiore duttilità di collasso perseguita nel progetto.

Parallelamente, la verifica delle condizioni igrometriche e del contenuto d'umidità residua nei paramenti murari è stata condotta

mediante:

- Misurazione dei parametri termo-igrometrici ambientali e superficiali, mediante igrometro a contatto (Tab. 7)
- Termografia IR per la mappatura delle variazioni termiche correlate alla presenza di umidità
- Confronti visivi e fotografici integrati con rilievi fotogrammetrici di dettaglio delle aree precedentemente interessate da fenomeni di degrado (es. efflorescenze saline, alterazioni cromatiche)

5.5.4.2 Considerazioni finali

La storia conservativa della chiesa di Santa Maria Assunta in Cielo mostra chiaramente i costi di interventi eseguiti senza una preventiva conoscenza dell'organismo edilizio.

Le operazioni tampone eseguite nei decenni successivi alla costruzione dell'edificio, per rispondere alle emergenze conservative , hanno apparentemente risolto i sintomi nel breve periodo, ma hanno alterato il comportamento termoigrometrico dell'edificio aggravando i processi di degrado nel medio e lungo termine.

Tali esiti sono da considerarsi la conseguenza diretta e prevedibile dell'adozione di tecniche e materiali non compatibili con l'organismo edilizio e con le cause dei degradi. Dal punto di vista operativo tale esito evidenzia la necessità di subordinare gli interventi alla comprensione del sistema edilizio e del contesto in cui si inserisce.

Analogamente, interventi funzionali come la creazione della grotta nel battistero hanno dimostrato come modifiche apparentemente marginali, possano avere ricadute tecniche rilevanti: occlusione di aperture, alterazione dei flussi d'aria, occlusione di vani tecnici.

La campagna diagnostica preliminare all'ultimo progetto ha rappresentato un punto di forza metodologico, in quanto ha fornito un quadro conoscitivo multilivello indispensabile per la successiva definizione degli interventi.

Tuttavia, questa diagnosi evidenzia un limite sistemico legato all'assenza di protocolli di monitoraggio standardizzati e alla scarsa disponibilità di serie temporali e dati. Ne consegue la difficoltà di attribuire con certezza gli effetti delle singole azioni correttive, piuttosto che alla sinergia di più azioni o a variazioni delle condizioni climatiche o gestionali intervenute successivamente.

Il progetto di restauro del 2017–2018 offre elementi positivi e altrettante cautele da cui trarre insegnamento. Tra gli esiti positivi si segnala l'impostazione integrata e la scelta di materiali traspiranti per i ripristini delle finiture superficiali; l'applicazione della tecnologia CNT e l'introduzione di intercapedini ventilate dietro le lastre in graniglia sono esempi di approccio sperimentale mirato a intervenire sulla causa (risalita capillare) piuttosto che sui soli sintomi.

Restano irrisolte alcune problematiche legate alla gestione e all'uso dell'edificio, che la sola opera di cantiere non può risolvere.

La chiesa, essendo raramente aperta al pubblico, non beneficia di una ventilazione costante; la scarsa ventilazione degli ambienti favorisce la formazione di microclimi che possono indurre

Tab. 7 | Parametri ambientali rilevati nelle campagne diagnostiche del 2017 e 2019

	07/06/2017		25/03/2019	
	Interno	Esterno	Interno	Esterno
UR [%]	48,9	39,7	60,7	29,2
T_{aria} [°C]	25,5	27,0	15,1	20,3
$T_{rugiada}$ [°C]	13,7	12,1	7,7	1,6

Fig. 133 | Campagna termografica del 27-10-2022





Fig. 134 | Stato di degrado localizzato vicino alle aperture in corrispondenza dell'altare, foto del 27-10-2022



Fig. 135 | Stato di degrado localizzato vicino alle aperture in corrispondenza dell'altare, foto del 27-10-2022

Fig. 136 | Stato di degrado localizzato in corrispondenza dell'ingresso, foto del 27-10-2022



fenomeni di condensa e la riattivazione dei fenomeni di degrado delle finiture superficiali.

Questo aspetto è stato osservato in modo concreto nel sopralluogo del 27 ottobre 2022, in occasione di un ultima campagna di monitoraggio con termografia IR (Fig. 133). Le termografie hanno evidenziato la scomparsa delle anomalie termiche lungo lo sviluppo verticale delle pareti (attribuibili alla risalita capillare), ma l'ispezione visiva e fotografica ha documentato fenomeni localizzati di degrado:

- Colature, alterazioni cromatiche, esfoliazioni ed efflorescenze saline in corrispondenza delle aperture laterali dietro l'altare (Fig. 134-135)
- Rigonfiamenti, esfoliazioni delle pellicole pittoriche e presenza di efflorescenze e sub-efflorescenze saline in corrispondenza dell'ingresso (Fig. 136)
- Presenza di efflorescenze saline sulla pavimentazione (Fig. 137)

Quanto osservato mostra che permangono punti critici legati ad infiltrazioni localizzati o a dinamiche microclimatiche locali, e sono necessarie ulteriori indagini per risolvere tali criticità.

Il successivo ripristino delle finiture superficiali dell'agosto 2025 sulle superfici in corrispondenza dell'ingresso (pittura a base di calce con resina acrilica), riferita a testimonianze orali, è comprensibile come misura tampone per riportare la leggibilità estetica, ma presenta un duplice profilo critico: da un lato risponde ad esigenze conservative emergenziali legate alla fruizione degli spazi, dall'altro maschera i fenomeni di degrado attivi se non accompagnata da un piano di monitoraggio e da interventi tecnici che affrontino la causa.

Ad oggi, si registra che le efflorescenze saline presenti sulla pavimentazione possono oggi considerarsi scomparse; questo risultato è positivo, ma in assenza di interventi di estrazione dei sali solubili, non garantisce che non si verifichino ricomparse in condizioni microclimatiche diverse.

Dalla lettura critica di questo caso studio

derivano indicazioni operative rilevanti:

- La diagnosi preliminare deve essere progettata e consegnata con protocolli di monitoraggio chiari: punti di misura, frequenze, condizioni di riferimento, metodi di archiviazione e analisi statistica dei dati. In assenza di tali protocolli, la replicabilità e la verifica dell'efficacia restano deboli.
- La gestione post-intervento (ventilazione, manutenzione preventiva e programmata, protocolli di monitoraggio continuo, archiviazione e gestione dei dati) è parte integrante della strategia di risanamento: interventi tecnici avanzati senza una governance di uso e manutenzione rischiano di perdere efficacia nel tempo.



Fig. 137 | Efflorescenze saline sulla pavimentazione della chiesa, foto del 27-10-2022

5.6

CHIESA DI SAN GIUSEPPE

5.6 Chiesa di San Giuseppe



Localizzazione: Rosate, MI
Anno/Epoca di costruzione: XVIII secolo
Tipologia edilizia: Architettura religiosa
Destinazione d'uso: Chiesa sussidiaria
Proprietà: Parrocchia di Santo Stefano, Rosate (MI)
Diagnosi e monitoraggio: Termografia IR, prove ponderali
Tecnologia costruttiva: Murature portanti in laterizio pieno



5.6.1 Analisi del contesto

5.6.1.1 Contesto territoriale

Il comune di Rosate (MI) si colloca nella porzione sud-occidentale della Città Metropolitana di Milano, a circa 20 km dal capoluogo, nel cuore della bassa pianura lombarda.

Il territorio comunale, posto a 107 m s.l.m., si estende su un'area di pianura alluvionale storicamente caratterizzata dalla presenza di una fitta rete idrica che comprende rogge e canali minori, derivanti dalle diramazioni dei navigli principali. Questa particolare caratteristica del territorio ne ha da sempre condizionato la morfologia e l'uso prevalentemente agricolo prevalentemente agricolo dell'area.

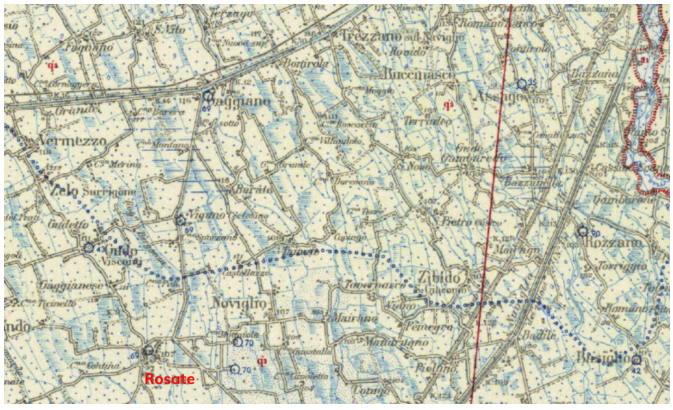
Secondo la Carta Geologica d'Italia [ISPRA - Milano] il sottosuolo di Rosate è caratterizzato da ghiaie e sabbie recenti, riconducibili ai terrazzi immediatamente sottostanti al livello fondamentale della pianura ed ai depositi alluvionali (Fig. 138). Questa tessitura litologica, con alternanza di materiali ad elevata permeabilità, favorisce la formazione di falde superficiali e può determinare condizioni di ristagno idrico nei terreni di fondazione.

Nei documenti del PGT (Piano di Governo del Territorio), la presenza di falda freatica molto superficiale viene esplicitamente evidenziata ed utilizzata come vincolo progettuale, tanto da sconsigliare la realizzazione di piani interrati nelle aree più critiche [Comune di Rosate (2023)]. La falda mostra una marcata stagionalità, con tendenza all'innalzamento primaverile e autunnale in relazione al regime pluviometrico locale; tali oscillazioni influiscono direttamente sul grado di umidità dei terreni di fondazione e, di conseguenza, sulla risposta igrometrica delle murature storiche.

In un contesto simile, gli edifici storici privi di idonee barriere d'impermeabilizzazione risultano particolarmente vulnerabili ai fenomeni di risalita capillare: la combinazione di falda alta, materiali costruttivi porosi e limitato drenaggio superficiale crea le condizioni predisponenti affinché l'acqua dal terreno venga assorbita e distribuita verticalmente all'interno dei paramenti murari.

Per la Chiesa di San Giuseppe, posta nel nucleo storico del paese, questo quadro territoriale costituisce una causa strutturale del problema d'umidità, che va affrontata con interventi progettuali calibrati sia a livello di singolo edificio sia, se necessario, a scala urbana.

Fig. 138 | Stralcio Carta Geologica d'Italia 1:100.000, F.45-Milano



5.6.1.2 Evoluzione storica e architettonica

La Chiesa di San Giuseppe a Rosate è stata costruita all'inizio del XVIII secolo (ca. 1721) lungo l'asse urbano principale della città [Regione Lombardia; Regione Lombardia Scheda MI100].

L'edificio si caratterizza per una configurazione planimetrica a pianta ottagonale centrale, con presbiterio rettangolare, che si inserisce nella tradizione delle soluzioni barocche tardo-seicentesche e settecentesche, qui declinate in un linguaggio che unisce elementi manieristici e barocchi [Regione Lombardia; Ufficio Nazionale per i Beni Ecclesiastici].

Dal punto di vista costruttivo, la chiesa è realizzata in murature portanti in laterizio interamente intonacate e copertura in coppi con struttura lignea.

All'interno l'apparato decorativo è ricco di stucchi dorati, lesene e porte lignee finemente decorate, mentre il presbiterio è caratterizzato da balaustre in marmo policromo e coperto da una volta a botte (Fig. 139). La cupola



Fig. 140 | Facciata principale della Chiesa di San Giuseppe a Rosate [https://www.lombardiabeniculturali.it/architetture/schede/MI100-06246/]



Fig. 139 | In alto: vista verso il presbiterio. In basso: Vista verso l'ingresso [https://www.lombardiabeniculturali.it/architetture/schede/MI100-06246/]

centrale, con medaglione pittorico, rappresenta l'elemento volumetrico e iconografico dominante.

La facciata, impostata su un doppio ordine di lesene è caratterizzata da un portale in pietra e rimane coerente con lo stile barocco locale (Fig. 140).

La collocazione cronologica e tipologica della chiesa la fa ritenere, nelle schede di catalogazione regionale, uno degli esempi più significativi di barocco manierista nell'area metropolitana di Milano.

5.6.2 Diagnosi preliminare

5.6.2.1 Metodologia diagnostica

Non si hanno notizie dell'eventuale diagnosi preliminare eseguita in occasione dei restauri precedenti all'ultimo restauro del 2016.

Sappiamo, invece, che durante l'ultimo restauro del 2016-2017, a causa della persistenza dei fenomeni di umidità da risalita capillare, è stato adottato un approccio tecnico e scientifico più rigoroso, finalizzato a valutare accuratamente le condizioni dell'edificio e a individuare soluzioni definitive ai problemi esistenti, ottimizzando l'impiego delle risorse e riducendo al minimo le spese future in termini di tempo e costi.

Il processo analitico è stato articolato in diverse fasi, a partire da una valutazione preliminare delle condizioni degli edifici e dall'identificazione delle patologie tramite tecniche diagnostiche non invasive.

Il microclima interno è stato monitorato mediante l'utilizzo di un termoigrometro per la registrazione dei parametri ambientali e di un termoigrometro a contatto per le misurazioni

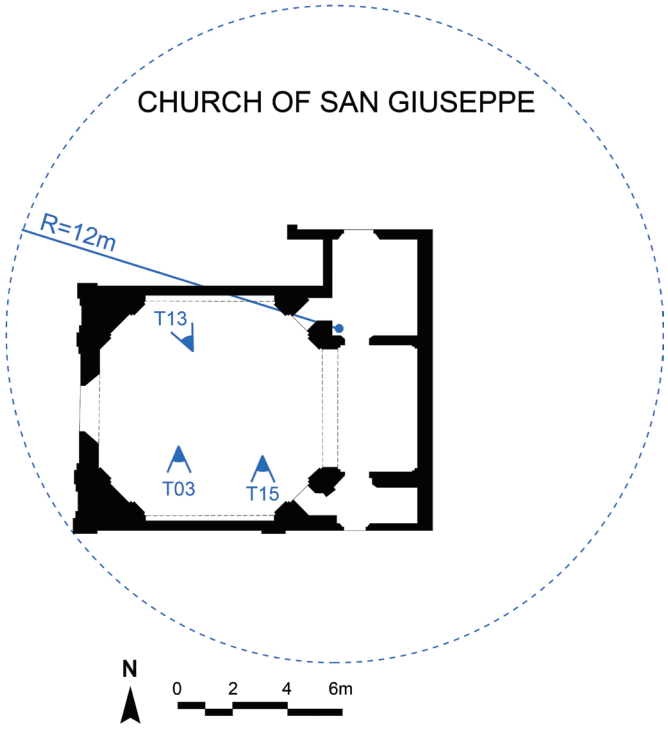


Fig. 141 | Planimetria della Chiesa di San Giuseppe con localizzazione delle termografie e raggio d'azione del dispositivo CNT-Domodry

sui paramenti murari.

Sono state, altresì, condotte indagini termografiche utilizzando una termocamera "NecH2640", scelta per la conformità agli standard raccomandati e per le caratteristiche tecniche che ne garantiscono l'affidabilità dei risultati, con risoluzione geometrica di 640x480 pixel, risoluzione termica di 0,03 °C e IFOV di 0,6 mrad. Tali rilevazioni hanno permesso di verificare la presenza di umidità da risalita capillare e di individuare le aree più critiche per la pianificazione dei prelievi dei campioni per l'analisi gravimetrica.

Per minimizzare eventuali alterazioni dei campioni durante il prelievo, è stato impiegato un trapano a bassa velocità per evitare il surriscaldamento degli stessi, secondo la norma UNI EN 11085:2003 "Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione del contenuto d'acqua: Metodo ponderale" [UNI EN 11085:2003]. I campioni sono stati collocati in una provette di vetro ermetiche e successivamente pesati in laboratorio con una bilancia avente precisione di 0,001 g.

I campioni sono poi stati essiccati fino a raggiungere una massa costante a 105 °C in un forno da laboratorio riscaldato elettricamente con una precisione di ±2 °C.

5.6.2.1 Stato di conservazione

Le ispezioni in loco condotte durante le campagne di restauro e le ricognizioni diagnostiche hanno messo in luce un quadro di degrado diffuso e stratificato che interessa sia le superfici esterne sia quelle interne della chiesa. Sono state rilevate diffuse efflorescenze e sub-efflorescenze saline, patine biologiche, distacco dell'intonaco, esfoliazione delle finiture superficiali, fenomeni di alveolizzazione, decoesione e progressiva disgregazione delle superfici.

Questi segni di degrado non sono semplici manifestazioni estetiche, ma indicano processi chimico-fisici e biologici interconnessi, dovuti alla presenza di umidità nelle murature, che compromettono l'adesione degli intonaci e la coesione dei materiali di finitura, con implicazioni dirette sulla durabilità dell'apparato decorativo e sulla leggibilità storica dell'edificio.

Le indagini termografiche preliminari (Fig.

Tab. 8 | Parametri ambientali rilevati nelle campagne diagnostiche del 2016, 2017 e 2024

	29/06/2016		15/04/2016		24/10/2017		26/06/2024	
	Interno	Esterno	Interno	Esterno	Interno	Esterno	Interno	Esterno
UR [%]	63,4	79,1	41,5	41,6	45,1	27,9	72,3	78,0
T_{aria} [°C]	17,2	11,6	21,6	20,8	17,8	22,3	23,2	22,0
$T_{rugiada}$ [°C]	10,3	8,3	8,0	7,4	5,5	2,7	17,9	17,9

141,142) e le misurazioni microclimatiche (Tab. 8) hanno, infatti,confermato la presenza di umidità da risalita capillare come causa dei fenomeni di degrado osservati.

5.6.3 Il progetto di risanamento

Il quadro cronologico degli interventi sulla Chiesa di San Giuseppe mostra come il fenomeno dell'umidità, costituisca da decenni la criticità prevalente e abbia indirizzato la progettazione degli interventi conservativi.

Il primo restauro documentato è del 1940 e si è concentrato sul consolidamento delle coperture e delle murature interne, quest'ultima operazione resa necessaria proprio dagli effetti dell'umidità da risalita capillare.

L'intervento tuttavia non risolse definitivamente il problema, tanto che già negli anni '60 si rese necessario un nuovo ciclo di lavori. Nel 1963 si attuarono delle azioni di restauro delle murature e ripristino degli intonaci, mentre nel giugno 1969 furono eseguiti ulteriori interventi

Fig. 142 | Termografie IR, con indicazione delle temperature lungo la parete, effettuate durante la campagna diagnostica negli anni 2016, 2017 e 2024

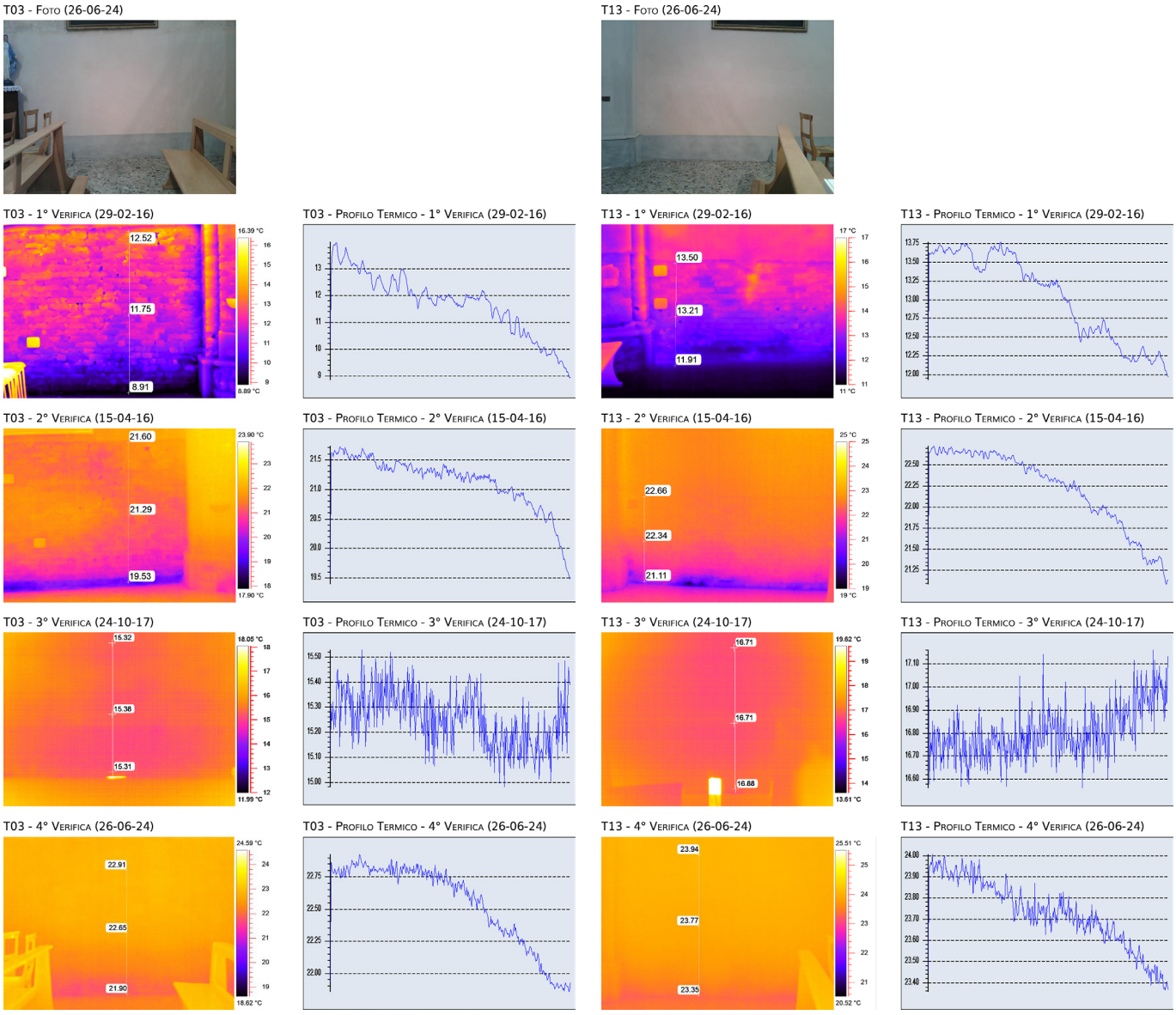




Fig. 143 | Rimozione degli intonaci ammalorati e installazione preventiva dei dispositivi CNT-Domodry



Fig. 144 | Ripristino delle finiture superficiali

per la conservazione dell'apparato decorativo della chiesa con interventi del pittore Terragni: dorature su modanature e capitelli, restauro pittorico [Lombardia Beni Culturali (s.d.)].

Dopo ulteriori fasi di degrado e il crollo della copertura, con il finanziamento dei fondi 8xmille della CEI, l'ultimo intervento del 2016-2017 ha riguardato il consolidamento strutturale delle coperture e della cupola, il risanamento delle murature ed il restauro delle facciate e degli interni (Fig. 143-144).

Preventivamente al ripristino delle finiture superficiali, per risolvere definitivamente i problemi legati all'umidità da risalita capillare si è optato, nel 2015, per l'installazione di un dispositivo CNT-Domodry di raggio sferico 12 m per avviare il processo di deumidificazione delle murature umide.

5.6.4 Risultati

5.6.4.1 Monitoraggio post-intervento

Il monitoraggio post-intervento è stato concepito come un lungo percorso volto a valutare sia l'impatto nel breve periodo delle soluzioni adottate, sia la loro durabilità ed efficacia nel medio-lungo periodo.

La campagna di monitoraggio ha avuto una durata complessiva di circa nove anni, periodo durante il quale sono state eseguite indagini termografiche e prove gravimetriche secondo degli intervalli di tempo prestabiliti.

Le campagne con termografia IR sono state eseguite a febbraio e aprile 2016, nel2017 (a due anni dall'installazione del dispositivo CNT) e nel 2024 (a nove anni dall'installazione del dispositivo CNT).

I test gravimetrici sono stati eseguiti in tre campagne diagnostiche del 2015 (prima dell'installazione dei dispositivi di deumidificazione), nel 2016 e nel 2024.

Seguendo la logica della campagna diagnostica preliminare, i campionamenti hanno riguardato sei punti ritenuti rappresentativi per la valutazione della morfologia e della distribuzione dei fenomeni di degrado. In ciascun punto i campioni sono stati prelevati a profondità comprese tra 5 cm (S) e 10 cm (P) dalla superficie esterna e ad altezze di 50 cm (B), 100 cm (A) e 150 cm (AA) dal piano di calpestio, per un totale di 16 campioni.

5.6.4.2 Considerazioni finali

La campagna di monitoraggio post-intervento ha fornito una valutazione qualitativa e quantitativa del contenuto umido presente nei paramenti murari, confermando l'efficacia dei processi evaporativi e delle soluzioni implementate.

Le termografie IR hanno evidenziato la

Fig. 145 | Grafico dei risultati delle prove gravimetriche condotte nel 2015 e 2016

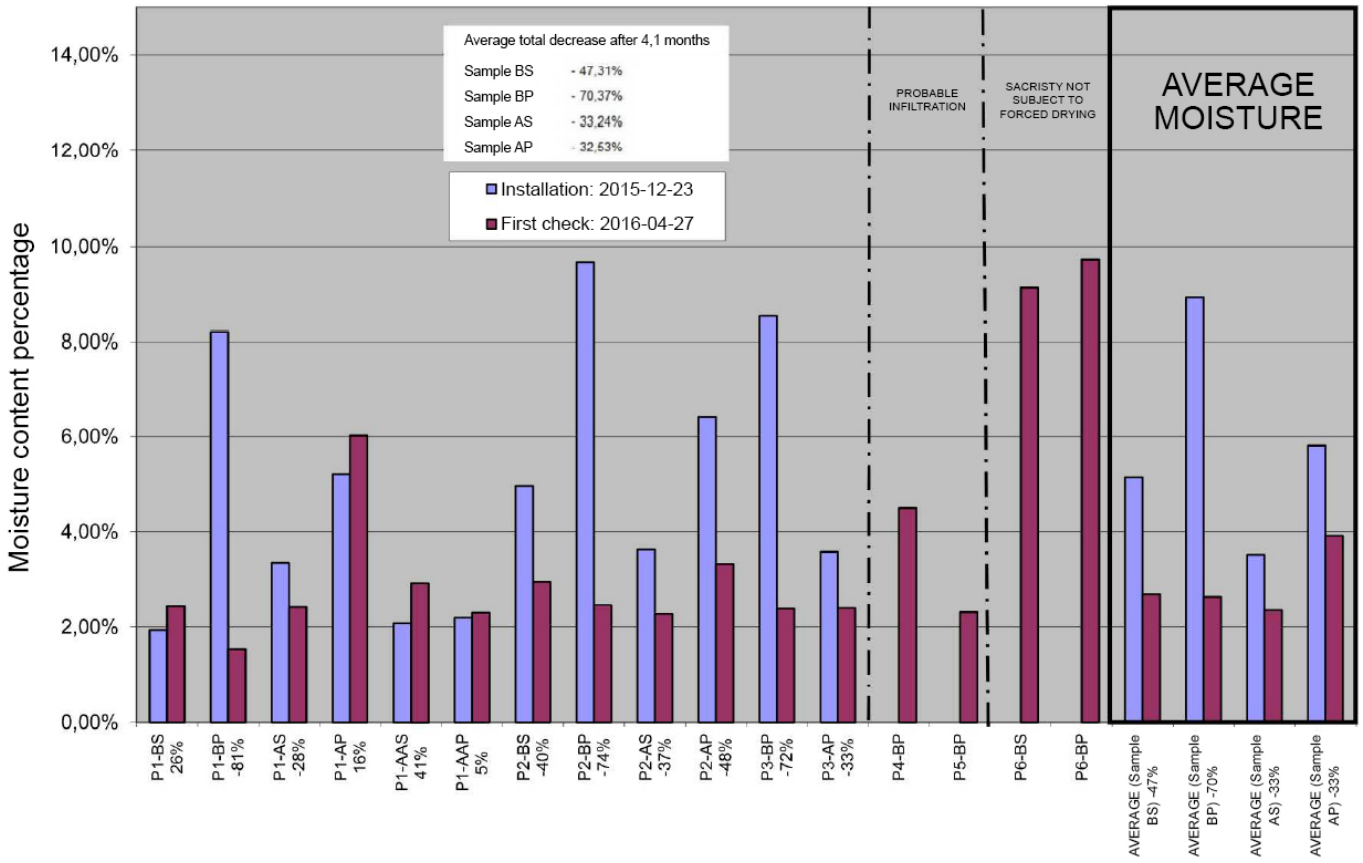
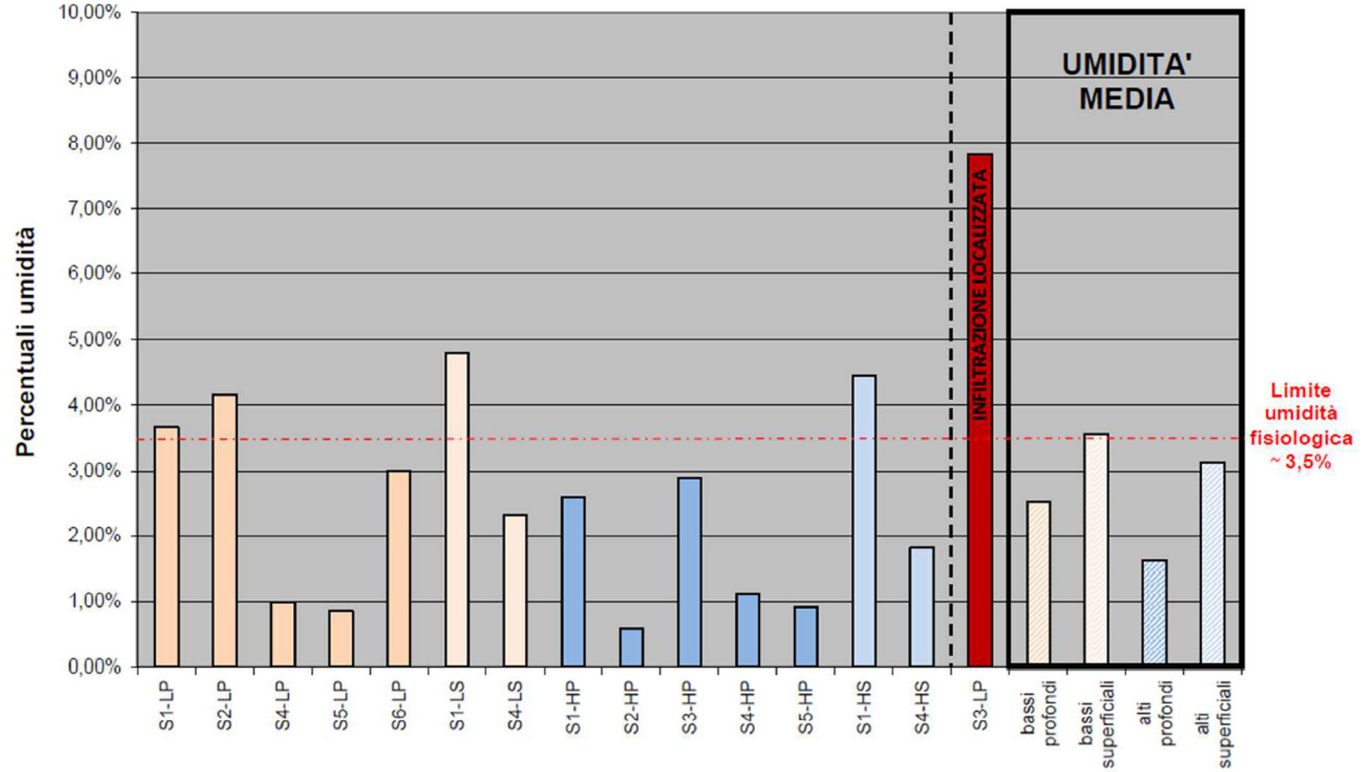


Fig. 146 | Grafico dei risultati delle prove gravimetriche condotte nel 2024



progressiva scomparsa delle anomalie termiche lungo lo sviluppo verticale delle pareti, indice di una riduzione del contenuto umido verso i normali livelli fisiologici di umidità per le murature asciutte (Fig. 142).

Tali risultati sono stati confermati dalle prove gravimetriche che hanno restituito evidenze quantitative del contenuto umido mostrando valori complessivamente prossimi a quelli considerati fisiologici (Fig. 145-146).

Dalle prove gravimetriche, sono altresì emerse alcune anomalie. Nel campione P1-AP è stata rilevata la presenza di una lieve umidità igroscopica e più in generale, il confronto fra i prelievi superficiali e quelli eseguiti a maggiore profondità, ha messo in luce una tendenza dei campioni superficiali a valori di contenuto d'acqua leggermente più elevato rispetto ai campioni profondi, indice della presenza di sali igroscopici intrappolati nelle finiture superficiali.

Le termografie IR hanno confermato questo quadro, evidenziando la presenza delle cosiddette "macchie di leopardo" associate alle superfici interessate dalla presenza di sali igroscopici (Fig. 147). Tali aree, termicamente più fredde, coincidono con le efflorescenze e i fenomeni di degrado osservati sui paramenti murari.

Di fatti, le finiture superficiali applicate in occasione dell'ultimo restauro presentavano depositi biancastri dovuti alle efflorescenze saline e fenomeni di rigonfiamento, esfoliazione e distacco attribuibili ai cicli di cristallizzazione-dissoluzione dei sali.

Questa condizione sottolinea l'importanza della fase di rimozione o stabilizzazione dei sali solubili contenuti nelle murature, prima di procedere a qualsiasi altro intervento di risanamento delle superfici: con l'evaporazione del contenuto umido nelle murature, i sali solubili si depositano sulle superfici murarie e continuano ad attrarre umidità dall'ambiente per igroscopicità, determinando un degrado ciclico delle finiture superficiali.

Un'ulteriore anomalia emersa con l'analisi gravimetrica riguarda il campione S3-LP, che ha mostrato un contenuto di umidità pari al 7,84%, più del doppio del valore di umidità fisiologica del 3,5%. Questo dato, come confermato dai risultati delle indagini termografiche, è riconducibile alla presenza di infiltrazioni localizzate in quella specifica area e segnala la necessità di ulteriori indagini ed interventi mirati per la risoluzione della causa di degrado.

Fig. 147 | Monitoraggio degli interventi di restauro con confronto tra lo stato iniziale del 2015 e i risultati degli interventi a distanza di nove anni, nel 2024



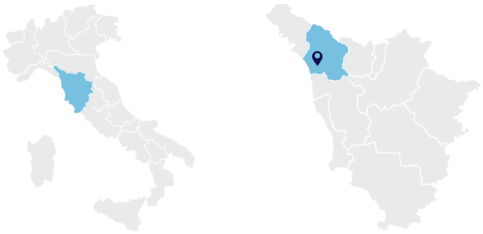
L'approccio metodologico adottato, basato su protocolli normativi e sull'impiego degli stessi strumenti nelle successive campagne di monitoraggio, ha consentito di caratterizzare con rigore lo stato di conservazione iniziale dell'organismo edilizio e di confrontare in modo affidabile gli esiti delle soluzioni implementate nel medio-lungo periodo.

Il confronto integrato di indagini qualitative e quantitative ha fornito un solido punto di partenza per la pianificazione degli interventi di risanamento consentendo di identificare e rimuovere, in primo luogo, le cause dirette dei degradi e di selezionare interventi compatibili e reversibili per il risanamento delle murature.

5.7

ANTICA PIEVE DI SAN GENNARO

5.7 Antica Pieve di San Gennaro



Localizzazione:	San Gennaro di Capannori, LU
Anno/Epoca di costruzione:	IX-X secolo
Tipologia edilizia:	Architettura religiosa
Destinazione d'uso:	Pieve
Proprietà:	Parrocchia di San Gennaro
Diagnosi e monitoraggio:	Termografia IR, analisi termo-igrometriche, analisi chimiche
Tecnologia costruttiva:	Murature portanti in pietra arenaria di Matraia



5.7.1 Analisi del contesto

5.7.1.1 Contesto territoriale

L'antica Pieve di San Gennaro di Capannori sorge a circa 247 m s.l.m. nella frazione di San Gennaro (Capannori, LU), sul margine tra la Piana di Lucca e la Valdinievole.

Il contesto insediativo in cui si inserisce è prevalentemente rurale ed è caratterizzato da piccoli nuclei urbani distribuiti all'interno di una matrice agro-silvo-colturale, con ampie superfici coltivate che intervallano i centri abitati (Fig. 148).

Dal punto di vista geomorfologico e litologico, la Carta Geologica d'Italia individua in quest'area la presenza di argilliti e calcari di Poggio Rocchino. Tali formazioni si manifestano come argilliti fissili di colore bruno con screziature rossastre e sono frequentemente associate a livelli di brecce con elementi di calcilutiti (Fig. 149) [ISPRA - Foglio 261 - Lucca].

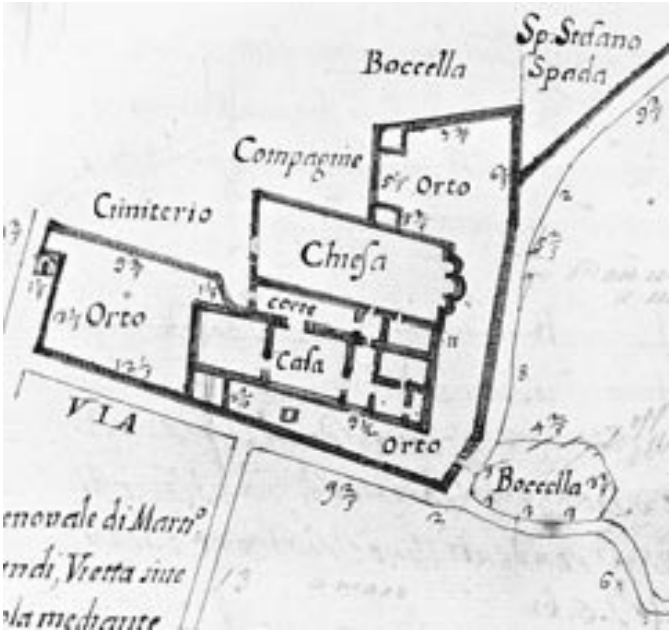


Fig. 148 | Rapporto della Pieve di San Gennaro con il suo contesto nel XVIII secolo [Filieri (2019)]

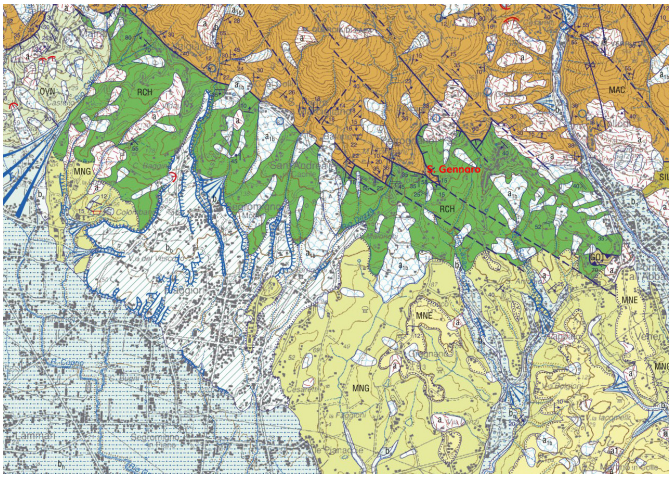


Fig. 149 | Stralcio Carta Geologica d'Italia 1:50.000, F.261-Lucca

5.7.1.2 Evoluzione storica e architettonica

Il primo impianto dell'Antica Pieve di San Gennaro risale al IX-X secolo e viene menzionata nei documenti già nell'873 [Filieri (2019)]. L'edificio ha assunto l'attuale configurazione basilicale a tre navate in seguito alla ricostruzione di età romanica nel XII secolo.

La pianta fu articolata, secondo la tipologia delle chiese battesimali, in sei campate per navata e, in origine, prevedeva tre absidi, delle quali si conservano solo quella della navata sinistra e tracce del basamento dell'abside della navata destra.

L'abside della navata centrale è stata, probabilmente, modificata nell'attuale pianta quadrangolare nel corso del XVIII secolo, quando vennero aggiunte altre due porte d'ingresso in corrispondenza delle navate laterali.

Studi recenti hanno evidenziato che l'attuale configurazione della Pieve sono da considerarsi il risultato di una serie di interventi che hanno condizionato la morfologia e la lettura

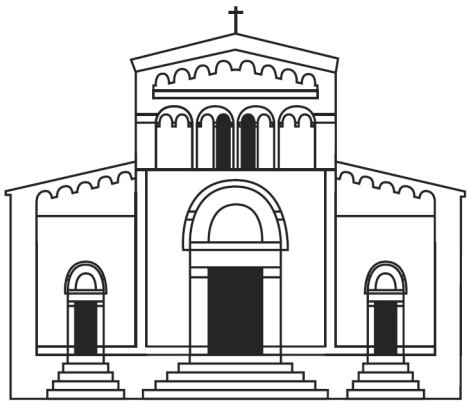


Fig. 150 | Ipotesi ricostruttiva dell'assetto della facciata principale prima degli interventi [Filieri (2019)]

dell'organismo edilizio [Filieri (2019)]:

- 1609: riassetto liturgico degli altari, imbiancatura, risarcitura di porzioni murarie, rifacimento della pavimentazione
- 1717: lo stato di degrado avanzato, dovuto anche a probabili cedimenti del terreno, richiede interventi più importanti, quali la sostituzione della colonna dell'ultima campata della navata nord
- 1734: richiesta alla Commissione Sinodale, da parte dell'allora parroco, di fondi per il ripristino e la stabilizzazione della chiesa
- 1745: costruzione della nuova sacrestia in corrispondenza dell'abside della navata destra
- Fine XIX: "ri-medievalizzazione" della chiesa con rimozione di intonaci e controsoffittature e ripristino delle monofore
- XX secolo: per via di gravi problemi statici viene smontata e ricostruita gran parte della facciata principale e parte del paramento murario dietro l'organo e la cantoria

Le tecniche costruttive e i materiali utilizzati per la costruzione riflettono le tradizioni locali. La muratura portante è realizzata con blocchi squadrati di pietra arenaria porosa, identificata come "Pietra di Matraia", proveniente dall'omonima cava a circa 12 km da Capannori [Aquino (2021)].

La copertura a doppio spiovente è sorretta da capriate lignee e la facciata, a doppio spiovente, è impostata su un alto stilobate e scandita da lesene. In seguito ai numerosi interventi, resta oggi un unico portale di ingresso (Fig. 150-151).

Il campanile quadrato del 1840 sorge, invece, isolato sul lato settentrionale della facciata principale.

Per le sue caratteristiche storiche e architettoniche, la Pieve di San Gennaro rappresenta uno dei più importanti esempi di architettura religiosa romanica nel territorio



Fig. 151 | Interno della Pieve di San Gennaro [Filieri (2019)]



Fig. 152 | Scultura dell'Angelo Annunciante

di Lucca. L'interesse per questo edificio si è, inoltre, rinnovato in relazione al restauro della scultura di un Angelo Annunciante (Fig. 152), opera attribuita da alcuni studiosi a Leonardo Da Vinci.

5.7.2 Diagnosi preliminare

5.7.2.1 Metodologia diagnostica

Non risultano documentazioni relative alle metodologie diagnostiche adottate in occasione degli interventi precedenti all'ultimo restauro avviato nel 2021. Pertanto, la ricostruzione che segue si riferisce esclusivamente al protocollo applicato in occasione del più recente restauro.

Il processo diagnostico è stato concepito come un'indagine integrata e multi-temporale, finalizzata ad identificare le cause e le tipologie di degrado, a mappare le aree critiche e a fornire dati oggettivi per la progettazione degli interventi di risanamento.

La fase conoscitiva iniziale ha previsto l'ispezione visiva e la mappatura sistematica dei fenomeni di degrado. Questa fase è stata integrata da rilievi aerei con drone e da scansione laser 3D, che hanno consentito di individuare con precisione le aree critiche da sottoporre a indagini più approfondite ed hanno, altresì, contribuito ad un rilievo geometrico ad alta precisione.

Per la valutazione preliminare del microclima sono state condotte misurazioni con termoigrometro, mentre per la caratterizzazione termo-igrometrica delle superfici è stato utilizzato un termoigrometro a contatto.

Tra le indagini non distruttive, sono state eseguite prove termografiche (Fig. 153) con termocamera "NecH2640" per identificare la presenza di anomanlie termiche riconducibili all'umidità da risalita capillare o a difetti dei paramenti murari. Le caratteristiche tecniche della termocamera utilizzata (risoluzione geometrica di 640x480 pixel, risoluzione termica di 0,03 °C e IFOV di 0,6 mrad) sono state ritenute coerenti con gli standard raccomandati per indagini affidabili sui manufatti edilizi.

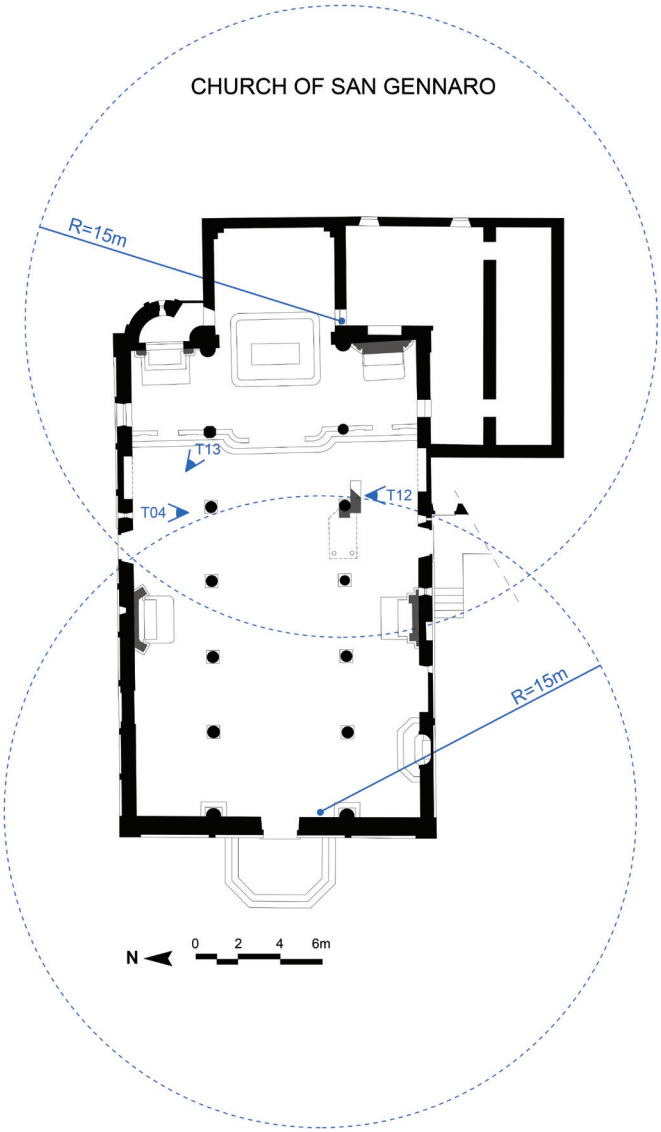


Fig. 153 | Planimetria della Pieve di San Gennaro con localizzazione delle termografie e raggio d'azione del dispositivo CNT-Domodry

	30/06/2021		10/05/2022		28/09/2023	
	Interno	Esterno	Interno	Esterno	Interno	Esterno
UR [%]	49,7	41,0	53,2	44,6	47,0	36,0
T_{aria} [°C]	25,8	26,0	22,3	23,7	26,0	29,0
$T_{rugiada}$ [°C]	14,5	11,7	12,6	10,9	13,8	12,4

Tab. 9 | Parametri ambientali rilevati nelle campagne diagnostiche del 2021, 2022 e 2023

Va tuttavia osservato che, al momento dell'installazione del sistema CNT-Domodry, non è stato possibile procedere alla mappatura termografica a causa di condizioni termo-igrometriche sfavorevoli. La concomitanza di elevata umidità relativa e basse temperature

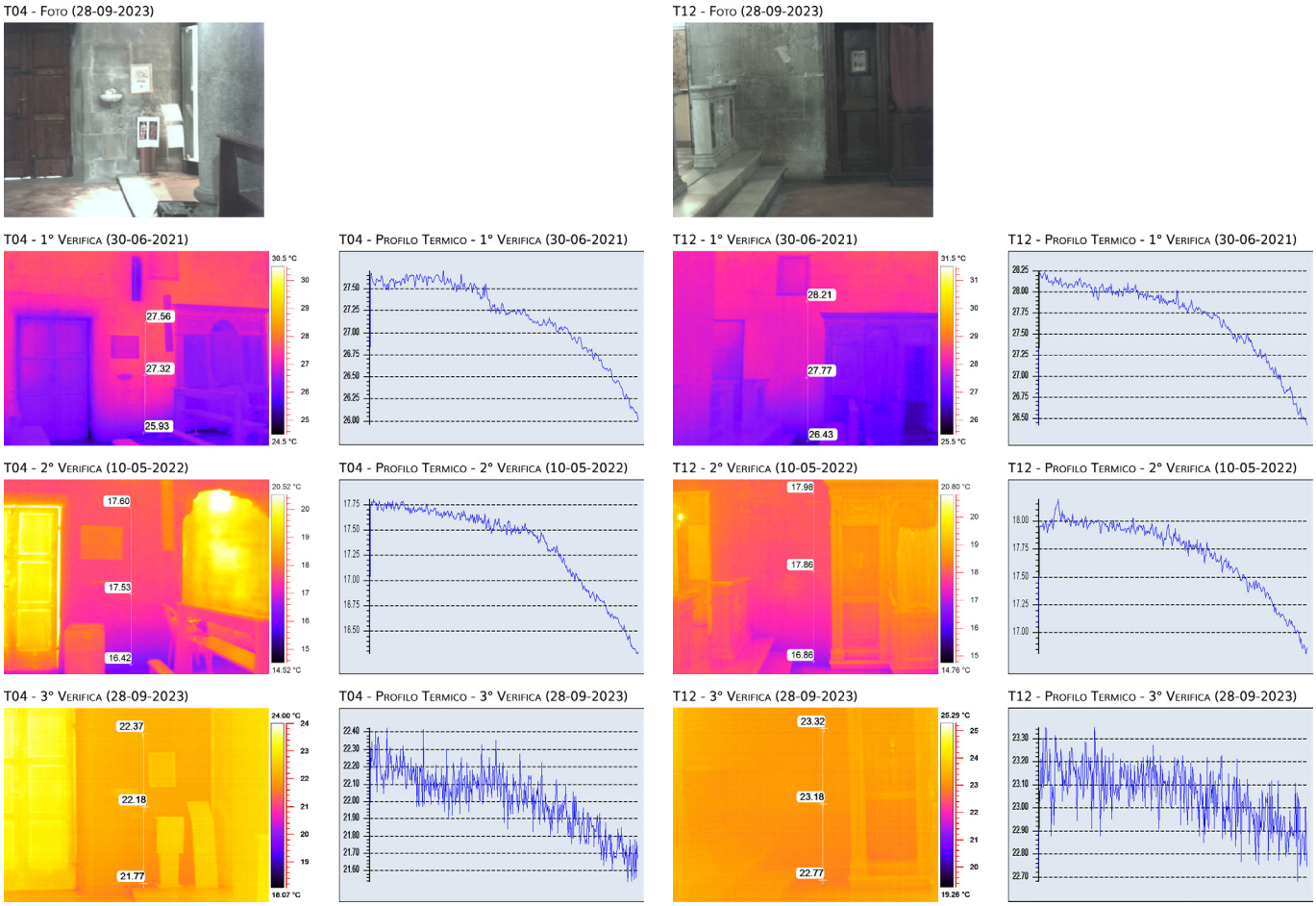


Fig. 154 | Termografie IR, con indicazione delle temperature lungo la parete, effettuate durante la campagna diagnostica negli anni 2021, 2022 e 2023

avrebbe comportanto una riduzione del tasso di evaporazione superficiale e la conseguente sottostima del contenuto umido presente nelle murature. Per tale ragione le indagini termografiche sono state preventivamente posticipate e svolte sette mesi dopo l'installazione del sistema di deumidificazione, in condizioni ritenute maggiormente idonee alla corretta interpretazione dei dati.

Per completare la caratterizzazione dello stato di conservazione dell'organismo edilizio, sono stati effettuati dei prelievi e delle analisi petrografiche mirati dei materiali costruttivi e delle malte. I campioni prelevati sono stati analizzati in laboratorio con un microscopio ottico polarizzato per la definizione della mineralogia dei materiali e la valutazione del relativo comportamento igrometrico, informazioni indispensabili per la successiva scelta di interventi e materiali compatibili.

5.7.2.1 Stato di conservazione

Le ispezioni in situ, eseguite in occasione della campagna diagnostica relativa all'ultimo intervento, hanno messo in luce un quadro di degrado diffuso. Sono state osservate estese efflorescenze e sub-efflorescenze saline, patine biologiche, lievi distacchi dell'intonaco, esfoliazione delle pellicole pittoriche, nonchè fenomeni di alveolizzazione, polverizzazione e disgregazione delle superfici murarie.

L'analisi intregrata, che ha combinato termografia IR (Fig. 154) e misurazioni microclimatiche (Tab. 9), ha consentito di individuare come causa principale dei fenomeni

di degrado osservati l'umidità da risalita capillare, che ha altresì alterato il comfort termo-igrometrico interno.

Di fatti, le termografie IR hanno evidenziato la presenza di anomalie termiche coerenti con la presenza di umidità da risalita nelle murature: le porzioni murarie comprese tra 1,2m e 1,5m dal piano di calpestio hanno mostrato temperature medie superficiali superiori di circa 2 °C rispetto alle zone immediatamente prossime al piano di calpestio, con picchi fino a 2,6 °C, segnale compatibile con un gradiente igrometrico indotto dall'umidità ascendente.

5.7.3 Il progetto di risanamento

Da sempre soggetto a diverse problematiche e a diffusi fenomeni di degrado, l'edificio è stato oggetto di molteplici interventi conservativi e di restauro.

Tuttavia, a causa del persistere delle patologie, nel 2021 è stata avviato un progetto organico di risanamento finalizzato alla rimozione delle cause profonde del degrado e al controllo dell'umidità da risalita capillare. Il progetto ha adottato un approccio integrato che ha affiancato agli interventi di risanamento, un monitoraggio strumentale continuo [Boncompagni (2023)].

Per far fronte alla risalita capillare, nel 2021, si è deciso di installare due dispositivi CNT-Domodry di raggio sferico 15 m (Fig. 155).

La sequenza operativa ha previsto, in primo luogo, l'attesa del naturale processo di evaporazione del contenuto umido dai paramenti murari, fase monitorata grazie ad apposite sonde installate sulle murature.

Successivamente si è proceduto all'estrazione dei sali solubili presenti nei paramenti murari. La decontaminazione salina è stata eseguita per mezzo di impacchi con carta giapponese e sepiolite, seguiti dal lavaggio delle superfici con acqua deionizzata. Gli impacchi sono stati lasciati in opera per tempi tali da consentire il completo assorbimento dei sali.

Tale tecnica di rimozione dei sali è stata selezionata per la sua comprovata efficacia e compatibilità con le finiture storiche.

Prima delle operazioni di consolidamento e protezione delle superfici, le finiture superficiali ammalorate sono state preventivamente rimosse meccanicamente.

La scelta dei materiali di finitura, da applicare in sostituzione a quelli rimossi, è stata determinata dai risultati ottenuti con le indagini petrografiche. L'analisi degli intonaci originari e dei campioni lapidei, al microscopio ottico polarizzato, ha indirizzato la scelta verso un intonaco a base di calce naturale, ritenuto la soluzione più idonea dal punto di vista della compatibilità chimico-fisica e meccanica con il substrato. Tale criterio di compatibilità è stato considerato prioritario per prevenire fenomeni di incompatibilità materica che avrebbero potuto compromettere l'efficacia e la durabilità degli interventi.

A complemento degli interventi sulle superfici sono state, inoltre, adottate una serie di misure preventive volte a ridurre ed impedire eventuali infiltrazioni d'acqua dall'esterno. In questa fase si è provveduto al ripristino dei pluviali e delle modanature della facciata, elementi funzionali al corretto drenaggio delle acque meteoriche. Tali interventi, oltre a limitare l'erosione dei paramenti, concorrono a preservare l'apparato decorativo esterno e a mitigare il rischio di riattivazione di fenomeni igrometrici superficiali nel medio-lungo periodo.

5.7.4 Risultati

5.7.4.1 Monitoraggio post-intervento

Il monitoraggio post-intervento è stato condotto con continuità per un arco temporale di tre anni, combinando misurazioni dei parametri termo-igrometrici ambientali e superficiali con termografia IR al fine di valutare l'efficacia e la durabilità delle soluzioni implementate.

Le analisi temografiche sono state ripetute a un anno (2022) e a due anni (2023) dall'installazione del sistema CNT.

Per un anno continuativo sono state, inoltre,

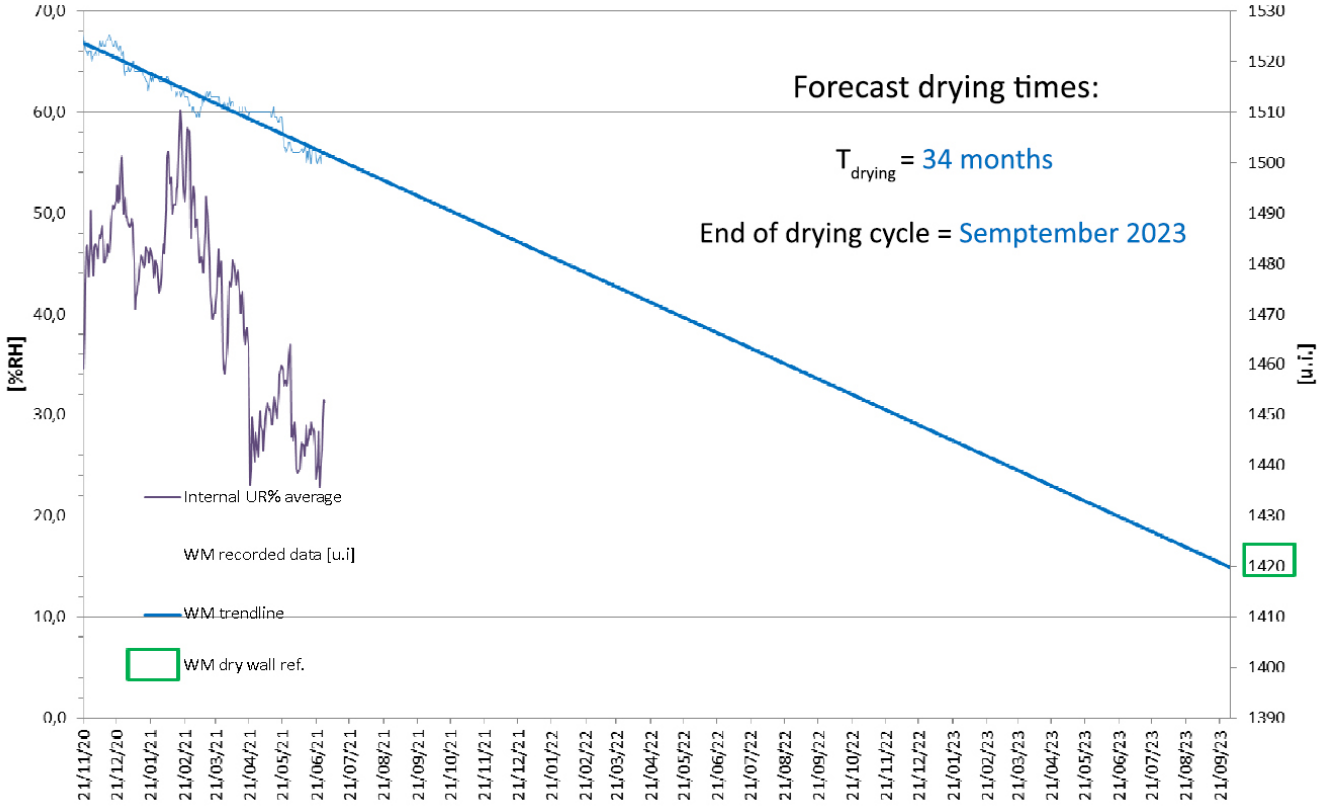


Fig. 155 | Stima dei tempi di asciugatura delle murature

registrate letture orarie (24 registrazioni al giorno) dell'umidità relativa e della temperatura interna dell'aria mediante l'installazione dei sensori Domodry® RH-T (intervallo di misura della temperatura: da -20 °C a 60 °C con precisione di 0,3 °C; intervallo di misura dell'umidità relativa: 0-100% con precisione del 2%; capacità di archiviazione: >3 anni).

Parallelamente, due sensori IDROSCAN® (campo di misura: da 1500 a 2500 u.i., con precisione di 2 u.i.; capacità di archiviazione: >3 anni) hanno fornito, nello stesso periodo, letture quotidiane dell'umidità muraria espressa in "unità idroscan" (u.i.), integrando così le informazioni microclimatiche con dati puntuali sul contenuto umido dei paramenti murari.

Tutti i dati sono stati memorizzati localmente sui dispositivi CNT o sui sensori e successivamente trasmesse al Domodry Control Center; in assenza di accesso a internet i dataset sono stati scaricati manualmente da un operatore tecnico ed inseriti nel sistema centrale.

Tale sistema di monitoraggio continuo ha consentito una valutazione in tempo reale delle prestazioni delle soluzioni implementate e l'ottimizzazione delle strategie di intervento in termini di tempi di asciugatura, necessità di interventi complementari e specifici accorgimenti.

5.7.4.2 Considerazioni finali

Il monitoraggio post-intervento ha consentito di documentare una chiara riduzione del contenuto umido all'interno dei paramenti murari a seguito dell'attivazione dei dispositivi CNT.

I dati acquisiti nell'arco di un anno con i sensori Domodry hanno evidenziato una progressiva diminuzione del contenuto idrico ed hanno consentito di stimare i tempi della completa

evaporazione dell'umidità residua entro settembre 2023 (Fig. 155).

Durante tutto il periodo di monitoraggio, l'umidità relativa interna si è mantenuta generalmente al di sotto della soglia raccomandata del 50%, con sporadici picchi. La temperatura interna si è stabilizzata su valori medi compresi tra i 18 °C e i 22 °C, range favorevole sia al comfort ambientale sia ai processi di asciugatura dei paramenti murari.

L'efficacia del sistema di deumidificazione è stata confermata anche dalle indagini termografiche (Fig. 154).

L'ispezione termografica del 2022/05/10, l'indagine termografica ha evidenziato la riduzione delle anomalie termiche lungo lo sviluppo verticale delle pareti, segnale coerente con l'arresto e la regressione del fenomeno della risalita capillare e con una progressiva asciugatura naturale delle murature.

L'ispezione finale del 2023/09/28, ha mostrato una sostanziale scomparsa delle anomalie termiche e livelli di umidità muraria assimilabile ai normali livelli di umidità fisiologica.

Da tali indagini, si è tuttavia osservato che il tasso effettivo di deumidificazione è risultato lievemente inferiore rispetto alle previsioni iniziali. Tale comportamento è, verosimilmente, imputabile al significativo spessore delle murature e all'elevato contenuto d'acqua iniziale.

Le ispezioni visive hanno, invece, messo in luce che, a seguito dell'ultimo restauro della Pieve di San Gennaro, persistevano sulle colonne delle macchie scure. Le verifiche strumentali con termocamera IR hanno escluso che tale manifestazione di degrado fosse imputabile alla presenza di umidità attiva nell'area (Fig. 156).

In seguito alla rimozione dei sali igroscopici dalla colonna, si è giunti alla conclusione che, tali alterazioni cromatiche potrebbero essere dovute a reazioni tra strati pittorici preesistenti e sali solubili. Per confermare questa interpretazione e identificare il tipo di pittura impiegato nei precedenti restauri sono in corso ulteriori analisi.

Dal punto di vista operativo, il caso studio della Pieve di San Gennaro consente di sottolineare l'importanza di eseguire gli interventi con tempistiche e sequenze progettuali rigorose: monitoraggio continuo, rispetto dei tempi di asciugatura e successiva estrazione dei sali

Fig. 156 | Monitoraggio degli interventi di restauro sulla colonna con confronto tra lo stato iniziale prima della rimozione dei sali e dopo la rimozione dei sali solubili, con confronto termografico



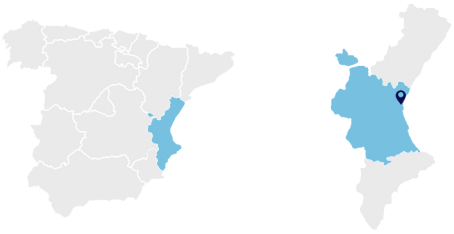
solubili costituiscono fasi indispensabili ed interdipendenti per il successo dell'intervento di risanamento. La combinazione di tecniche di deumidificazione delle murature e di rimozione controllata dei sali si è dimostrata decisiva per l'ottimizzazione della durabilità e della sostenibilità delle misure conservative.

In prospettiva, l'analisi del caso studio contribuisce alla definizione di un protocollo operativo per le *best practices* nella conservazione del patrimonio architettonico; protocollo che deve analizzare tutte le fasi del processo di restauro: conoscenza preliminare dell'edificio, identificazione delle patologie e delle relative cause di degrado, applicazione di azioni conservative sequenziali, monitoraggio continuo.

5.8

ALQUERIA “4 CAMINS”

5.8 Alqueria “4 Camins”



Localizzazione:	Alboraya, Comunidad Valenciana, Spagna
Anno/Epoca di costruzione:	Fine XIX secolo
Tipologia edilizia:	Alquerìa
Destinazione d’uso:	Residenziale
Proprietà:	Privata
Diagnosi e monitoraggio:	Prospezioni geotecniche, analisi dell’acqua di falda, analisi termo-igrometriche
Tecnologia costruttiva:	Murature portanti in laterizio pieno, solai in legno o legno e voltine in laterizio



5.8.1 Analisi del contesto

5.8.1.1 Contesto territoriale

L'edificio oggetto di studio si colloca nell'Horta di Valencia, nel territorio comunale di Alboraya.

La storia del territorio di Valencia è strettamente legata al mondo agrario [Arazo (1978)] ed il risultato di secoli di pratiche colturali e interventi idraulici che ne hanno definito la morfologia dei suoli, le tipologie insediative e i sistemi produttivi.

L'*Horta de Valencia* (Fig. 157), riconosciuto dal 2019 come uno dei sette SIPAM (Sistemi Ingegnosi del Patrimonio Agricolo Mondiale) del FAO [FAO (2019); Garcia-Alvarez Coque (2020)], è infatti il punto di partenza per conoscere e comprendere il luogo e costituisce uno dei paesaggi storici più emblematici della società valenciana, descritto come un "*puzzle*

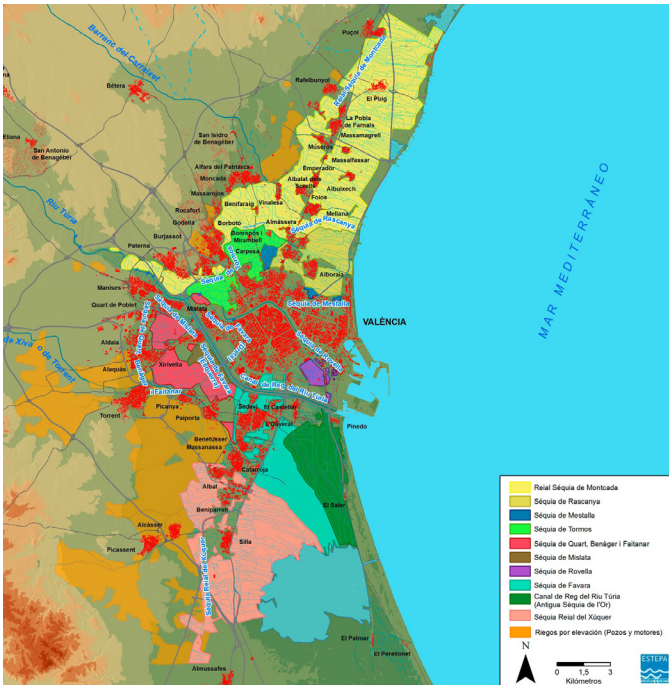


Fig. 158 | Rete idraulica storica della Huerta de Valencia [Hermosilla]

Fig. 157 | Horta de Alboraya [23-07-2025]



territoriale" [Esquilache (2018)] attraversato da una fitta rete di canali (*sequies* ed *acequias*), strade e da piccoli insediamenti urbani e abitazioni sparsi (Fig. 158). Questa complessità spaziale si suddivide in parcelle (*partidas*) che si vanno a creare dagli *aterrassats* (terrazzamenti), in parte naturali, e dalla rete di canali, condizioni resesi necessarie nella storia per la corretta irrigazione dei campi [Del Rei (2024)].

Il limite del territorio dell'Horta valenciana è segnato dalla sequia di Montcada e quella di Quart-Benàger e copre circa 14000 ettari; tale territorio si distingue in Horta Sud (Quart-Benàger, Mislata, Favara, Rovella) e Horta Nord (Montcada, Tormos, Alboraia, Rascanya).

L'Horta si sviluppa sulla pianura alluvionale quaternaria modellata dal fiume Turia e dai *barrancs* (torrenti) del Carraixet e del Torrent-Catarroja, su ventagli alluvionali costituiti da sabbie, limi e argille rosse altamente carbonatate. In particolare, la carta geologica a scala 1:50000 [Istituto Geologico y Minero de Espana - Foglio 772 Valencia (Illa del Toro); Istituto Geologico y Minero de Espana - Foglio 696 Valencia (Burjasot)] indica per l'area oggetto di studio un ventaglio alluvionale di tipo deltaico con argilla sabbiosa rosa e depositi fluviali; verso la costa predominano le sabbie, mentre al confine con il torrente Carraixet a nord sono presenti limi grigio-marroni e depositi di arena e ghiaia (Fig. 159).

Infatti, già gli antichi erano a conoscenza di questo limite nord e non è un caso se le sequies e l'Horta sono state realizzate a partire dal limite in cui inizia il suolo argilloso di ottima qualità per la coltivazione, escludendo le aree di glacis calcareo a nord del Carraixet e i terreni rocciosi a sud dell'Horta Sud.

Storicamente i contadini hanno, altresì, migliorato la tessitura dei suoli introducendo sabbia marina per incrementare il drenaggio e la fertilità dei suoli.

La morfologia generale del territorio è pianeggiante, con una lieve pendenza naturale verso il mare sufficiente ad evitare ristagni idrici e a permettere la distribuzione gravitazionale delle acque: proprio questa orografia del terreno ha fatto si che il sistema tradizionale di

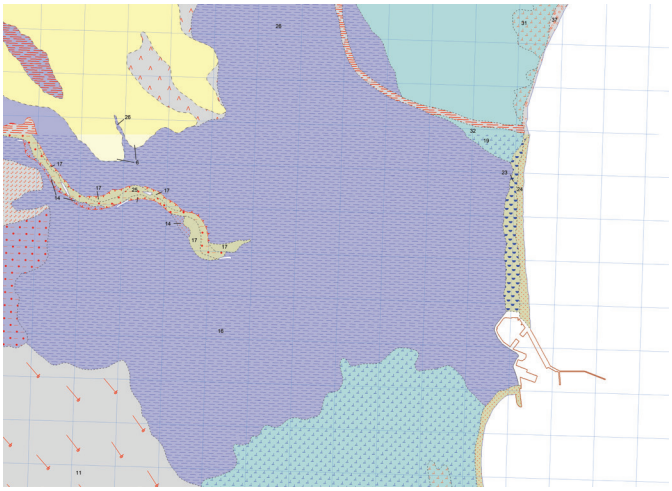


Fig. 159 | Stralcio Carta Geologica di Valencia 1:50.000, Foglio 696 "Burjasot" e 772 "Illa del Toro"[Istituto Geologico y Minero de Espana]

irrigazione venga utilizzato ancora oggi.

Sulla genesi dell'Horta esistono due interpretazioni principali. Alcuni studiosi fanno risalire le origine dell'Horta valenciana alla fondazione della città di *Valentia* nel II sec. a.C. durante il dominio romano, mentre altri attribuiscono l'attuale configurazione alle innovazioni introdotte dalla società medievale islamica (al-Andalus) tra l'VIII e il XIII secolo, che si ritiene introdussero nel mediterraneo una gestione innovativa delle acque e la rete di canali irrigui [Esquilache (2018)].

Il sistema idraulico costituisce, infatti, l'ossatura funzionale del paesaggio dell'Horta. Le 8 *sequies* principali:

- Sequia Reial de Montcada
- Sequia de Quart, Benager i Faitanar
- Sequia de Tormos
- Sequia de Mislata
- Sequia de Mestalla
- Sequia de Favara
- Sequia de Rascanya
- Sequia de Rovella

si dividono, mediante partitori *de llengua*, in canali secondari (*filloles, files, rolls...*) che portavano l'acqua alle *alqueries*, disegnando sul territorio una maglia ortogonale con struttura

ad albero.

L'infrastruttura irrigua è costituita dal reticolo di canali aperti e da opere di regolazione (piccole porticine non stagne) che consentono una ripartizione controllata dell'acqua (Fig. 160). Queste aperture permettono una percolazione minima e costante anche quando sono chiuse, caratteristica che rende il sistema efficiente anche senza ricorrere a pompe o dispositivi meccanici per la distribuzione continua dell'acqua nei campi.

La rete viaria originaria dell'Horta è stata in gran parte cancellata o sovrapposta da nuove reti viarie dalla seconda metà del XX secolo e sono sopravvissuti solamente alcuni tracciati medievali isolati che conducono alle parcelle interne. Tra le vie scomparse è da segnalare la Via Augusta che attraversava Valencia e la sua Horta e della quale non rimangono frammenti nell'Horta Nord.

Fig. 160 | Esempio di opera di regolazione e partizione dell'acqua nei canali irrigui dell'Horta [20-07-2025]



Il territorio è classificato come area non edificabile con vincoli ambientali, una condizione che incide direttamente sulla possibilità di realizzare interventi di restauro o nuove costruzioni, imponendo limiti e controlli più stringenti (per la normativa di riferimento si rimanda all'Appendice C). [Generalitat Valenciana (2018); Generalitat Valenciana (2018) PAT Huerta de Valencia; Generalitat Valenciana (2018) PATIVEL]

Un'ulteriore criticità è legata alla gestione delle acque reflue: l'assenza di un sistema fognario centralizzato rende necessario che ogni abitazione ricorra a sistemi di depurazione autonomi, così da evitare contaminazioni e preservare i campi agricoli circostanti.

Tipologie edilizie

L'architettura rurale dell'Horta valenciana si definisce in un rapporto biunivoco con il paesaggio agrario: il contesto produttivo e idraulico condiziona forma, materiali e soluzioni costruttive delle abitazioni contadine, mentre queste ultime contribuiscono a modellare e rendere riconoscibile il paesaggio. [Del Rei (2024)]

Questa interdipendenza si traduce nelle soluzioni costruttive e negli apparati decorativi coerenti con la disponibilità locale delle risorse (argilla, ghiaia, ciottoli del torrente Carraixet, canne, legno) e con le pratiche agricole e le condizioni climatiche dell'Horta.

Nei materiali da costruzione locali emergono pietre e ciottoli provenienti dal letto del torrente Carraixet e depositi ghiaiosi, impiegati sia macinati per la produzione delle malte che come elementi lapidei nella muratura. Analogamente, ceramiche e laterizi rinvenuti e prodotti in zona sono realizzati con l'argilla locale, coerentemente con la disponibilità di questa risorsa nel territorio.

Seconda la tradizione valenciana le superfici esterne erano spesso protette da una *pintura a la cal* (a base di calce): la sua porosità permetteva alle superfici murarie di "respirare", ma la limitata resistenza agli agenti atmosferici ne richiedeva frequenti rinnovi o l'aggiunta di latte, siero di latte o sego per migliorarne

la durabilità e il colore. Dalla miscela di calce viva e latte nasce la *pintura a la caseina*, che, una volta asciutta, si trasforma in caseinato di calce insolubile e conferisce alle superfici caratteristiche impermeabili. [Mileto (2007)]

La *barraca* costituisce il modulo abitativo originario e più semplice dell'Horta valenciana: una struttura essenziale, realizzata con materiali vegetali e copertura a due falde, pensata per rispondere in modo elementare alle esigenze abitative di contadini e pescatori (Fig. 161).

La sua esistenza è documentata sin dal XIII secolo e la denominazione "*barraca mora o moruna*" ne sottolinea il legame culturale con le popolazioni arabe.



Fig. 161 | Esempio di barracas valenciana [Valencia en Blanco y Negro (2020)]

Per la precarietà dei materiali (paglia, canne, fango, poche travi lignee) e per l'abbandono conseguente al trasferimento delle famiglie nei centri urbani, oggi è difficile reperire informazioni e *barracas* valenciane autentiche [Arazo (1978); Hernandez (2024)]. Molte *barracas* sono state abbandonate al degrado o riutilizzate come magazzini per attrezzi o la conservazione dei raccolti, ma nonostante ciò rappresentano, nell'immaginario collettivo, un carattere culturale e identitario di grande valore.

Tipologicamente la *barraca* si configura come un volume a pianta rettangolare (circa 9x5,5 m) con pareti laterali basse (alte circa 2,5 m) e un tetto acuto a due falde.

Le pareti erano realizzate con mattoni di fango e paglia (40x35x6 cm) lasciati essiccare al sole. Per proteggere i paramenti murari dall'azione degli agenti atmosferici, le murature venivano intonacate e imbiancate a calce con spessori fino a 5 cm, mentre la copertura veniva fatta sporgere di circa 70 cm oltre il filo della muratura per proteggere le pareti dall'acqua. La vulnerabilità alla pioggia e all'umidità fece sì che venne regolamentata persino la distanza laterale tra *barracas* contigue. [Del Rei (2024)].

Le murature non avevano fondazioni e venivano rinforzate con tronchi di gelso o pioppo conficcati nel terreno che fungevano anche da supporto per la *cadorsa* (trave lignea di 18x16 cm) che fungeva da piano di imposta per le travi del tetto. La copertura era realizzata con un incannucciato poggiato sulle travi e tenuto fermo da listelli superiori.

Le pareti di testa (anteriore e posteriore) erano realizzate con canne o giunchi ricoperti di fango e fissati con chiodi a delle travi trasversali dette *trencatous*.

Le *barracas* venivano realizzate con un orientamento est-ovest, studiato per massimizzare l'irraggiamento solare su una falda e minimizzarlo sull'altra; tale orientamento, combinato con il regime dei venti costieri (est-ovest) e le aperture sulle facciate di testa, garantiva un controllo naturale della ventilazione e della temperatura interna, rendendo la *barraca* un esempio di architettura vernacolare bioclimatica. [Del Rei (2024)]

La distribuzione interna era semplice e funzionale (Fig. 162): un corridoio centrale, o laterale, percorreva l'intera lunghezza dell'edificio e ai suoi lati erano disposte le camere; sul retro c'era la cucina con la scala per accedere al soppalco, spazio destinato alla conservazione dei raccolti, al riposo invernale o all'allevamento dei bachi da seta.

All'esterno erano generalmente presenti pergolati, pozzi, forni, cucine, lavatoi o edifici ausiliari (magazzini, stalle), che replicavano la forma e le tecniche della *barraca*.

Coerentemente con lo sviluppo dell'economia locale e dell'organizzazione sociale, le *barracas* lasciano progressivamente spazio alle *alquerias*.

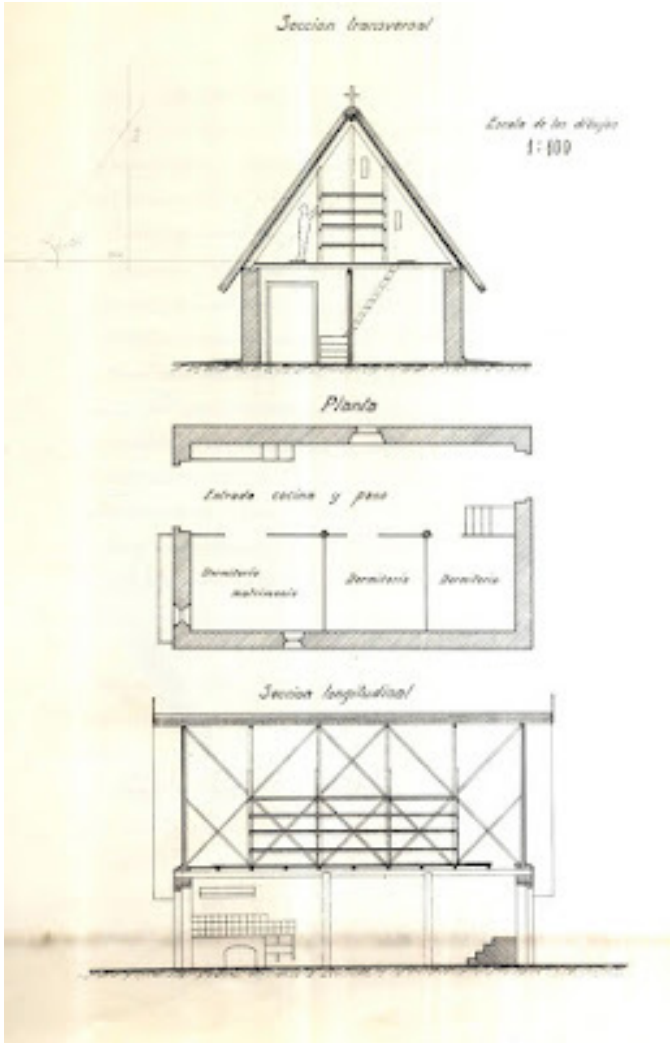


Fig. 162 | Esempio della configurazione spaziale di una barraca valenciana [Valencia en Blanco y Negro (2020)]

L'*alquerìa*, dal termine arabo *al-quarya* (*carya* = villaggio, borgo, piccolo insediamento), nasce in epoca musulmana come un aggregato rurale costituito da un insieme di abitazioni rurali corredate da forno, mulino e altri edifici funzionali all'attività produttiva agricola.

Dopo la conquista di Giacomo I nel XIII secolo, il significato e la funzione dell'*alqueria* si trasformano progressivamente e iniziano ad inserirsi in un sistema di proprietà signorile con coloni o fittavoli incaricati della gestione dell'edificio e delle terre annesse.

Tra XV e XVI secolo questo carattere si rafforza e alcune *alquerias* assumono l'aspetto di veri e propri palazzi rurali di matrice gotica. [Arazo (1978); Hernandez (2024)]

Tra il XIX e l'inizio del XX secolo si registra un'ulteriore fase evolutiva. L'*alqueria* si trasforma in una vera e propria *casa de huerta*, espressione di una proprietà agricola più stabile e strutturata, riconoscibile anche nell'impiego di materiali più durevoli, come laterizi cotti e pietre di fiume. In questo periodo la borghesia si fa promotrice della realizzazione di molte delle *alquerias* tuttora esistenti.

L'evoluzione sociale e culturale del Novecento ha però determinato un progressivo abbandono di queste strutture, che prive di qualsiasi forma di tutela, sono giunte ai giorni nostri con importanti alterazioni dovute ai nuovi usi funzionali (magazzini, deposi...) o in condizioni di marcato degrado.

Nel territorio di Alboraya le *alquerias* che si sono conservate fino ai giorni nostri sono numerose, ma la maggior parte risulta disabitata, trasformata a uso agricolo o logistico, e caratterizzata da uno strato di grave degrado.

Sebbene le *alquerias* potessero differenziarsi esternamente per via degli apparati decorativi, all'interno seguivano un prototipo planimetrico ricorrente, legato alle dimensioni e alla forma del lotto in cui sorgevano, distinguendosi in:

- ***Casa a dos mans* (casa a due mani):** piano terra organizzato intorno ad un accesso centrale costituito da un grande portone, con camere disposte simmetricamente sui due lati. A questo primo corpo si addossava un volume più ampio destinato alla sala da pranzo con camino, alla dispensa e all'eventuale scala per il piano superiore. Il cortile interno era funzionale alle funzioni domestiche o all'allevamento di piccoli animali.
- ***Casa a una mà* (casa a una mano):** tipologia adottata nei lotti più stretti; la distribuzione planimetrica prevede un corridoio laterale e camere disposte su un unico lato.

Accanto alle *barracas* e alle *alquerias*, l'*Horta de Valencia* presenta ulteriori tipologie edilizie minori che testimoniano la stretta relazione tra architettura rurale e processi produttivi. Tra queste occorre citare le *casetes* o *masets*.

Queste architetture rappresentano la forma abitativa più umile dell'Horta, tradizionalmente costruite nei campi di seccaggio, spesso lontani dai nuclei urbani. Erano utilizzate dai contadini come rifugio temporaneo per una o due notti durante i periodi della semina e della raccolta.

Oggi queste strutture sopravvivono con funzioni residuali legate alla preparazione dei pasti, ripari durante i temporali o piccoli magazzini per attrezzi e utensili agricoli. Mentre, le casetes di dimensioni maggiori, dotati di pergolato e cisterna, sono state talvolta riqualificate e trasformate in chalet o abitazioni stagionali.

Dal punto di vista tipologico sono caratterizzati da una pianta rettangolare di circa 6x12 m, organizzata in una sala d'ingresso dalla quale si accede a destra alla cucina (*llar*) e a sinistra a una piccola camera da letto, con una stalla nel retro.

Le tecniche costruttive sono semplici e basate sull'uso di materiali disponibili in loco: murature in pietra di cava o alluvionale legata con calce e argilla, soffitti con travi di pioppo, incannucciato e tegole arabe. Sono generalmente imbiancate a calce o decorate con pigmenti naturali come ocra o terra di Siena e spesso arricchite da cornici intorno a porte e finestre.

5.8.1.2 Evoluzione storica e architettonica

L'Alqerìa "4 Camins", censita dall'Institut Cartogràfic Valencià come "Ca Montanyana" in riferimento all'omonima famiglia che a metà del

Fig. 163 | Tavola di inquadramento territoriale dell'Alqueria "4 Camins" [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

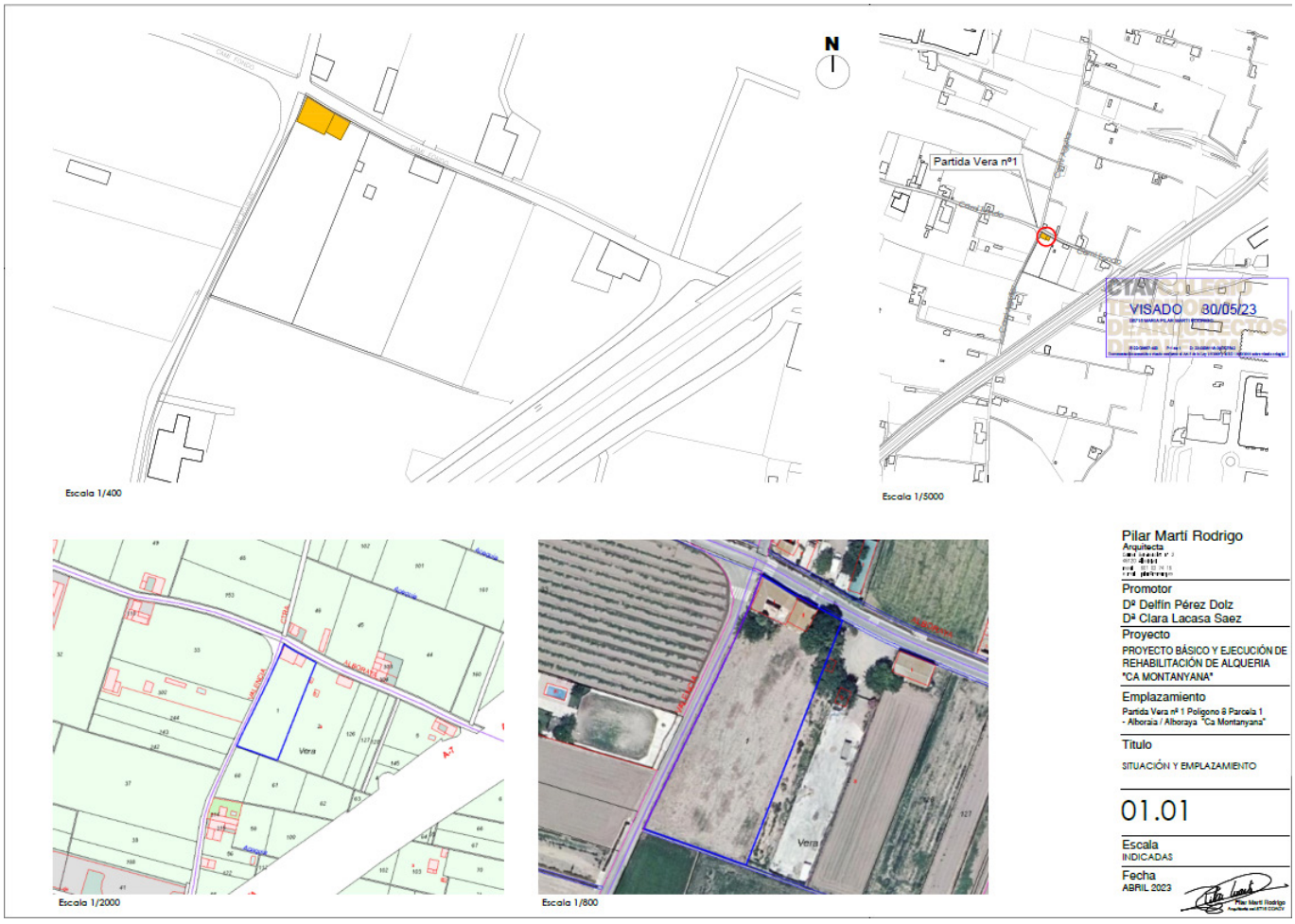




Fig. 164 | Tracce dell'antico basolato della Travessera de Vera [10-09-2025]



Fig. 165 | Schematizzazione dei volumi e delle rispettive fasi di costruzione dell'edificio

Novecento gestiva un ristorante alla Patacona che diede il nome alla costa di Alboraia, è un complesso rurale stratificato che sintetizza le fasi evolutive delle alquerias.

L'edificio sorge nella *Partida de Vera* del comune di Alboraia, su un lotto rettangolare di circa 3.180 m², di cui una superficie costruita di 236,60 m² al piano terra e 223,91 m² al primo piano (Fig. 163).

L'accesso principale avveniva dal Camí Fondo, asse viario storico che collega il centro urbano di Alboraia con il quartiere costiero della Patacona, e quello secondario dalla Travessera de Vera, un tracciato di origine medievale (XIV secolo) il cui antico basolato è ancora leggibile sotto l'attuale asfalto (Fig. 164). Il fronte nord-occidentale confina direttamente con la proprietà agricola di pertinenza, confermando il rapporto diretto dell'edificio con il paesaggio colturale.

Il primo impianto dell'alqueria (volume 1), databile tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo, presenta il tipico schema planimetrico della "*casa a dos mans*" (accesso e asse distributivo centrale, ambienti simmetrici laterali) (Fig. 165). A supporto di questa datazione vi sono le tracce di pavimentazione ceramica e la stessa configurazione planimetrica, tipica del periodo.

Nel corso del Novecento il nucleo originario è stato ampliato per far fronte alle nuove esigenze abitative e produttive con l'aggiunta di altri due volumi. L'abbandono definitivo dell'alqueria risale alla metà dello stesso secolo.

Le fasi costruttive sono state ricostruite attraverso la lettura stratigrafica e tecnico-costruttiva dell'edificio: le murature, pur essendo realizzate tutte con laterizi pieni, variano per le tessiture murarie e l'eterogeneità dei giunti di allettamento; le giunzioni murarie mostrano apposizioni anziché continuità strutturali e la tipologia delle coperture evidenzia una chiara eterogeneità (fronte est con copertura lignea a due falde e manto di tegole, porzioni laterali con falda singola e parti centrali con tetto piano calpestabile), elementi coerenti con fasi costruttive diverse.

Particolarmente interessante sono l'eterogeneità delle chiusure orizzontali intermedie. Nel volume 1 si conservano solai tradizionali con travi lignee e voltine in laterizio, nel volume 2 è presente un solaio unidirezionale in laterocemento e nel volume 3 un solaio ligneo a doppia orditura.

L'inserimento del terzo volume in posizione subordinata e adattiva rispetto agli altri due volumi conferma che quest'ultimo rappresenta l'ultima fase costruttiva dell'alqueria.

Prima degli interventi di restauro e rifunzionalizzazione il complesso si configurava come un organismo edilizio articolato in tre volumi contigui, ciascuno con piano terra e primo piano.

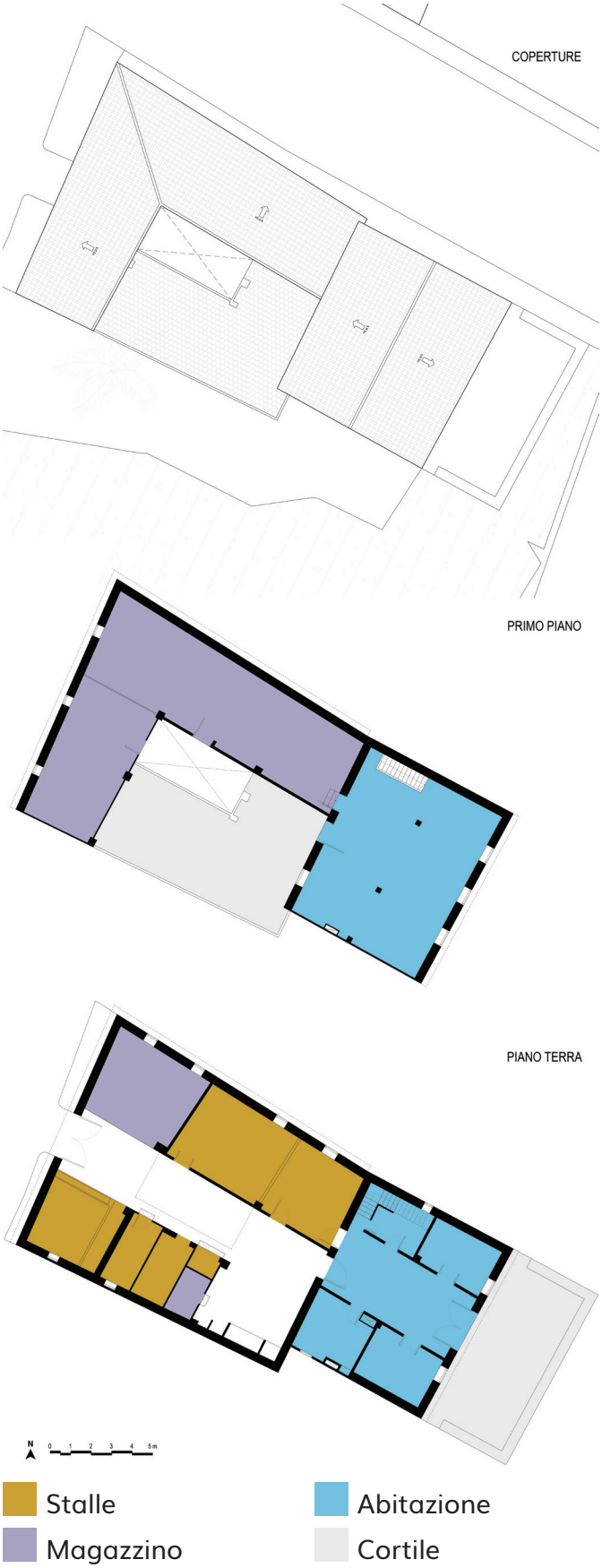
Al piano terra si concentravano le funzioni abitative e di servizio, mentre il primo piano

ospitava l'*andana*, spazio destinato allo stoccaggio di materiali e attrezzi agricoli. Un piccolo cortile scoperto, protetto da un portico e dotato di pozzo, costituiva il nodo distributivo degli ambienti (Fig. 166).

Il primo volume, posto sul fronte est, svolgeva la funzione di ambiente di rappresentanza e d'ingresso; il secondo volume, in continuità spaziale con il precedente, presentava l'aggiunta di un corpo a terratta; il terzo volume, ad ovest, era caratterizzato da un portico a tre fornici e due contrafforti.

Dal punto di vista tecnico-costruttivo, l'edificio presentava un sistema di murature portanti in laterizio pieno. I solai, laddove conservati, mantenevano le tipologie costruttive tipiche della tradizione valenciana con coperture caratterizzate da una doppia orditura lignea rivestita da un manto di tegole e solai intermedi realizzati con travi in legno e voltine in laterizio.

Fig. 166 | Planimetrie funzionali dello stato di fatto



5.8.2 Diagnosi preliminare

5.8.2.1 Metodologia diagnostica

Durante la campagna diagnostica e conoscitiva preliminare condotta nel 2022 è stato adottato un approccio integrato finalizzato a definire le condizioni termo-igrometriche, meccaniche e geotecniche dell'organismo edilizio e del suo contesto.

Le attività *in situ* hanno combinando rilievo visivo e fotografico, misurazioni strumentali con termo-igrometro a contatto (modello Stanley STHT77300) e prospezioni geotecniche.

Il rilievo visivo e fotografico ha consentito la mappatura organica dello stato di conservazione generale dell'edificio: morfologia del quadro fessurativo, distribuzione delle superfici degradate, presenza di interventi impropri e localizzazione puntuale delle criticità.

Le misure termo-igrometriche, eseguite il 2023-01-30 a circa 50 cm dal piano di campagna, sono state impiegate per una valutazione del contenuto umido nei paramenti murari e negli elementi lignei in corrispondenza delle aree critiche.



Fig. 167 | Stato di degrado dell'Alqueria [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]



Fig. 168 | Stato di degrado dell'Alqueria [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

Fig. 169 | Stato di degrado dell'Alqueria [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]



Interpretazione delle % di umidità	
Valore %	Interpretazione
0 - 0,5%	Muratura asciutta
0,5 - 1%	Muratura leggermente umida
1 - 1,5%	Muratura umida
1,5 - 2%	Muratura molto umida

La campagna geotecnica, condotta dalla società SIGMA, è stata eseguita con una sonda rotativa con profondità di 7 m e due penetrazioni dinamiche a rifiuto (profondità massima 8,6 m), restituendo il profilo stratigrafico del sottosuolo e il livello piezometrico della falda superficiale.

Con il prelievo di acqua di falda e le successive prove di laboratorio si è, inoltre, determinata la classificazione dell'acqua rispetto alla sua aggressività verso i materiali da costruzione.

La selezione e l'integrazione delle diverse tecniche diagnostiche sono state funzionali alle problematiche ipotizzate dall'osservazione del contesto: la prossimità della Séquia del Camì Fondo e la natura pedologica del sito richiedevano prove documentata della presenza di falda e della permeabilità del suolo, mentre le misure termo-igrometriche erano indispensabili per mettere in relazione i fenomeni di degrado osservati con le condizioni termo-igrometriche reali.

5.8.2.1 Stato di conservazione

Le risultanze del rilievo visivo e fotografico, condotto come prima fase della campagna conoscitiva, hanno documentato un quadro di degrado diffuso: distacchi e sollevamenti delle pavimentazioni del piano terra, rigonfiamenti, esfoliazioni, alterazioni cromatiche e distacchi delle finiture superficiali, nonché la presenza di patine biologiche (Fig. 167-168-169-170).

All'esterno, il dissesto delle pavimentazioni e il degrado del margine del canale sono stati associati anche all'azione meccanica delle radici di una mimosa nel cortile est, mentre la palma Washingtonia prossima alla facciata sud è stata segnalata come fonte di tensioni locali sui paramenti murari. È stato inoltre rilevato che il traffico di mezzi pesanti sul Camì Fondo e nell'incrocio "4 Camins" genera vibrazioni che favoriscono la propagazione delle lesioni nelle porzioni più fragili della muratura.

Le ispezioni delle coperture hanno evidenziato dissesti localizzati del tavolato e due falde particolarmente compromesse: la falda che scarica verso il Camì Fondo mostrava danni aggravati dall'assenza di un sistema di smaltimento delle acque meteoriche, condizione indicata nella relazione degli architetti come causa principale degli accumuli idrici ripetuti contro il muro di testa.

L'ispezione strutturale ha rilevato fenomeni di marcescenza e un'importante flessione nelle travi di colmo dell'andana, perdita di sezione lignea e l'inserimento di travi metalliche improprie che hanno generato eccentricità di carico sulle teste dei pilastri (Fig. 171). Tali osservazioni sono coerenti con l'azione combinata di infiltrazioni d'acqua ripetute, che hanno favorito anche il degrado biologico del legno, e di condizioni di carico non ottimali nei nodi. Da segnalare anche attacchi da xilofagi e termiti che si inseriscono come fattore aggravante nella perdita di integrità degli elementi lignei.

Le indagini termo-igrometriche (Fig. 172) hanno confermato un elevato contenuto d'acqua all'interno dei paramenti murari e degli elementi lignei; il confronto con le morfologie di degrado ha reso compatibile tale umidità con le infiltrazioni nella copertura e con la presenza di risalita capillare, soprattutto sui prospetti esposti verso i campi coltivati e la séquia.

Fig. 172 | Localizzazione delle indagini termo-igrometriche

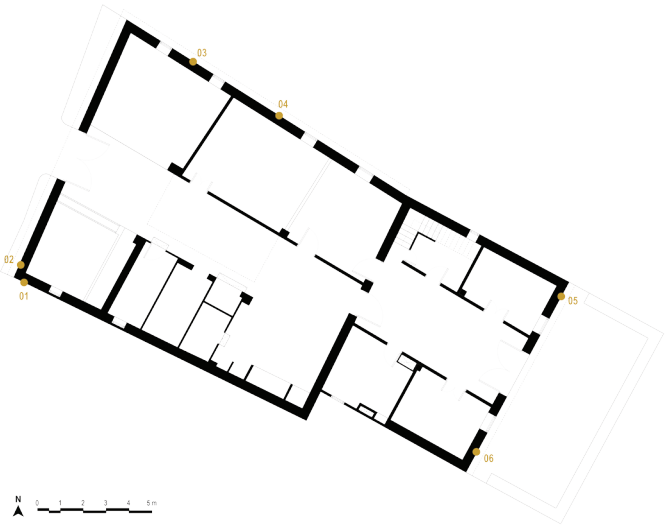




Fig. 170 | Stato di degrado dell'Alqueria [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

Fig. 171 | Stato di degrado dell'Alqueria [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]



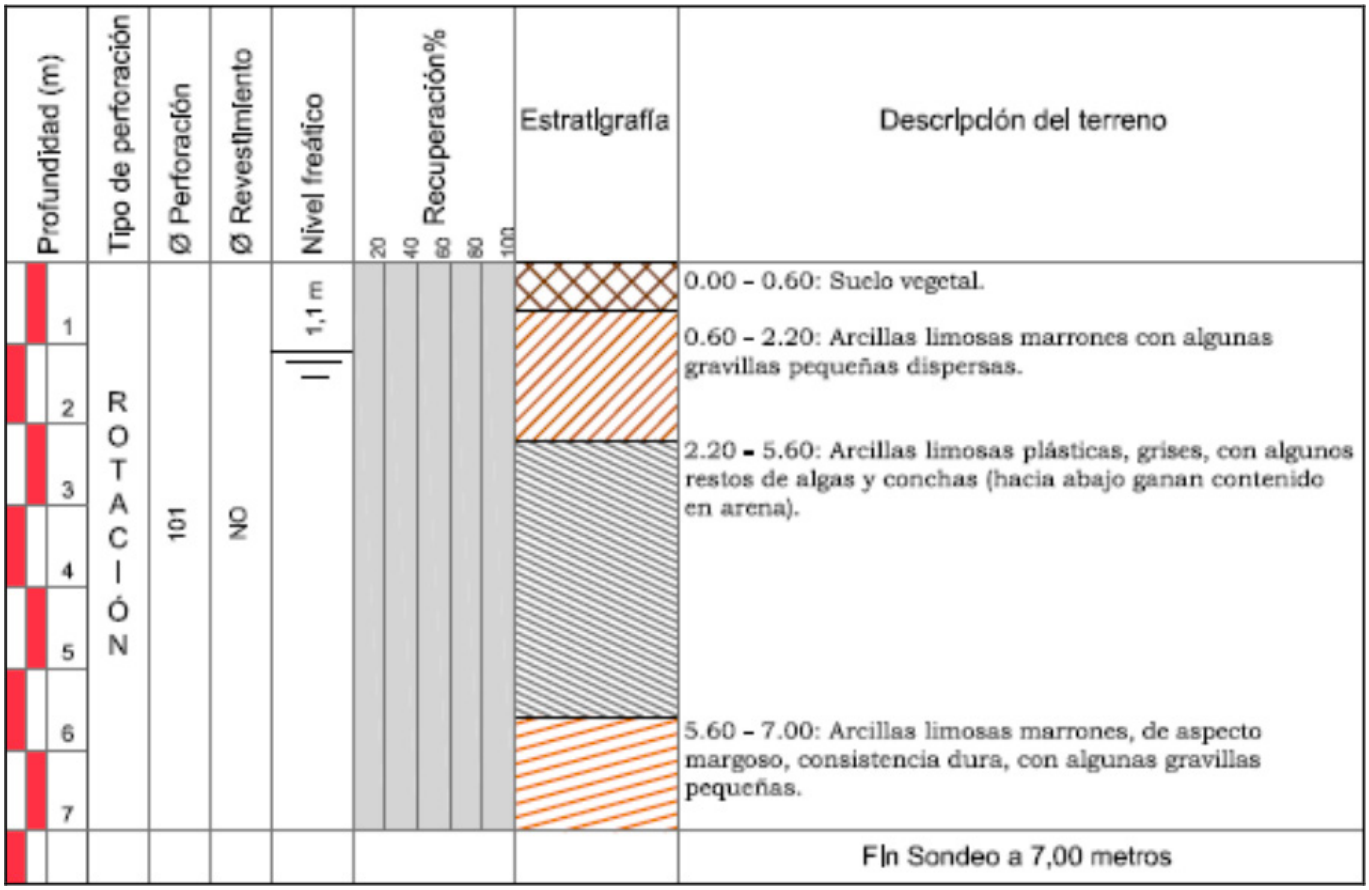


Fig. 173 | Ricostruzione del profilo geologico del terreno rilevato con le prospezioni geotecniche [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

	30/01/2023	
	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]
1	1,8	19
2	2,0	19
3	> 2,0	19
4	> 2,0	19
5	0,8	19
6	2,0	19

A queste evidenze strumentali sono state integrate le prospezioni geotecniche e le prove di laboratorio sui campioni di terreno ed acqua di falda. Il profilo geologico restituito (Fig. 173) è caratterizzato da uno strato di terreno vegetale di 0,6 m, uno strato di argilla limosa e torba con elevata componente organica tra 2-3 m e un banco di argilla compatta con ghiaia a partire da 5,6 m ed un coefficiente di permeabilità del terreno pari a $1x10^{-8}$ cm/s. Il livello piezometrico della falda è stato individuato a circa 1,1 m sotto il piano di campagna, con oscillazioni fino a 0,5m.

Le analisi di laboratorio hanno classificato l'acqua di falda come mediamente aggressiva nei confronti del calcestruzzo (XC1+XA2), mentre il terreno è stato definito non aggressivo (ambiente XC1).

Le classi di esposizione citate (XC, XA) sono definite dalle UNI EN 206:2021 (Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità) e UNI EN 1992-1-1:2024 (Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1-1: Regole generali e regole per edifici, ponti e strutture di ingegneria civile) e correlano l'ambiente di aggressione con i requisiti di durabilità del cls. Le classi XC si riferiscono a rischio di corrosione per carbonatazione: XC1 indica condizioni relativamente poco severe (ambiente asciutto o permanentemente bagnato, limitato rischio di carbonatazione); le classi XA indicano aggressività chimica del terreno o dell'acqua (XA2 definisce un ambiente

a aggressività moderata).

L'incrocio tra dati geotecnici, misure termo-igrometriche e rilievi fotografici fornisce una spiegazione coerente dei fenomeni osservati: la presenza di strati argillosi, la falda a profondità ridotta e il basso coefficiente di permeabilità favoriscono il ristagno e la mobilità capillare, facilitando la risalita capillare dell'acqua verso le fondazioni e le strutture di elevazione.

In assenza di un pacchetto anti-umidità e di drenaggi efficaci, l'umidità attiva si manifesta con i danni alle pavimentazioni, agli intonaci e alle finiture documentate nei rilievi iniziali.

Inoltre la coesistenza, nei solai intermedi, di sistemi tradizionali (travi in legno con voltine in laterizio) e porzioni rimaneggiate in laterocemento ha introdotto discontinuità meccaniche e termo-igrometriche che possono aver contribuito alla formazione e propagazione di fenomeni fessurativi nelle murature interessate.

Infine, il lungo periodo di abbandono e l'assenza di manutenzione hanno favorito il consolidarsi di tutti i fenomeni descritti, riducendo la resilienza del fabbricato e trasformando criticità localizzate in problematiche diffuse.

5.8.3 Il progetto di risanamento

Il progetto di restauro e rifunzionalizzazione dell'Alquerìa "4 Camins" ha come obiettivo primario il recupero di una funzione residenziale conforme alle esigenze dei committenti, preservando al contempo l'identità tipologica e materica dell'organismo edilizio e la sua relazione con il paesaggio agrario circostante.

L'approccio adottato concilia conservazione e innovazione: si privilegia il recupero e il riuso dei materiali originari, si rimuovono in modo mirato gli elementi incompatibili e si integrano tecnologie contemporanee per garantire comfort e durabilità senza compromettere la leggibilità storica dell'alquerìa.

La proposta organizzativa (Fig. 174) prevede due unità abitative distinte, l'unità A nei volumi 1 e 2 e l'unità B nel volume 3, ciascuna distribuita

Fig. 174 | Planimetrie funzionali dello stato di progetto

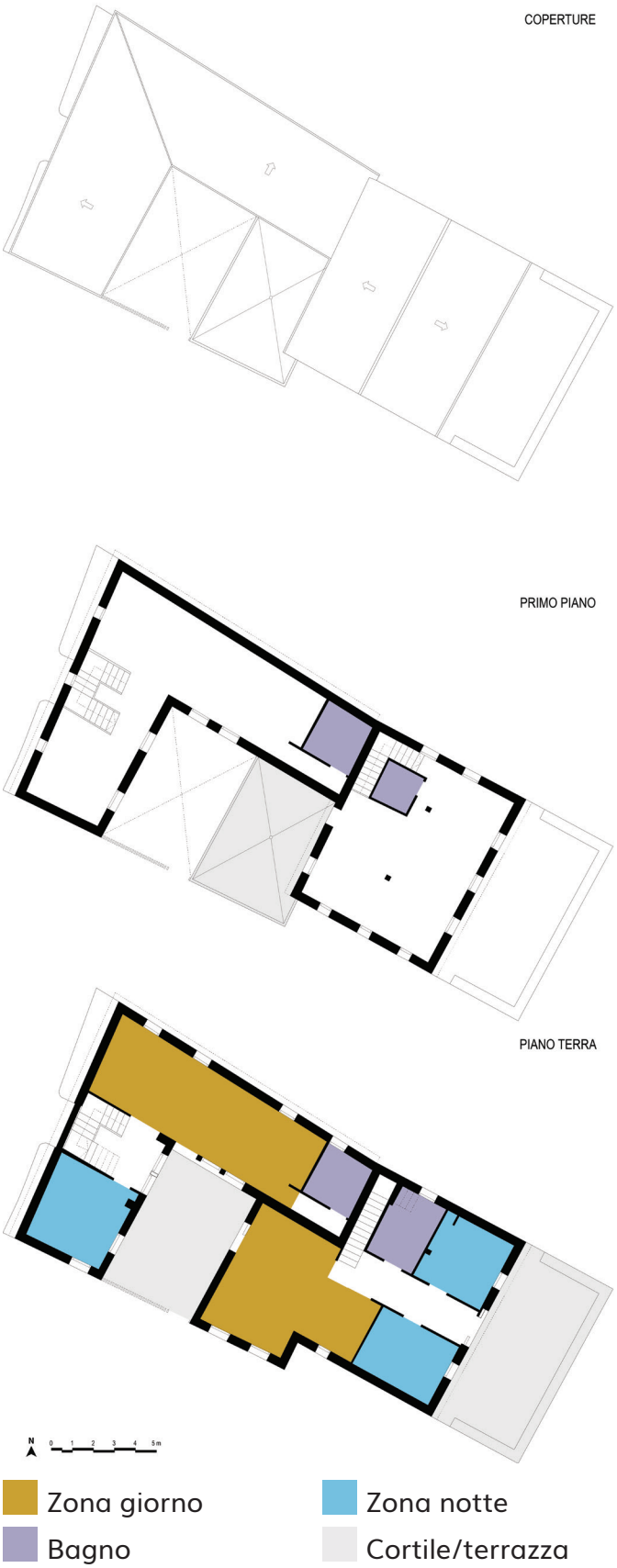




Fig. 175 | Render di progetto [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]



Fig. 176 | Render di progetto [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

su due livelli.

Al piano terra sono previste le zone giorno con configurazione open-space, due camere, un bagno e uno studio. Il primo piano viene lasciato prevalentemente libero con un bagno di servizio e, per l'unità B, l'accesso alla terrazza.

Per valorizzare il cortile centrale, concepito come nucleo distributivo e microclimatico, è stata predisposta la demolizione parziale di una parte del volume 2.

Dal punto di vista compositivo il progetto mira a recuperare l'immagine tradizionale dell'alqueria attraverso la restituzione della verticalità e della gerarchia delle aperture e la riaffermazione del fronte verso l'orto e dell'accesso laterale attraverso il portico. Tali scelte, oltre a ricostruire la lettura tipologica dell'edificio, sono funzionali a migliorare l'illuminazione e la ventilazione naturali, ad incrementare la qualità degli spazi e a ristabilire la connessione alqueria-campo che definisce l'identità del manufatto (Fig. 175,176).

Dal punto di vista tecnico-prestazionale, per garantire la durabilità dell'intervento si è ritenuto essenziale affrontare in via prioritaria le cause del degrado, in particolare le diverse forme di umidità, prima di procedere con gli interventi di adeguamento funzionale. Le criticità emerse dalla fase diagnostica sono tradotte nei seguenti obiettivi operativi:

- Eliminare o limitare le vie d'ingresso dell'acqua (risalita capillare, contatto con la séquia, deflussi meteorici) al fine di ridurre il contenuto igrometrico attivo nelle strutture
- Stabilizzare le fondazioni in relazione ai nuovi carichi e alle caratteristiche del sottosuolo
- Adeguare la capacità portante delle chiusure orizzontali
- Recuperare il comfort abitativo e la salubrità interna con isolamento, impermeabilizzazioni e finiture traspiranti
- Minimizzare gli interventi invasivi, privilegiando soluzioni mirate
- Privilegiare materiali e sistemi compatibili con le tecniche e i materiali tradizionali

A integrazione di questi obiettivi, il progetto prevede opere di sistemazione della nuova rete fognaria collegata al depuratore, la ricostruzione del margine del canale e la realizzazione di un pozzetto di troppo pieno.

Il risanamento igrometrico è stato assunto come condizione abilitante e filo conduttore dell'intervento. La diagnosi preliminare aveva infatti evidenziato come la presenza di umidità da risalita capillare interessasse l'intero organismo edilizio e avrebbe vanificato

qualsiasi rinforzo strutturale o finitura senza un trattamento preventivo e sistematico.

Le misure adottate sono state organizzate in un pacchetto integrato che combina: opere di gestione delle acque superficiali e di sottosuolo, chiusure orizzontali di base atte a interrompere e deviare i flussi capillari, interventi chimici per l'interruzione capillare, accorgimenti volti ad accelerare l'evaporazione del contenuto umido e soluzioni locali di barriera dove il contatto diretto con la sequia richiedeva protezioni aggiuntive.

Per le chiusure orizzontali di base è stato eseguito uno scavo sotto la quota di pavimento per l'introduzione del seguente pacchetto tecnologico (Fig. 177-178-179): base di terreno compattato, magrone, sistema "Cavity 5" (elemento a "igloo"); strato di XPS (polistirene estruso) di spessore 4 cm in corrispondenza delle strutture di elevazione, soletta in cls armato HA-25, massetto con malta autolivellante (spessore 5 cm) con impianto di riscaldamento a pavimento, colla cementizia flessibile, pavimentazione in gres.

Il sistema ad igloo "Cavity 5" è stato adottato per realizzare una camera d'aria ventilata collegata all'esterno tramite appositi collettori di ventilazione. Questa soluzione favorisce l'evaporazione dell'umidità da risalita capillare che eventualmente potrebbe arrivare in corrispondenza della chiusura orizzontale di base, oltre ad evitare la risalita di questa umidità verso la pavimentazione. I condotti di aerazione sono stati predisposti con quote differenziate in funzione del rischio idrico esterno; sul fronte confinante con la séquia sono stati elevati rispetto alla quota normale per prevenire l'ingresso di acqua durante le piene.

A completamento del sistema sono stati predisposti drenaggi perimetrali e un pozzetto di troppo pieno nel cortile centrale, volti a convogliare le acque meteoriche e di scolo lontano dal piede delle murature (Fig. 180).

Per la fascia di contatto diretto con il canale e con il terreno circostante è stata, inoltre, prevista l'interposizione di membrane bituminose sovrapposte da lamine in PE come protezione e schermatura aggiuntiva contro

Fig. 177 | Chiusura orizzontale di base. Estratto dalla tavola 15.01 [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

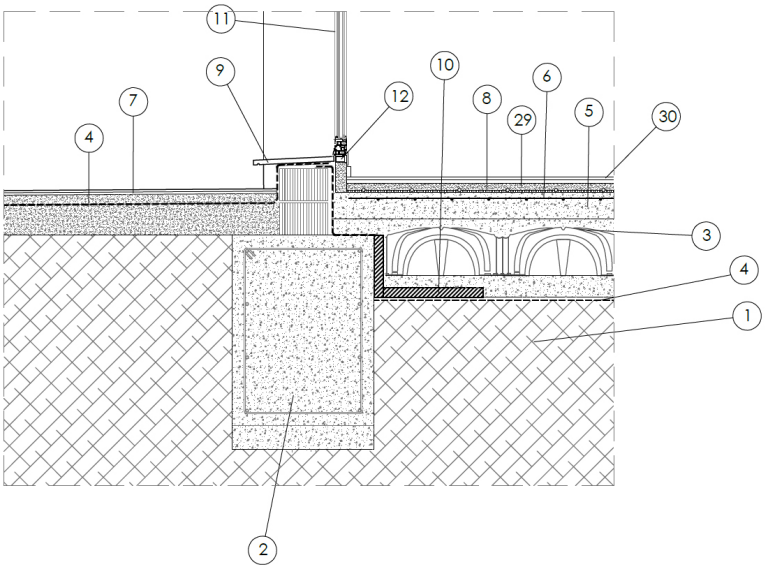


Fig. 178 | Realizzazione delle chiusure orizzontali di base (20-06-2024) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]



Fig. 179 | Impermeabilizzazione della chiusura orizzontale di base (30-05-2024) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]





Fig. 180 | Drenaggio delle acque e pozzetto di troppo pieno (03/11/2025)



Fig. 181 | Impermeabilizzazione delle murature controterra e collettore di aerazione delle COB (08-07-2025)

Fig. 182 | Realizzazione delle barriere chimiche a pressione (16-09-2024) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]



eventuali infiltrazioni perimetrali (Fig. 181).

Per l'interruzione della risalita capillare nelle murature sono state eseguite delle iniezioni chimiche a pressione con con SikaMur InjectoCream-100 (Fig. 182). Le iniezioni sono state praticate su entrambi i fronti murari, esterno ed interno, a circa 50 cm al di sopra del piano di campagna, con profondità variabile in funzione dello spessore murario. A corredo degli interventi chimici è stato applicato un intonacio risanante macroporoso a base di calde (Kerakoll MuroSano) sulle superfici interne ed esterne, al fine di garantire traspirabilità alle superfici murarie e favorire l'evaporazione dell'umidità residua.

Sul fronte nord, confinante con il canale, la parte inferiore del paramento murario è stata trattata con un intonaco impermeabilizzante, mentre la porzione superiore è stata mantenuta con l'intonaco risanante usato sul resto dell'edificio: si stratta di una soluzione puntuale, coerente con la criticità locale, che sacrifica in parte la traspirabilità nella fascia interessata per costruire un'ulteriore barriera fisica contro l'acqua.

A integrazione delle misure passive e chimiche sono stati installati, a scopo cautelativo, sifoni tipo Knapen (Fig. 183) per aumentare il grado di evaporazione nelle zone critiche e come salvaguardia nel caso di efficacia parziale delle altre misure.

Questa sovrapposizione di interventi meccanici, chimici ed evaporativi riflette la filosofia operativa adottata: non affidarsi a una singola soluzione, ma combinare in maniera complementare più strategie.

Per le finiture e il comfort interno, è stata prevista la realizzazione di una controparete autoportante (sistema KNAUF W628) con isolamento in lana minerale (Arena Apta), struttura metallica zincata, doppia lastra in cartongesso e relativo strato di finitura, soluzione pensata per migliorare l'isolamento termo-acustico senza compromettere le murature storiche (Fig. 184).

Parallelamente agli interventi igrometrici sono state eseguite le opere geotecniche e di sottofondazione necessarie ai nuovi carichi

con la realizzazione di fondazioni costituite prevalentemente da travi continue e, dove richiesto per i nuovi supporti puntuali, da plinti isolati.

I solai intermedi ritenuti recuperabili, quelli con travi in legno e voltine meglio conservati, sono stati rinforzati superiormente con una soluzione mista che preserva le travi esistenti. L'intervento ha riguardato la realizzazione di connessioni bullonate alle travi preesistenti e sovrapposizione di uno strato di compressione in calcestruzzo alleggerito HL-25, spessore 5 cm e densità dichiarata 1800 kg/m³ (Fig. 185).

Sulla copertura sono eseguiti rinforzi puntuali: sostituzione parziale delle travi degradate, integrazione con profili UPN laterali bullonati e aggiunta di isolamento termico e strati di impermeabilizzazione, seguiti dal rifacimento del manto di tegole.

Il progetto di risanamento e rifunzionalizzazione segue la logica causa-effetto emersa dall'analisi diagnostica: la priorità è data al controllo fattori di degrado legati all'acqua, quindi al consolidamento delle fondazioni e delle strutture, e infine alla realizzazione delle opere di finitura. Questa sequenza operativa garantisce che gli interventi strutturali e di miglioramento funzionale si svolgano su una base stabile e asciutta, riducendo il rischio di ricomparsa dei degradi.



Fig. 183 | Sifoni Knapen inseriti lungo tutto il perimetro delle murature



Fig. 184 | Controparete autoportante con isolante in lana minerale (22-09-2025)

Fig. 185 | Rinforzo strutturale dei solai intermedi (30-07-2024) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]



5.8.4 Risultati

5.8.4.1 Monitoraggio post-intervento

I lavori di recupero e rifunzionalizzazione dell'alqueria sono tuttora in fase conclusiva e per questo motivo non è stato ancora possibile avviare un monitoraggio post-intervento.

Tuttavia, durante l'intervento, al fine di valutare l'efficacia delle misure adottate contro l'umidità da risalita capillare, sono state comunque eseguite misurazioni termo-igrometriche periodiche delle superfici con un termo-igrometro a contatto (modello Stanley STHT77300).

Le rilevazioni sono state eseguite sempre alla

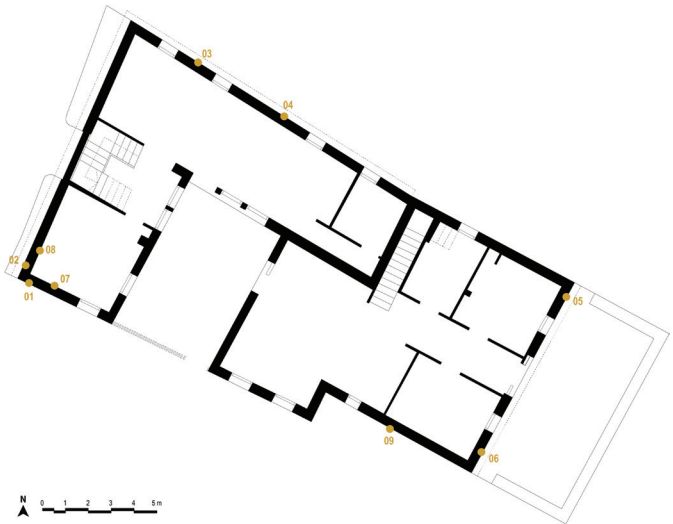


Fig. 186 | Localizzazione delle misurazioni termo-igrometriche

quota di circa 50 cm dal piano di campagna e su sono succedute in più campagne di monitoraggio distribuite lungo l'intera durata dei lavori, dall'apertura del cantiere fino alla fase di quasi chiusura (novembre 2025).

È importante segnalare i limiti metodologici che condizionano l'interpretazione dei dati raccolti. Sebbene si sia mantenuta la stessa quota di misura (≈50 cm), non si è potuto garantire la perfetta ripetibilità dei punti di misura in pianta. I rilievi hanno infatti interessato, in maniera più o meno coerente, le stesse porzioni murarie, ma con punti di osservazione variabili tra una campagna e l'altra. Inoltre, la registrazione dei valori tramite foto del display del termo-igrometro ha reso spesso difficile la localizzazione puntuale del sito di misura sulle planimetrie di rilievo in fase di studio e confronto successivo dei dati.

Per questa ragione sono stati considerate solamente le misurazioni effettuate in punti "più o meno fissi" dell'edificio, riscontrati in tutte le campagne diagnostiche; i dati per i quali non è stato possibile identificare con sufficiente precisione il punto d'origine non sono stati inseriti nelle tabelle riassuntive (Fig. 186, Tab. 10).

Queste condizioni limitano la possibilità di svolgere un'analisi quantitativa rigorosa del trend post-intervento a livello puntuale. Tuttavia, le serie di misure raccolte offrono comunque indicazioni utili a livello qualitativo sull'andamento dell'umidità nelle porzioni più significative dell'edificio.

5.8.4.2 Considerazioni finali

Dal confronto delle misure termo-igrometriche raccolte fino ad oggi emerge un risultato complessivamente positivo (Tab. 10). Nella maggior parte delle porzioni murarie monitorate si è osservata una sostanziale riduzione del contenuto umido, coerente con l'effetto atteso dall'insieme delle misure implementate. Tuttavia il risultato non è omogeneo: permangono valori più elevati e segni visibili di alterazione sul fronte nord-ovest (punto 2) (Fig. 187) e in punti localizzati del prospetto adiacente alla sèquia.

Queste eccezioni, essendo circoscritte, possono ricondursi a cause diverse e/o concomitanti: impregnazione non uniforme delle murature in seguito alle iniezioni chimiche; condizioni di irraggiamento particolarmente sfavorevoli (il fronte nord-ovest è quasi sempre in ombra) che riducono l'evaporazione del contenuto idrico residuo; presenza di sali solubili che catturano l'umidità ambientale; prossimità alla sèquia, che costituisce una fonte locale di apporto idrico persistente.

Tab. 10 | Parametri ambientali rilevati nelle campagne diagnostiche del 2023, 2024 e 2025

	30/01/2023		16/09/2024		20/06/2024		18/12/2024		30/05/2025		03/11/2025	
	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]
1	1,8	19	/	/	0,7	29	0,4	27	0,5	27	0,6	24
2	2,0	19	/	/	1,1	29	0,8	27	0,7	27	0,7	24
3	> 2,0	19	/	/	1,3	30	0,5	27	0,5	27	0,5	24
4	> 2,0	19	/	/	1,5	29	0,5	28	1,3	27	1,2	24
5	0,8	19	/	/	0,7	29	0,6	22	0,6	27	0,6	24
6	2,0	19	/	/	0,8	29	0,5	22	0,5	27	0,5	24
7	/	/	0,7	27	/	/	/	/	/	/	/	/
8	/	/	0,8	26	/	/	/	/	/	/	/	/
9	/	/	/	/	/	/	0,5	28	0,2	27	0,4	24

Sul piano interpretativo va sottolineato che non è possibile attribuire la riduzione del contenuto umido ad un singolo intervento, inoltre l'attribuzione quantitativa dell'efficacia di ciascuna misura richiederebbe protocolli sperimentali o un monitoraggio sperimentale progettato ad hoc.

L'analisi congiunta dei dati, delle lavorazioni eseguite e della sequenza operativa adottata in cantiere indica porta a pensare che il risultato positivo è da ricondurre alla sinergia di misure eterogenee e complementari (gestione delle acque superficiali e di sottosuolo, realizzazione di un vespaio aerato, iniezioni chimiche, drenaggi, intonaci risananti) e, soprattutto, al rigoroso rispetto della sequenza operativa pianificata: diagnosi preliminare; controllo e risoluzione delle fonti d'ingresso dell'acqua; ventilazione naturale degli ambienti e rispetto dei tempi di asciugatura delle murature; realizzazione degli interventi strutturali durante la fase di asciugatura dell'umidità residua; ripristino delle finiture superficiali e delle pavimentazioni.

Una lettura critica delle soluzioni tecniche adottate mette in luce compromessi inevitabili e possibili effetti collaterali che richiedono attenzione e monitoraggio.

L'applicazione puntuale di un intonaco impermeabilizzante nella fascia inferiore della facciata nord (Fig. 188), prospiciente la sequia, risolve in modo efficace ed immediato la problematica locale legata al diretto contatto della muratura con l'acqua del canale. Tuttavia, tale soluzione limita la traspirabilità locale della muratura e, nel lungo periodo, può favorire lo spostamento di sali solubili o il trasferimento di umidità verso le porzioni superiori della muratura. Occorre, pertanto, interpretare tale soluzione come un "sacrificio controllato" e prevedere un monitoraggio mirato delle zone adiacenti per intercettare eventuali "effetti spia".

Il sistema Cavity 5 presenta validità teorica e scientifica nell'arresto della risalita capillare al di sotto della pavimentazione. La sua efficacia pratica, però, è legata ad un corretto piano di manutenzione dell'intero sistema in quanto ostruzioni dei collettori o delle prese d'aria ne ridurrebbero rapidamente l'efficacia.



Fig. 187 | Alterazioni cromatiche sulla facciata nord-ovest (03-11-2025)



Fig. 188 | Facciata nord sulla sequia dove è possibile notare la fascia di intonaco impermeabilizzante alla base della muratura (18-12-2024) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

Per contro, l'adozione dei sifoni Knapen, intervento invasivo e irreversibile, solleva perplessità in termini di efficacia e sostenibilità: come discusso nel paragrafo dedicato alle tecniche contro la risalita capillare, tale metodo è stato ritenuto inefficace e controproducente, pertanto la sua applicazione deve essere valutata con estrema cautela.

Le iniezioni chimiche, seppur efficaci, restano un intervento irreversibile ed invasivo. I loro effetti nel medio-lungo periodo richiedono attente valutazioni in quanto le porzioni di muratura al di sotto del livello d'iniezione tenderanno a saturarsi e a sviluppare degradi



Fig. 189 | Risultato post-interventi di risanamento (12-11-2025)



Fig. 190 | Risultato post-interventi di risanamento (12-11-2025)

Fig. 191 | Risultato post-interventi di risanamento (22-09-2025)



differenziati rispetto al paramento murario superiore. In questo senso le iniezioni vanno considerate uno strumento da utilizzare in casi eccezionali e sempre accompagnati da misure complementari e da un monitoraggio specifico. Inoltre, il loro utilizzo dovrebbe essere evitato nell'edilizia storica.

La scelta di utilizzare finiture traspiranti, in particolare intonaci macroporosi a base di calce naturale per le finiture esterne ed interne, appare coerente con l'obiettivo di favorire l'evaporazione dell'umidità residua e durabilità degli interventi. Inoltre è una soluzione che rispetta la compatibilità storica e materica del substrato originale.

I limiti metodologici del monitoraggio fin qui condotto condizionano, in parte, la solidità delle conclusioni: la mancata ripetitività puntuale delle misure (assenza di rilevazioni eseguite sempre negli stessi punti) e l'assenza di una schedatura sistematica dei dati in planimetria riducono l'analisi a un livello prevalentemente qualitativo e ne compromettono l'affidabilità statistica.

Per distinguere con rigore oscillazioni stagionali da tendenze reali è quindi indispensabile avviare un monitoraggio post-intervento strutturato che preveda punti fissi georeferenziati, campagne ripetute alle stesse condizioni, e l'integrazione di tecniche complementari (es. termografia IR), in modo da ottenere serie temporali confrontabili e spazialmente tracciabili.

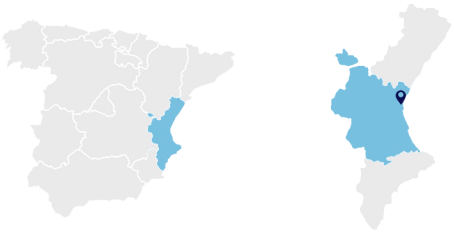
In conclusione, sulla base dei dati disponibili, l'intervento può essere considerato finora efficace, ma non totalmente risolutivo: ha prodotto una riduzione sensibile dell'umidità nella maggior parte dell'organismo edilizio grazie ad un approccio integrato e correttamente sequenziato e, ad oggi, non sono visibili fenomeni di degrado sulle finiture superficiali (Fig. 189-190-191).

Tuttavia, permangono criticità locali e potenziali effetti collaterali, nel lungo periodo, delle soluzioni adottate. Queste incertezza rendono indispensabile un programma di manutenzione e monitoraggio a medio-lungo termine, per verificare la durabilità delle misure e consolidare i risultati ottenuti.

5.9

ALQUERIA “EL TRULL”

5.9 Alqueria “El Trull”



Localizzazione:	Alboraya, Comunidad Valenciana, Spagna
Anno/Epoca di costruzione:	XVI secolo
Tipologia edilizia:	Alquerìa
Destinazione d’uso:	Residenziale
Proprietà:	Privata
Diagnosi e monitoraggio:	Prospezioni geotecniche, analisi dell’acqua di falda, analisi termo-igrometriche
Tecnologia costruttiva:	Murature portanti in laterizio pieno, adobe o pietra naturale, solai in legno o legno e voltine in laterizio



5.9.1 Analisi del contesto

5.9.1.1 Contesto territoriale

L'edificio oggetto di studio si colloca nella *Partida de Saboya*, nel territorio comunale di Alboraya, all'interno della *Huerta de Valencia*. La trattazione generale del contesto territoriale è rimandata al precedente caso studio dell'Alqueria "4 Camins".

L'Alquerìa "El Trull" sorge su un terreno pianeggiante in un'area prevalentemente destinata alla coltivazione di ortaggi. In ques'area gli appezzamenti di terreno si presentano con forme e dimensioni omogenee e gli edifici rurali emergono chiaramente con i loro volumi nel paesaggio agrario; una fitta rete di accessi e sentieri mette in relazione i manufatti e ne favorisce la visibilità e la fruizione.

5.9.1.2 Evoluzione storica e architettonica

Secondo l'*Institut Cartogràfic Valencià* la toponomastrica corrente riporta l'edificio come "*Ca Vicent el Moreno*", mentre le fonti storiche identificano l'alquerìa con il nome tradizionale "*El Trull*".

L'Alquerìa è accessibile dal *Camì de les Vinyes* di Alboraya, che collega il centro del comune con il *barrio de les Tendes* e *de Port Saplaya*, e dalla strada CV-311. Sorge su un lotto rettangolare di 9146 m², di cui 8442 m² di campo coltivato e 473 m² di superficie costruita (Fig. 192).

L'edificio si configura come *Alquerìa* o *Casa de Huerta* ed è il risultato di diverse fasi costruttive documentabili a partire dal XVI secolo fino al suo abbandono a metà del XX secolo.

Il complesso ha pianta trapezoidale irregolare con un orientamento est-ovest ed è composto da quattro corpi accostati, originariamente edifici distinti per epoca e funzione (Fig. 193).

Il primo corpo, rivolto ad est, è un volume a doppia campata su due livelli, con pianta quadrangolare e copertura a due falde con tegole arabe. È la porzione meglio conservata e presenta finiture di carattere borghese (Fig.



Fig. 192 | Lotto e localizzazione dell'Alqueria "El Trull" [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

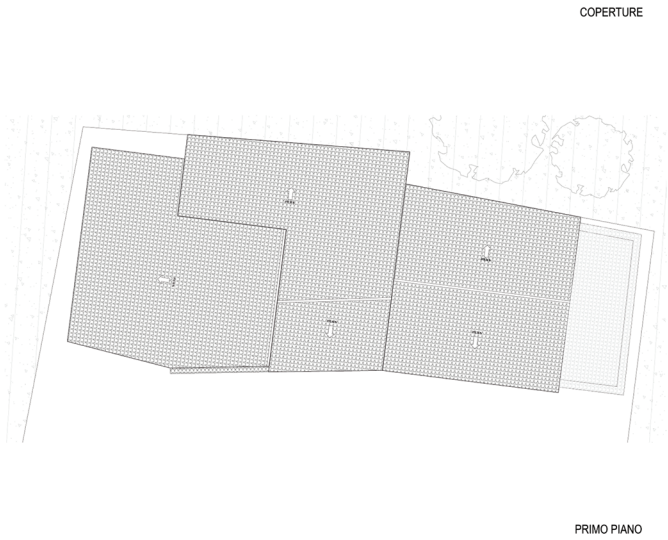


Fig. 193 | Schematizzazione dei volumi e delle rispettive fasi di costruzione dell'edificio [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

Fig. 194 | Interno del volume 1 con finiture di pregio (04-11-2022) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]



Fig. 195 | Planimetrie funzionali dello stato di fatto



194-195), coerenti con un uso come residenza di villeggiatura piuttosto che come abitazione contadina.

Il secondo corpo, con copertura a due falde orientate verso sud, ha una pianta più irregolare e leggermente curva verso la strada adiacente.



Fig. 196 | Mappa catastale del 1883



Fig. 197 | Mappa catastale del 1883

Fig. 198 | Vista sulle facciate Nord ed Est con tracce degli alloggi delle travi del solaio crollato (04-11-2022) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]





Fig. 199 | Muratura in adobe del volume 3 (04-11-2022) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]



Fig. 200 | Stato di conservazione della facciata est dei volumi 2 e 3 (04-11-2022) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

Fig. 201 | Sovrapposizione delle diverse fasi costruttive del volume 3 (04-11-2022) [mmarq]



La sua morfologia fa pensare che questo sia il nucleo più antico dell'Alquerìa. Si sviluppa anch'esso su due livelli, con il piano superiore originariamente adibito a magazzino o a servizi secondari.

Questo corpo è quello che ha subito maggiori trasformazioni legate all'evoluzione architettonica e volumetrica dell'edificio, tra cui l'accorpamento del terzo volume, che ne ha generato una soluzione di copertura atipica.

Il terzo corpo presenta una copertura a falda unica ed è interpretabile come una *porxada* (portico), in seguito chiusa e adattata alle esigenze abitative. La sua morfologia indica un uso destinato al ricovero di cavalli, asini e muli ed è la porzione in condizioni conservative peggiori.

Il quarto corpo, addossato al lato nord del primo volume e attestato nel catasto del 1883 (Fig. 196-197), ha pianta rettangolare. Conserva tracce degli alloggi delle travi e dei punti di ancoraggio dei solai, ma di questo volume restano solamente alcuni lacerti murari (Fig. 198). Anche questo ambiente è assimilabile ad un portico o annesso produttivo dell'abitazione, probabilmente utilizzato per l'allevamento di suini.

Le strutture esistenti riflettono soluzioni costruttive locali orientate all'economicità e all'uso razionale delle risorse. La struttura portante è costituita da murature in adobe (terzo volume) (Fig. 199) e in laterizio pieno (Fig. 200), integrate occasionalmente con pietra arenaria "*de rodeno*". Nel quarto corpo, nelle murature in pietra "*de rodeno*" sono leggibili corsi di livellamento in laterizio pieno (Fig. 198).

I solai intermedi cono realizzati con travi lignee e voltine in laterizio, mentre le coperture sono costituite da un solaio ligneo a doppia orditura.

Le finiture originarie consistono in malte e intonaci a base di calce naturale e sabbia rossastra di rodeno, proveniente dalle cave locali, in parte sostituiti da malte cementizie nella prima metà del Novecento fino all'abbandono.

5.9.2 Diagnosi preliminare

5.9.2.1 Metodologia diagnostica

La metodologia diagnostica adottata integra indagini strumentali e prove di laboratorio con un lavoro di campo esteso, finalizzato a identificare cause ed estensione dei degradi e a fornire basi tecnico-scientifiche per interventi volti ad arrestare il degrado e ad adeguare l'edificio ai requisiti di abitabilità, sicurezza strutturale, funzionalità ed efficienza energetica.

L'indagine *in situ* ha previsto un'ispezione visiva dell'intero complesso, supportata da campagne fotografiche di dettaglio per la documentazione e l'analisi puntuale degli elementi costruttivi.

Parallelamente è stato condotto uno studio storico-evolutivo dell'edificio che ha consentito di ricostruire le fasi costruttive e le trasformazioni funzionali utili all'interpretazione delle criticità conservative odierne.

Per valutare il contenuto di umidità nei paramenti murari e negli elementi lignei nelle aree critiche sono state eseguite misurazioni termo-igrometriche delle superfici con termo-igrometro a contatto, modello Stanley STHT77300 (Fig. 202, Tab. 11).

Le indagini geotecniche sono state eseguite in un'area prossima e ritenuta omologa al lotto dell'edificio. Sono stati realizzati un foro di sondaggio rotativo di 7,0 m e due prove di penetrazione dinamica con profondità massima di 8,6 m. Da queste prove si è ricavata la stratigrafia locale di riferimento e i dati utili per la progettazione degli interventi sulle fondazioni e per la valutazione del comportamento idrogeologico del sito.

Ai fini di verificare la compatibilità materica dei nuovi elementi strutturali con l'acqua di falda, è stato prelevato un campione d'acqua per l'analisi del grado di aggressività nei confronti del calcestruzzo previsto per le strutture a contatto con la falda freatica. È stata, inoltre, eseguita una prova di aggressività del terreno su un campione di calcestruzzo, finalizzata a valutare gli effetti potenziali del suolo sui materiali cementizi.

La componente lignea è stata oggetto di

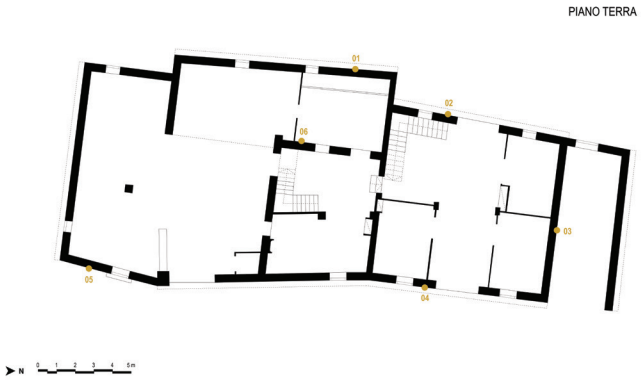


Fig. 202 | Localizzazione delle misurazioni termo-igrometriche

	04/11/2022	
	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]
1	0,7	26
2	0,8	26
3	1,5	26
4	0,8	26
5	>2,0	26
6	>2,0	25

Fig. 11 | Parametri termo-igrometrici prima dell'avvio dei lavori di restauro e rifunzionalizzazione

un'analisi completa commissionata alla società ITM, che ha ispezionato l'intera struttura per individuare le sezioni critiche e determinare lo stato di conservazione degli elementi strutturali.

Sono state, altresì, effettuate analisi degli intonaci per caratterizzare la tipologia di finitura preesistente ed individuare un intonaco tradizionale compatibile da impiegare in fase di risanamento.

Tale strategia di analisi preliminare è stata la base per una diagnosi puntuale dello stato di conservazione e per la definizione delle priorità e dei criteri progettuali di intervento.

5.9.2.1 Stato di conservazione

Al momento dell'intervento l'alquería versava in condizioni di grave degrado e necessitava di un recupero complessivo per ripristinarne l'abitabilità.

La complessa sovrapposizione di corpi di fabbrica di epoche diverse e la loro configurazione planimetrica hanno generato nodi costruttivi



Fig. 203 | Stato di conservazione delle coperture del volume 3 (04-11-2022) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]



Fig. 204 | Stato di conservazione della facciata est del volume 1 (04-11-2022) [mmarq]

Fig. 205 | Stato di conservazione delle coperture del volume 3 (04-11-2022) [mmarq]



critici che hanno agevolato fenomeni diffusi di infiltrazione delle acque meteoriche: le giunzioni tra volumi costituiscono punti privilegiati di ingresso delle acque e di degrado materico e costruttivo (Fig. 201).

I quadri patologici osservati comprendono fessurazioni e lesioni strutturali di diversa natura con crolli localizzati (Fig. 203-205), degrado dei paramenti murari e delle finiture superficiali (alveolizzazione, esfoliazione, rigonfiamenti e distacco dell'intonaco...) (Fig. 204), efflorescenze e sub-efflorescenze saline, patine biologiche, attacchi di organismi xilofagi e presenza di termiti.

Dalle misure termo-igrometriche (Tab. 11) e dall'ispezione è emersa la compresenza di diverse tipologie di umidità (infiltrazioni, risalita capillare e fenomeni di condensazione) che interagiscono tra loro e rappresentano la principale causa di degrado dell'organismo edilizio.

Le principali cause di queste problematiche, ricostruite integrando osservazioni dirette e dati strumentali, sono sia storiche che contestuali.

Sul piano storico costruttivo l'età dell'edificio e decenni di abbandono e mancata manutenzione hanno accelerato l'insorgere e la gravità dei degradi. Sul piano contestuale, la vicinanza del Brac de Rodrigos (canale di irrigazione interrato) a circa 6-7 m dalla facciata est e la contiguità dei campi coltivati mantengono un elevato carico idrico nel terreno che circonda l'edificio; inoltre, la trasformazione della strada CV-311 in strada ad alto traffico di mezzi pesanti e la presenza di alberature storiche sul lato est hanno prodotto sollecitazioni e vibrazioni che hanno peggiorato il quadro fessurativo della struttura.

Le indagini geotecniche confermano il ruolo determinante delle condizioni del sottosuolo sulla presenza di umidità da risalita capillare. La falda freatica è stata rilevata a 1,1 m di profondità, con oscillazioni fino a circa 0,5 m, elemento favorevole alla persistenza di umidità da risalita capillare. L'analisi chimico-fisica ha consentito di classificare quest'acqua come moderatamente aggressiva nei confronti del calcestruzzo (ambiente XC1+XA2), mentre la prova di aggressività del terreno ha definito il

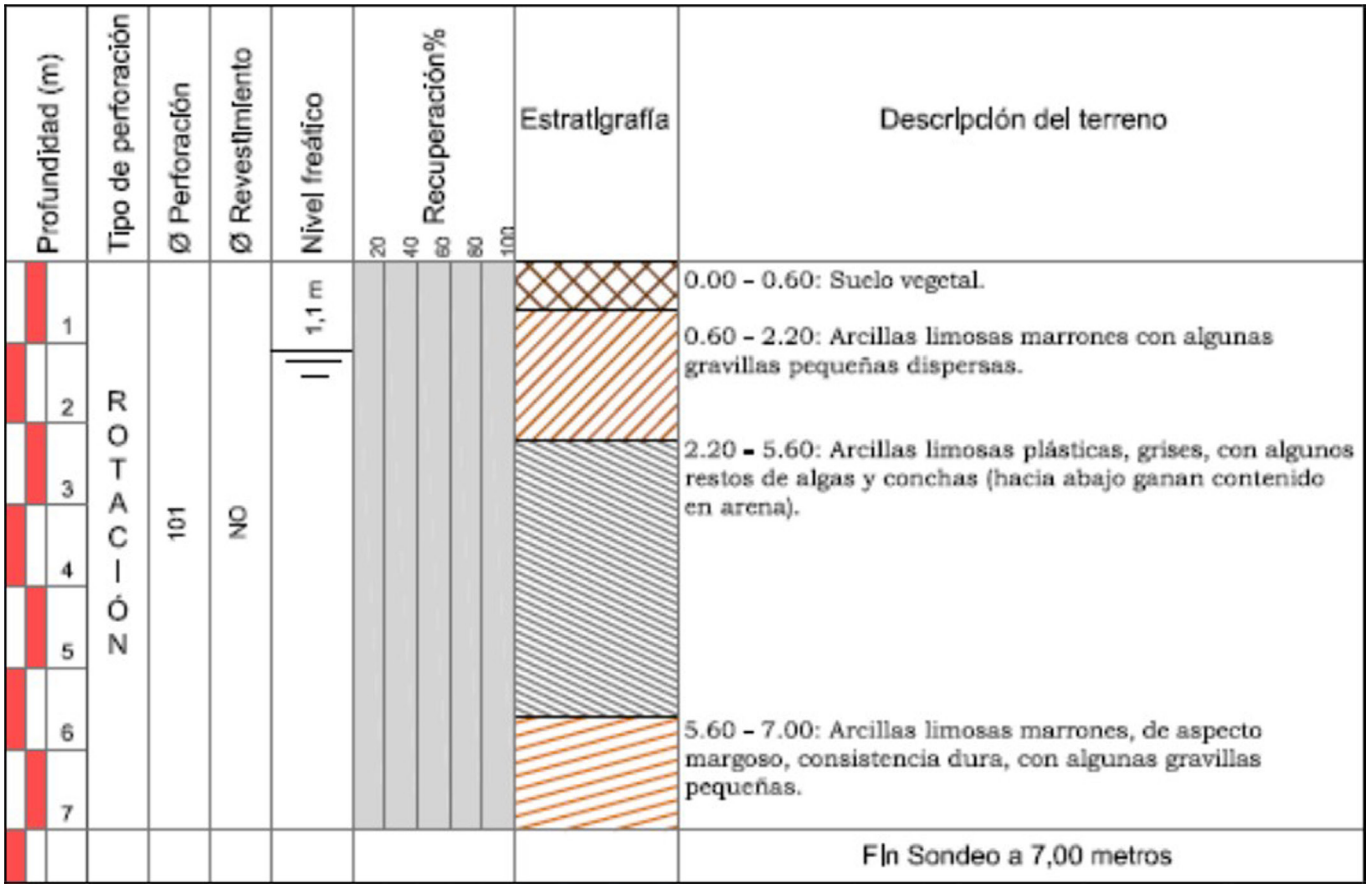


Fig. 206 | Ricostruzione del profilo geologico del terreno rilevato con le prospezioni geotecniche [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

suolo come non aggressivo (ambiente XC1).

Il profilo del sottosuolo (Fig. 206) ricostruito con le prospezioni geotecniche è caratterizzato da uno strato superficiale di vegetazione (spessore 0,6 m), uno strato di argilla limosa e torba fino a 2-3 m ed uno strato di argilla compatta con ghiaia dispersa fino a circa 5,6 m. Tale stratigrafia implica scarsa capacità portante del terreno e una spiccata propensione a trattenere acqua in corrispondenza delle fondazioni e dei paramenti murari, giustificando interventi di rinforzo alle fondazioni e misure di mitigazione dell'umidità.

La distribuzione del degrado all'interno del complesso è eterogenea tra le diverse aree dell'edificio. Le porzioni esposte a sud e ad ovest sono le più compromesse, con fenomeni diffusi di infiltrazione e danni strutturali; il terzo corpo, originariamente *porxada* ad uso zootecnico, presenta lo stato di conservazione peggiore, anche per l'impiego di materiali costruttivi deperibili (mattoni e intonaci in terra cruda); il quarto volume, usato storicamente per allevamento suino (presenza di una "*pallissa*" e depositi organici), mostra un degrado particolarmente accentuato delle superfici murarie dovuto ai rifiuti aggressivi prodotti dall'attività.

Gli impianti, in particolare la rete fognaria, sono assenti o in condizioni critiche: l'assenza di fognature aggrava la gestione delle acque reflue e incrementa il rischio di umidità e contaminazione degli ambienti.

5.9.3 Il progetto di risanamento

Il progetto redatto dallo studio "*mmarq - arquitectura y urbanismo*" (Alboraya, Valencia) ha come obiettivo principale il restauro e la

Fig. 207 | Planimetrie funzionali dello stato di progetto



riqualificazione funzionale dell'*Alqueria El Trull*, finalizzati al ripristino dell'abitabilità e della sicurezza strutturale. Il progetto prevede il miglioramento delle condizioni di salubrità, comfort ed efficienza energetica, in conformità con le prescrizioni del *Documento Basico del Código Técnico de la Edificación* e si propone di recuperare e valorizzare il valore paesaggistico e architettonico dell'edificio, reinserendolo con rispetto nel contesto dell'Horta.

L'intervento è pensato come una nuova fase nella storia dell'edificio che ripristina funzionalità e comfort senza compromettere la lettura storica e materica del manufatto. Pertanto, le scelte operative sono guidate dai principi della conservazione e del restauro e, ove possibile, si privilegia l'uso di materiali e tecniche costruttive tradizionali. L'inserimento di elementi contemporanei sarà sottoposto a regole progettuali rigorose, quali la priorità alla salvaguardia dei sistemi costruttivi tradizionali, compatibilità materica e reversibilità delle soluzioni.

Il progetto integra, inoltre, una chiara linea di azione bioclimatica ed ecologica. Oltre all'adozione delle soluzioni passive e degli adempimenti impiantistici previsti dal CTE per il risparmio energetico (per la normativa di riferimento si rimanda all'Appendice C), è stata manifestata la volontà di adottare lo standard BREEAM come quadro di riferimento per orientare le scelte progettuali verso un restauro più sostenibile e coerente con alcuni obiettivi dell'Agenda 2030.

A livello funzione il programma rispetta la morfologia distributiva tradizionale integrandola con le necessità contemporanee (Fig. 207): al piano terra sono previste la zona giorno, gli spazi tecnici per gli impianti e alcune camere; il primo piano ospiterà le restanti camere. Per preservare la logica distributiva tradizionale, l'assecco principale è mantenuto nel volume 1, assicurando così il tradizionale ingresso "*a dos mans*" e la conservazione dell'asse distributiva verticale rappresentato dalla scala.

A causa dei numerosi fenomeni di cedimento e delle maggiori condizioni di carico imposte dagli interventi progettuali, le prime operazioni hanno riguardato il consolidamento delle fondazioni mediante la realizzazione di sottofondazioni e rinforzi alle fondazioni esistenti.

Parallelamente al consolidamento delle fondazioni si è data priorità al trattamento dell'umidità da risalita capillare e alle altre fonti di umidità, in quanto la loro persistenza avrebbe compromesso la durabilità degli interventi strutturali e delle finiture superficiali.

Il controllo dell'umidità è stato ottenuto mediante la combinazione di cinque strategie (Fig. 208):

- Realizzazione di una chiusura orizzontale di base con intercapedine ventilata
- Installazione di sifoni Knapen lungo tutto il perimetro esterno
- Iniezioni chimiche anticapillari, sia con sistema a pressione che con sistemi a lenta diffusione
- Realizzazione di drenaggi perimetrali
- Adozione di intonaci risananti e rivestimenti a base di calce naturale

Operativamente, dopo lo scavo per la sottofondazione è stata realizzata la chiusura orizzontale di base costituita, dal basso verso l'alto, da: strato di pietrisco di pre-drenaggio; strato impermeabilizzante con foglio di polietilene; strato di livellamento in calcestruzzo armato; sistema di intercapedine del tipo "igloo" (cavity 5) con prese d'aria sulle facciate al fine di garantire la ventilazione della camera d'aria. La chiusura orizzontale di base è stata completata da una soletta armata in calcestruzzo e pannelli isolanti di polistirene estruso (Fig. 209-210).

Successivamente sono state eseguite le iniezioni chimiche (Fig. 211-212), realizzato il drenaggio perimetrale e installati i sifoni Knapen (Fig.



Fig. 209 | Realizzazione della chiusura orizzontale di base (03-07-2024) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]



Fig. 210 | Realizzazione del sistema di riscaldamento a pavimento (05-11-2025)

Fig. 208 | Estratto della tavola di progetto degli interventi contro l'umidità da risalita capillare e della controparete autoportante [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

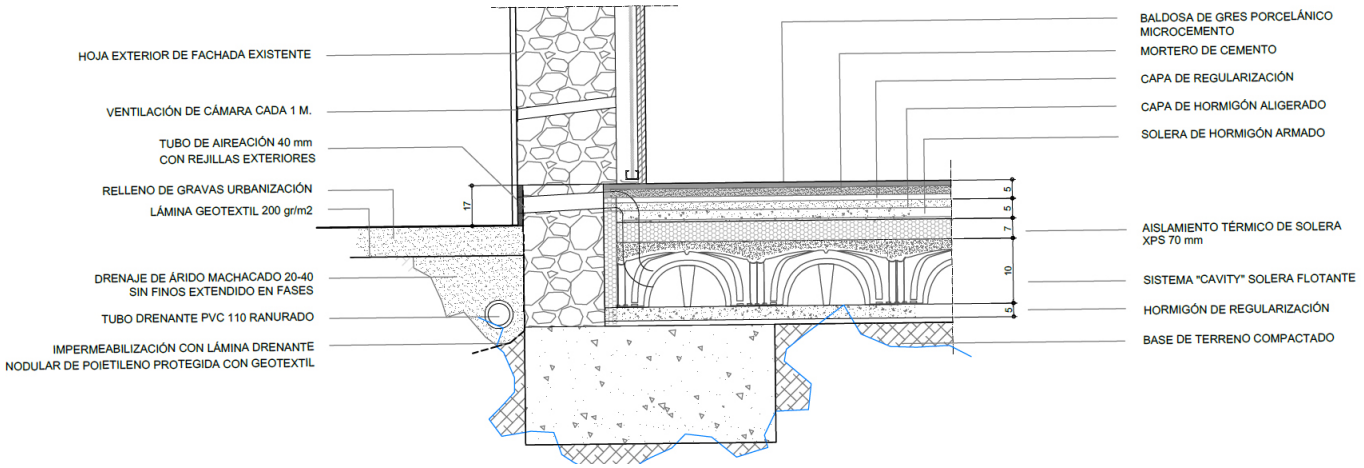




Fig. 211 | Realizzazione delle iniezioni chimiche a pressione (28-06-2024) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]



Fig. 212 | Realizzazione delle iniezioni chimiche a lenta diffusione (12-06-2024) [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

Fig. 213 | Sifoni Knapen inseriti lungo l'intero perimetro dell'edificio (05-11-2025)



213). La combinazione di questi interventi è stata pensata per ridurre la risalita capillare e accelerare la fase di asciugatura delle murature.

Il contenuto umido residuo è stato monitorato e il programma dei lavori ha previsto una fase di attesa affinché il contenuto idrico raggiungesse valori compatibili prima di procedere alle operazioni successive di finitura superficiale.

Nel mentre si è proceduto con gli interventi strutturali sugli orizzontamenti e il recupero della copertura. Il solaio intermedio è stato rinforzato mediante la realizzazione di un solaio composito legno-calcestruzzo che conserva le travi esistenti (Fig. 214): le travi sono state collegate allo strato in calcestruzzo mediante connettori in acciaio.

L'intervento sulla copertura (Fig. 215) ha previsto, invece, l'implementazione di rinforzi localizzati (profili in acciaio bullonati alle travi) o la sostituzione delle travi irrecuperabili con nuove travi in legno di pino massello o legno lamellare.

Per la protezione e il consolidamento delle travi è stato eseguito un trattamento preliminare con primer contenente insetticida, fungicida e termiticida e la successiva applicazione di due mani di vernice sintetica a poro chiuso. Agli estremi delle travi sono state effettuate delle iniezioni antitarlo a completamento della disinfezione biologica del legno.

Dopo il consolidamento strutturale la copertura è stata impermeabilizzata ed isolata e in seguito si è provveduto al riposizionamento delle tegole arabe recuperate (il progetto ha previsto il recupero di almeno il 50% delle tegole originarie), integrando con nuovi elementi le porzioni scoperte e le zone di giunzione con le pareti laterali.

Parallelamente agli interventi sugli orizzontamenti, si è posta particolare attenzione alla conservazione delle murature portanti in adobe. Per conservare la memoria storica della tecnica costruttiva è stato predisposto un sistema di "incamiciatura" delle pareti che ha consentito l'adeguamento strutturale ai nuovi carichi, preservando la muratura originale.

Solo dopo aver verificato che le murature

avessero raggiunto condizioni igrometriche adeguate si è passati al ripristino, tutt'ora in corso, delle finiture superficiali.

La scelta metodologica è stata coerente con il principio di compatibilità storico-materica: le superfici esterne e interne sono state trattate con intonaci risananti a base di calce naturale, selezionati per garantire compatibilità e traspirabilità.

Sulle facciate esterne è stata applicata una malta tecnica a base di calce idraulica naturale (Rénocal TX ARIA "HEIDELBERGCEMENT HISPANIA") in tre strati, previa installazione di rete resistente agli alcali. Nelle situazioni di degrado più avanzato il ciclo è stato integrato con un intonaco di fondo Webercal Basic (GP CSIII W2, UNE-EN 998-1) sp. 15 mm e una finitura Webercal Revoco (CR CSI W2) sp. 10 mm, con rete in fibra di vetro.

La finitura superficiale finale prevede l'applicazione di una pittura ai silicati o a base di calce, con toni sabbia o crema/bianco a seconda delle aree; in alcune porzioni, dove la documentazione e la lettura del manufatto lo richiedevano, è previsto il ripristino della finitura superficiale tradizionale con sabbia di rodeno.

Gli elementi lapidei e i laterizi degradati o alveolizzati sono stati oggetto di interventi localizzati di cuci-scuci e sostituzione con elementi di analoga tipologia; i giunti in malta cementizia sono stati rimossi e ripristinati con malta a base di calce naturale (Fig. 216).

Alla base delle pareti è stata prevista una zoccolatura protettiva (altezza >30 cm) con materiale a coefficiente di suzione <3% per proteggere le superfici dagli schizzi.

Per garantire un adeguato isolamento termoacustico e al tempo stesso preservare le murature originali, l'involucro interno è stato completato con un sistema autoportante in cartongesso (PLACO Habito HBT PPM 13 sp. totale 95 mm) con isolamento in lana minerale (Apta ISOVER, 65 mm). Questo accorgimento, oltre a permettere l'alloggiamento degli impianti, limita i carichi sui solai.

Infine, le pavimentazioni storiche (piastrelle idrauliche e mosaici) sono state catalogate,

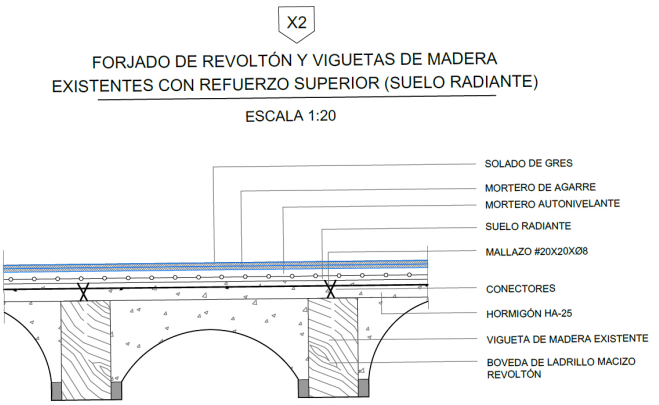


Fig. 214 | Estratto della tavola degli interventi di rinforzo sui solai intermedi [mmarq]

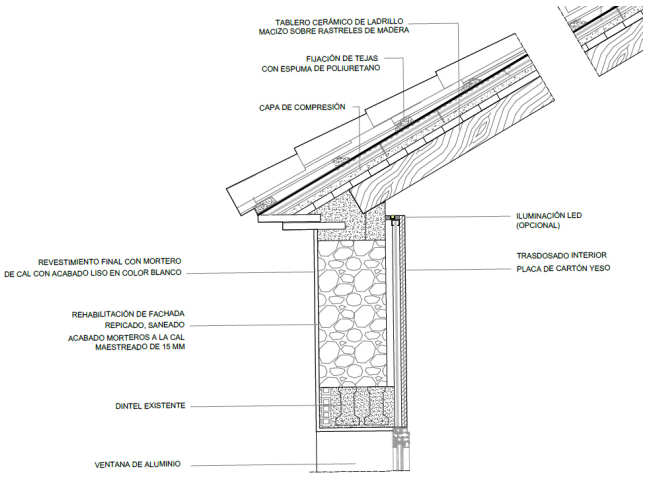


Fig. 215 | Estratto della tavola degli interventi di rinforzo sulle coperture [mmarq – Estudio de arquitectura y urbanismo]

Fig. 216 | Scarnitura dei giunti di malta cementizia sulla facciata est del volume 1 (07-09-2025)



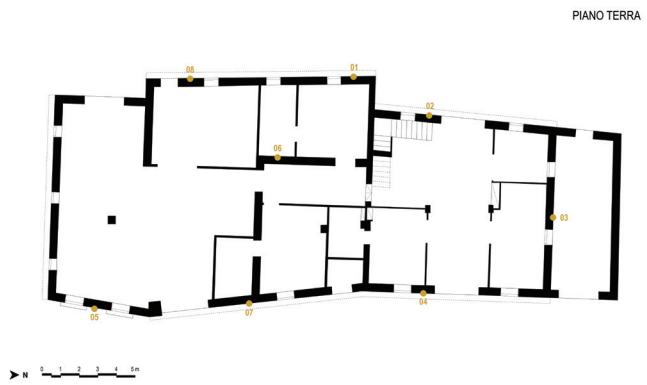


Fig. 217 | Localizzazione delle misurazioni termo-igrometriche

rimosse e sottoposte a restauro. Al termine degli interventi saranno ricollocate nelle loro posizioni originali e integrate con nuova pavimentazione in gres porcellanato, scelta per riprodurre le finiture e le texture tradizionali senza compromettere la leggibilità storica dei manufatti restaurati.

Dal punto di vista impiantistico il progetto ha previsto l'installazione di impianti elettrici, di riscaldamento, di condizionamento e di ventilazione meccanica con recupero di calore; per l'integrazione degli impianti verranno realizzati dei controsoffitti (pannelli in cartongesso grecato 100×60 cm) per la ventilazione con recupero di calore e l'impianto di raffrescamento canalizzato con compartimentazione Airzone. È, inoltre, prevista la realizzazione di un sistema di raccolta e depurazione delle acque reflue e l'installazione di sistemi di raccolta dell'acqua piovana verso una cisterna dedicata.

5.9.4 Risultati

5.9.4.1 Monitoraggio post-intervento

Il monitoraggio post-intervento non è stato ancora avviato, poiché i lavori di recupero e rifunzionalizzazione sono tuttora in corso; nondimeno, per valutare preliminarmente l'efficacia delle misure adottate contro l'umidità da risalita capillare sono state effettuate campagne di misurazione termo-igrometrica durante l'esecuzione dei lavori. Gli accertamenti sono stati svolti con un termo-igrometro a contatto (modello Stanley STHT77300), posizionando il sensore a una quota di riferimento di circa 50 cm dal piano di campagna; le rilevazioni si sono succedute in più campagne distribuite lungo l'intera durata del cantiere, dall'apertura fino ad oggi (novembre 2025).

È opportuno esplicitare i limiti metodologici che condizionano la qualità e l'interpretabilità delle serie raccolte. Pur avendo mantenuto la quota di misura costante, non è stato possibile garantire la perfetta ripetibilità planimetrica dei punti di misura: le campagne hanno interessato porzioni murarie sostanzialmente coerenti ma con localizzazioni variabili dei punti di osservazione tra un rilievo e l'altro. Inoltre, la prassi di registrare i valori mediante fotografie del display del termo-igrometro ha reso difficile la collocazione puntuale dei singoli rilevamenti sulle planimetrie di riferimento in fase di elaborazione finale dei dati.

Per mitigare questi problemi sono stati considerati nelle analisi soltanto i rilievi effettuati in punti più o meno fissi e rintracciabili in tutte le campagne diagnostiche; i dati per i quali non

Tab. 12 | Parametri ambientali rilevati nelle campagne diagnostiche del 2023, 2024 e 2025

	14/11/2023		20/06/2024		16/09/2024		18/12/2024		30/05/2025		03/11/2025	
	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]	Umidità [%]	$T_{superficiale}$ [°C]
1	1,0	23	/	/	0,8	29	0,7	21	0,7	31	0,7	28
2	0,7	23	0,9	27	0,7	29	0,7	22	0,8	31	0,5	28
3	1,3	23	2,0	27	1,0	28	/	/	/	/	/	/
4	0,8	23	>2,0	27	0,5	29	/	/	0,7	31	0,7	25
5	1,3	23	>2,0	27	1,0	28	0,6	22	0,6	30	0,7	25
6	/	/	>2,0	27	>2,0	29	/	/	2,0	29	2,0	28
7	0,8	23	0,8	27	0,8	29	/	/	0,6	31	0,8	27
8	/	/	1,1	27	0,8	28	0,7	21	0,8	31	0,7	28

è stato possibile identificare con sufficiente precisione il punto d'origine sono stati esclusi dalle tabelle riassuntive e dalle figure (Fig. 217, Tab. 12).

Queste condizioni procedurali impediscono una valutazione quantitativa rigorosa e puntuale del trend post-intervento su singoli punti di muratura; tuttavia le serie selezionate forniscono comunque indicazioni utili a carattere qualitativo sull'andamento dell'umidità nelle porzioni più significative dell'edificio e consentono prime valutazioni sull'efficacia complessiva delle strategie adottate.

5.9.4.2 Considerazioni finali

I sopralluoghi e le misure termo-igrometriche condotte durante i lavori mostrano, in generale, una tendenza positiva dei risultati degli interventi (Tab. 12).

Nella maggior parte delle porzioni murarie monitorate si osserva una riduzione del contenuto umido coerente con l'azione combinata delle misure implementate. Tuttavia il risultato è ancora parziale e disomogeneo.

Permangono situazioni critiche localizzate caratterizzate da valori di umidità più elevati e da fenomeni di efflorescenze saline, in particolare sulla muratura esterna adiacente all'ingresso (fronte est) e su una muratura interna tra i volumi 2 e 3 (punto 6) (Fig. 218). In quest'ultimo caso non sono state eseguite barriere chimiche e la limitata ventilazione interna condiziona negativamente l'evaporazione del contenuto umido residuo.

Ulteriori letture anomale del termo-igrometro a contatto sono state registrate in corrispondenza di murature soggette allo scolo delle acque meteoriche (va ricordato che il sistema di drenaggio delle coperture non è ancora stato installato) e in alcune aree puntuali (Fig. 219-220). Tali anomalie sono verosimilmente collegate alla presenza di sali igroscopici che attraggono l'umidità atmosferica, ma richiedono ulteriori indagini per confermarne le cause.

Sul piano interpretativo è fondamentale evidenziare che la riduzione generale dell'umidità non può essere attribuita a un singolo intervento. I risultati sembrano piuttosto emergere dalla sinergia di più azioni complementari e, soprattutto, dal rigoroso rispetto della sequenza operativa di cantiere.

La lettura critica delle soluzioni implementate conferma limiti e rischi già registrati nel caso studio dell'Alqueria "4 Camins". Interventi localizzati come l'applicazione di rivestimenti impermeabilizzanti nella fascia inferiore delle murature, utili per proteggere da schizzi o contatti diretti con l'acqua, rappresentano soluzioni di compromesso che nel lungo periodo potrebbero compromettere la traspirabilità



Fig. 218 | Parametri termo-igrometrici e degrado da efflorescenze saline nel punto 06 sulla muratura interna (03-11-2025))



Fig. 219 | Alterazione cromatica ed efflorescenze saline sulla muratura esterna della facciata est (03-11-2025)

locale delle superfici e favorire lo spostamento dei sali e dell'umidità verso le porzioni superiori della muratura. Tali misure vanno pertanto considerate come "sacrifici controllati" e sottoposte ad un monitoraggio continuo.

Alla luce dei dati disponibili il bilancio provvisorio è positivo ma non conclusivo. L'approccio integrato e la rigorosa sequenza operativa stanno producendo benefici diffusi, ma permangono incertezze legate all'eterogeneità dei trattamenti, alla scarsa ventilazione interna e alla mancanza di trattamenti per la rimozione di sali solubili delle superfici.

Per consolidare i risultati e valutare con rigore efficacia, durabilità ed eventuali criticità è indispensabile avviare un monitoraggio post-intervento strutturato e georeferenziato che superi i limiti delle campagne condotte finora.

In particolare è necessario definire e segnare in pianta punti di misura permanenti e facilmente identificabili; catalogare le letture fotografiche in sistemi di registrazione elettronica associate ad una chiara localizzazione planimetrica; integrare il monitoraggio con metodi complementari (es. termografia IR) e predisporre una schedatura sistematica dei dati.

Solo in questo modo sarà possibile, alla conclusione dei lavori, attivare un monitoraggio post-intervento capace di fornire dati quantitativi affidabili e di supportare valutazioni definitive sull'efficacia degli interventi implementati, nonché di programmare un piano di manutenzione e controllo a medio-lungo termine che garantisca la durabilità dei risultati ottenuti.



Fig. 220 | Alterazione cromatica della facciata est (03-11-2025)

STRUMENTI E METODI INNOVATIVI PER IL RISANAMENTO DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

6

6.1 Best Practices

6.2 Open Knowledge Platform Tool

06 STRUMENTI E METODI INNOVATIVI PER IL RISANAMENTO DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Lo scopo di questo capitolo è trasformare l'analisi comparata dei casi studio in raccomandazioni operative e in un nucleo tecnico-normativo preliminare per il risanamento del patrimonio architettonico affetto da umidità da risalita capillare.

Occorre ricordare che con questo lavoro non si vuole proporre soluzioni "universali" in quanto la pluralità di tipologie costruttive, di materiali e di condizioni di contesto rende improponibile una procedura unica e indiscriminata. L'intento è invece definire requisiti minimi e protocolli ripetibili che, se adottati in modo sistematico, consentano di valutare, comparare e validare gli interventi nel medio-lungo periodo, costituendo una base solida per le decisioni progettuali e per una possibile normazione futura.

Questa impostazione si fonda su una constatazione empirica ricorrente: l'affidabilità delle conclusioni dipende in modo diretto dalla qualità e dalla completezza delle informazioni diagnostiche acquisite in fase preliminare e di conoscenza. Per questo, le sezioni successive traducono le evidenze dei casi studio in principi guida e pratiche operative distinguendo con chiarezza fra raccomandazioni già consolidate e proposte che necessitano di ulteriori verifiche sperimentali.

Sintesi comparativa dei casi studio

L'analisi comparativa dei casi studio conferma che l'approccio integrato, ossia la sequenza conoscitiva che combina ricognizione storico-critica, rilievo metrico e fotogrammetrico, rilievo materico e dello stato di conservazione, analisi del contesto, diagnostica non invasiva e analisi materiche, è la premessa indispensabile per progettare interventi compatibili con l'organismo edilizio ed efficaci e duraturi nel lungo periodo.

Quando tale sequenza è stata effettivamente coordinata da un piano di diagnosi e monitoraggio, ha prodotto profili conoscitivi ripetibili e comparabili che hanno reso possibili scelte progettuali meno invasive e con minori rischi di esiti peggiorativi rispetto ad approcci emergenziali e/o palliativi.

Resta però fondamentale sottolineare che la diagnosi, per quanto accurata, non supplisce alla necessità di una sequenza operativa coerente: l'efficacia degli interventi dipende tanto dall'informazione quanto dall'ordine e dall'integrazione delle azioni in cantiere. Intervenire sul paramento murario prima di risolvere la causa del degrado o applicare finiture non compatibili sono errori ricorrenti che la sequenza corretta deve evitare.

Di fatti, nei casi analizzati il sistema CNT-Domodry ha mostrato risultati misurabili: i monitoraggi hanno registrato riduzioni del contenuto idrico e regressioni delle anomalie termiche lungo il profilo murario, compatibili con l'arresto della risalita capillare. Tuttavia, l'arresto della risalita capillare non esaurisce le criticità conservative: l'evaporazione dell'umidità residua può determinare la comparsa o l'esacerbazione di efflorescenze e sub-efflorescenze saline, fenomeni naturali che a volte vengono erroneamente interpretati come persistenza del fenomeno capillare.

Per questi motivi l'impiego della CNT e di analoghi sistemi di deumidificazione deve essere considerato parte di una strategia integrata. La deumidificazione delle murature deve essere accompagnata dalla gestione della sorgente idrica, da operazioni di estrazione dei sali solubili dalla muratura, dalla scelta di intonaci e finiture traspiranti e da piani di ventilazione e manutenzione. In assenza di questa integrazione, l'effetto del dispositivo rischia di risultare non risolutivo.

La termografia IR si è dimostrata uno

strumento essenziale per la mappatura rapida delle anomali termiche e per la selezione dei punti di indagine quantitativa (ad esempio prove ponderali). Tuttavia la sua affidabilità operativa richiede condizioni di misura e protocolli più stringenti: la comparabilità delle termografie è compromessa dalla variabilità di risoluzione delle termocamere, dalle assunzioni sull'emissività, dalle condizioni ambientali e climatiche al momento della misura e dalle pratiche di calibrazione. Perciò la termografia è realmente utile soltanto se eseguita da personale qualificato secondo procedure che impongano requisiti strumentali minimi e la registrazione puntuale dei metadati, condizione che vale per l'intera strumentazione diagnostica (termoigrometri, sensori di contatto, sonde...).

Limiti metodologici ricorrenti e loro implicazioni pratiche

Dai casi emergono limiti sistematici che condizionano la solidità delle inferenze e la trasferibilità delle pratiche. Innanzitutto, l'assenza o l'eterogeneità delle diagnosi preliminari impedisce la definizione di baseline confrontabili. In secondo luogo, monitoraggi discontinui, non georeferenziati o di durata insufficiente ostacolano la distinzione tra trend stagionali e trend indotti dall'intervento, rendendo incerte le attribuzioni causali. A ciò si aggiunge l'eterogeneità di protocolli, strumenti e pratiche di cantiere che complica l'aggregazione e l'analisi comparativa dei dati. Infine, la scarsa documentazione sui materiali e sulle modalità esecutive incrementa il rischio di scelte progettuali non compatibili e, di conseguenza, di interventi inefficaci o addirittura dannosi.

La conseguenza pratica è che, in assenza di tre elementi fondamentali (baseline diagnostica definita, punti di misura permanenti e georeferenziati e metadati standardizzati) risulta estremamente difficile verificare in modo oggettivo l'efficacia dei singoli interventi. Perciò tali prerequisiti informativi non possono essere considerati opzionali, ma devono essere intesi come condizioni preliminari non negoziabili per qualunque disposizione normativa operativa.

Occorre, tuttavia, precisare che tali lacune non annullano il valore empirico dei casi studio, ma ne delimitano i confini interpretativi e consentono di evidenziare con chiarezza i requisiti informativi necessari perché le inferenze possano tradursi in regole operative affidabili e replicabili.

Punti di forza metodologici e prescrivibilità delle pratiche

Dalle evidenze emerge una sequenza operativa coerente ed efficace che, nell'ordine, deve guidare gli interventi: diagnosi e indagini di contesto; gestione preventiva della sorgente idrica; test pilota su porzioni rappresentative con KPI (*Key Performance Indicators*) definiti (finalizzati alla sperimentazione e validazione scientifica di materiali e tecnologie innovative); interventi di rimozione dei sali solubili; applicazione di intonaci e finiture traspiranti; predisposizione di ventilazione (naturale o meccanica) e controllo delle condizioni microclimatiche; monitoraggio continuo durante e dopo l'intervento; piano di manutenzione programmata. Questa gerarchia non intende imporre uno schema rigido, ma costruire una logica operativa che minimizzi rischi e contro-effetti e renda verificabili i risultati nel tempo.

I casi studio hanno altresì individuato elementi metodologici ripetibili che vanno formalizzati come prerequisiti delle *best practices*: l'approccio multidisciplinare, la sequenza diagnostico-operativa, la registrazione rigorosa dei metadati, la preferenza per tecniche non

invasive e la limitazione dei prelievi invasivi a porzioni già distaccate. Questi principi consentono di costruire profili olistici che collegano cause, manifestazioni di degrado e scelte operative e sono immediatamente traducibili in requisiti operativi e capitolati tecnici.

Per trasformare le *best practices* in un nucleo normativo ripetibile occorre, in concreto, definire requisiti diagnostici minimi e formati di metadati obbligatori; introdurre obblighi contrattuali di monitoraggio con KPI e durate minime; standardizzare specifiche strumentali e protocolli (in particolare per la termografia); regolamentare l'adozione di tecnologie emergenti tramite protocolli sperimentali e l'obbligo di pubblicazione dei dataset a fini di validazione indipendente; promuovere infine la formazione specialistica degli operatori e dei professionisti coinvolti. Queste misure rendono le prescrizioni tecniche verificabili e riducono la dipendenza da pratiche non standardizzate o da materiali non compatibili.

Le priorità di ricerca e innovazione, coerenti con le lacune emerse, comprendono l'ampliamento dei campioni per epoca costruttiva, materiali e condizioni di contesto; la realizzazione e condivisione di dataset longitudinali aperti; e la sperimentazione controllata di approcci digitali e predittivi (modelli basati su intelligenza artificiale, acquisizione 3D/4D tramite droni), sempre accompagnati da protocolli di validazione scientifica. Queste azioni di ricerca devono essere orientate a produrre indicatori e soglie KPI condivise, in modo da rendere le verifiche più oggettive e comparabili.

In sintesi, il risultato operativo dei casi studio non è una ricetta unica ma una piattaforma di partenza: definire prerequisiti informativi, standardizzare procedure e rendere confrontabili i dati è la condizione preliminare per tradurre le migliori pratiche sperimentali in un nucleo normativo ripetibile, verificabile e coerente con i principi della conservazione e del restauro e i requisiti di sostenibilità (ambientale, sociale ed economica).

Confronto normativo Italia-Spagna

In Spagna il *Código Técnico de la Edificación* (CTE) è il quadro normativo nazionale che definisce requisiti prestazionali obbligatori per l'edilizia; è stato istituito con il Real Decreto 314/2006 e aggiornato con successive integrazioni.

All'interno del CTE esiste un *Documento Básico denominato DB-HS (Salubridad)* che disciplina, tra gli altri aspetti, la protezione contro l'umidità (sezione HS-1), la qualità dell'aria interna (HS-3) e le modalità di raccolta/evacuazione delle acque. Il DB-HS stabilisce requisiti di progetto, criteri prestazionali e procedure il cui rispetto è condizione per la conformità normativa e per l'ottenimento di titoli amministrativi legati all'attestazione di rispondenza progettuale.

Per questi motivi, il CTE fornisce in Spagna una cornice organica che integra prescrizioni tecniche e procedure amministrative riferite anche alla gestione dell'umidità negli edifici.

In Italia la regolazione degli aspetti legati alla salubrità e al comfort indoor non è concentrata in un documento unico equivalente al DB-HS. Il quadro è composto da atti normativi di diversa natura: il Testo Unico dell'edilizia (D.P.R. n. 380/2001) definisce principi generali su agibilità e requisiti minimi, mentre disposizioni storiche come il D.M. Sanità 5 luglio 1975 recano prescrizioni igienico-sanitarie per i locali. Sul piano tecnico-operativo, la prassi si affida a norme tecniche (UNI, ISO) e a linee guida settoriali: esempi rilevanti per la diagnostica e il monitoraggio sono la UNI 11867:2022 (termografia IR) e la UNI EN ISO 13788 (valutazione del rischio di condensa). Tuttavia queste norme, pur fornendo riferimenti metodologici utili, non costituiscono un corpus unico e cogente che disciplini in modo organico l'intero processo di risanamento dell'umidità da risalita. La conseguenza pratica è una certa dispersione di prassi: protocolli diagnostici eterogenei, requisiti contrattuali variabili e assenza di obblighi omogenei su metadati e durate di monitoraggio, come risulta evidente nei casi studio analizzati.

Nel contesto normativo italiano vanno, inoltre, considerati i Criteri Ambientali Minimi (CAM), strumenti normativi introdotti con la L. 221/2015 (Disposizioni in materia ambientale

per promuovere misure di *green economy* e per il contenimento dell'uso eccessivo di risorse naturali), che definiscono requisiti ambientali obbligatori da inserire nella documentazione di gara per gli appalti pubblici. I CAM, concepiti per orientare il *Green Public Procurement* e ridurre l'impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita delle opere, contengono specifiche tecniche, clausole contrattuali, criteri di verifica e spesso criteri premiali finalizzati a incentivare scelte progettuali, materiali e di processo più sostenibili. Nell'ambito dell'edilizia i CAM affrontano tematiche che spaziano dalla selezione dei materiali (analisi del ciclo di vita - LCA e dichiarazioni ambientali di prodotto - EPD), alla gestione del cantiere, alla progettazione per durabilità e salubrità, fino alle modalità di verifica e rendicontazione delle prestazioni.

Di rilievo per la presente ricerca è l'aggiornamento normativo in corso relativo ai CAM che sta introducendo criteri specifici riguardanti l'inserimento della progettazione del risanamento dai fenomeni di umidità da risalita capillare, con l'intento di rendere parte integrante dei capitolati pubblici l'affrontare tale problema.

Criticamente, l'inclusione del tema nei CAM rappresenta una leva amministrativa significativa: i CAM, essendo obbligatori per gli appalti pubblici, consentono di introdurre requisiti su diagnosi, compatibilità materica e obblighi di monitoraggio nei capitolati, favorendo la diffusione di pratiche omogenee. Tuttavia, è importante sottolineare che i CAM non sostituiscono le norme tecniche specialistiche né le esigenze connesse alla tutela del patrimonio storico; la loro efficacia dipenderà dalla concreta implementazione contrattuale da parte delle stazioni appaltanti e dall'armonizzazione con le disposizioni delle soprintendenze e degli enti locali preposti alla tutela dei beni culturali.

La presenza in Spagna del DB-HS, concepito come documento base che integra prestazioni e procedure, tende a promuovere una maggiore uniformità delle prassi professionali, favorendo la raccolta di dati omogenei e la definizione di criteri di valutazione chiari. In Italia, la storica dispersione normativa (norme tecniche applicabili ma non sempre vincolanti, circolari e linee guida locali) ha prodotto, nei casi studio analizzati, elevate variabilità di protocolli diagnostici, requisiti contrattuali e prassi di monitoraggio, complicando la comparazione e la validazione delle soluzioni adottate.

L'inclusione del risanamento dall'umidità tra i CAM può contribuire a ridurre tale variabilità nei contesti di intervento pubblico, perché consente di imporre nei capitolati elementi come la diagnosi minima, i formati di metadati, le durate minime di monitoraggio, i KPI e i test pilota; ciò premesso, resta il fatto che i CAM rappresentano uno strumento contrattuale e di procurement applicabile alle gare pubbliche e non equivalgono a una normativa tecnica esaustiva e generalizzabile all'intero patrimonio.

Dall'analisi comparativa emergono comunque elementi trasferibili dal modello spagnolo: in primo luogo la definizione di requisiti minimi per la protezione dall'umidità (analoghi alla sezione HS-1 del DB-HS); in secondo luogo l'obbligo di registrare metadati diagnostici; in terzo luogo la prescrizione di durate minime di monitoraggio e l'inserimento di KPI contrattuali. Tuttavia, la semplice importazione formale del DB-HS non è praticabile senza adeguamenti: la natura diffusa e altamente vincolata del patrimonio storico italiano, la frammentazione amministrativa e i vincoli procedurali impongono un adattamento che integri la tutela dei beni culturali e le specificità costruttive locali. In sostanza, il valore operativo del CTE risiede soprattutto nella sua logica di sistema (un documento unico che raccoglie prestazioni e procedure) e può essere assunto come modello di riferimento per l'Italia, ma soltanto se opportunamente modulato rispetto al contesto istituzionale e culturale nazionale.

6.1

BEST PRACTICES

6.1 Best Practices

6.1.1 Principi guida per le Best Practices

I principi che seguono costituiscono il nucleo valoriale e prescrittivo su cui si fonda la proposta delle "Best Practices per il Risanamento degli Edifici Affetti da Umidità da Risalita Capillare". Tali principi vanno considerati come requisiti orientativi traducibili in prescrizioni tecniche verificabili (azioni obbligatorie, *deliverable* minimi, criteri di accettazione).

I principi proposti di seguito sono coerenti con i principi del restauro (compatibilità, minimo intervento, reversibilità, riconoscibilità) e con i criteri di sostenibilità (ambientale, economica e sociale), integrati con le esigenze operative emerse dall'analisi comparativa dei casi studio.

Primo Principio - Risolvere la causa prima del sintomo

Gli interventi devono prioritariamente risolvere o limitare la causa di degrado prima di intervenire sui sintomi del degrado. L'esperienza pratica dimostra che azioni sulle manifestazioni di degrado, senza la risoluzione della causa di degrado, portano a recidive o effetti inefficaci o controproducenti.

Secondo Principio - Approccio integrato e multidisciplinare

La valutazione e la progettazione di qualsiasi intervento devono essere condotte con un approccio multidisciplinare coordinato (storico-critico, geotecnico/idrologico, diagnostico, materico, gestionale) e formalizzate in un piano di diagnosi e monitoraggio. I profili conoscitivi integrati favoriscono scelte progettuali coerenti e comparabili.

Terzo Principio - Diagnostica sequenziale

La diagnostica deve seguire una sequenza gerarchica: indagini non invasive in primo luogo; prove parzialmente invasive o invasive solo se strettamente giustificate e motivate dai risultati preliminari.

Questa sequenza limita i danni al bene e migliora l'affidabilità interpretativa, riducendo le prove invasive ai punti critici.

Quarto Principio - Trasparenza dei metadati e tracciabilità delle indagini

Tutte le indagini devono essere corredate da metadati obbligatori e archiviate in formati interoperabili per garantire tracciabilità, ripetibilità e comparabilità. La registrazione completa dei parametri strumentali e delle condizioni di misura è condizione necessaria per analisi comparativa e validazione dei risultati.

Quinto Principio - Prova pilota obbligatoria per tecnologie o soluzioni non consolidate

L'applicazione in opera di tecnologie, materiali o protocolli sperimentali richiede test pilota su porzioni rappresentative con KPI (*Key Performance Indicators*) definiti, in modo da validare scientificamente e tecnicamente la nuova soluzione. I test pilota devono essere sottoposti a controllo qualità e a verifiche da terza parte indipendente.

Sesto Principio - Monitoraggio continuo come requisito obbligatorio

Il monitoraggio continuo delle condizioni e delle performance degli interventi, durante e dopo i lavori, deve costituire un requisito obbligatorio con durata minima, frequenze, KPI e modalità di reportistica predefinite.

Solo serie temporali standardizzate permettono valutazioni di efficacia nel medio-lungo periodo.

Settimo Principio - Formazione specialistica

È necessario promuovere la formazione specialistica per tutti gli *stakeholders* coinvolti nel processo di restauro e risanamento: operatori diagnostici, tecnici di cantiere, laboratori analitici, progettisti e direttori lavori.

Competenze adeguate e conoscenze aggiornate riducono errori di misura, interpretazione e applicazione degli interventi, migliorando la durabilità e l'efficacia degli interventi.

6.1.2 Best Practices

La presente sezione propone un insieme coeso di best practices finalizzate a guidare la progettazione, l'esecuzione e la verifica degli interventi di risanamento su edifici affetti da umidità da risalita capillare.

Il nucleo operativo preliminare, fondato sulle evidenze emerse dai casi studio, si applica all'intero patrimonio architettonico con manifestazioni riconducibili alla risalita capillare, e in particolare a quegli interventi soggetti a vincoli di tutela ove la sequenza diagnostica e l'attenzione materica sono imprescindibili.

Le procedure vanno adeguate alle specificità tipologiche e ai vincoli normativi locali, benché i requisiti informativi e le modalità di verifica proposte siano pensate come standard minimi trasferibili.

Le Best Practices sono articolate in cinque fasi operative, ognuna con azioni obbligatorie, deliverable minimi, requisiti tecnici, ruoli e decision-point. Le fasi sono pensate come un processo iterativo e controllato che include test pilota e monitoraggi obbligatori come strumenti di validazione degli interventi.

6.1.2.1 Fase 1 - Inquadramento territoriale

OBIETTIVO

Identificare e caratterizare le condizioni territoriali, idrogeologiche e infrastrutturali che determinano o influenzano l'apporto idrico verso l'organismo edilizio.

Il fine è fornire la base conoscitiva necessaria per progettare opere di gestione della sorgente (drenaggi, vespaio, regimazione...) e per interpretare correttamente i fenomeni di risalita capillare alla scala di sito ed organismo edilizio.

AZIONI MINIME (SEQUENZA E GRADO DI APPROFONDIMENTO)

1 - Raccolta preliminare della documentazione

- Cartografia tecnica e catastale, ortofoto attuali e storiche, piani di settore (es. idrogeologia, uso del suolo), planimetrie delle reti fognarie e delle condotte esistenti
- Verifica di eventi noti (es. allagamenti, modifiche idrauliche, sversamenti) e delle interferenze con infrastrutture (es. reti, tombini, scarichi)

2 - Indagini e prospezioni geotecniche

- Sondaggi stratigrafici mirati alle fondazioni e alla fascia perimetrale; prove penetrometriche
- Prove di permeabilità e caratterizzazione del terreno per stimare il coefficiente di permeabilità

3 - Monitoraggio piezometrico

- Installazione di piezometri temporanei o permanenti con registrazione automatica dei livelli per almeno un ciclo stagionale come baseline; se possibile estendere fino a 12 mesi per comprenderne le oscillazioni.

4 - Analisi chimico-fisica dell'acqua e del terreno

- Valutazione dell'aggressività (salinità, conduttività, pH...) utile per progettare gli interventi di desalinizzazione delle murature e per la scelta dei materiali di fondazione/drenaggio

5 - Verifica delle condizioni di scarico e

dell'apporto idrico laterale

- Controllo delle grondaie, scarichi pluviali, perdite di rete, presenze di corpi idrici o canali nelle vicinanze che possano alimentare la falda o favorire infiltrazioni

DELIVERABLE MINIMI

- Rapporto geotecnico/idrogeologico: planimetria con punti di indagine, sezioni stratigrafiche, grafici piezometrici, interpretazione idrogeologica e raccomandazioni preliminari per la gestione della sorgente
- Layer GIS (shapefile/GEOJSON): punti di sondaggio, piezometri, linee fognarie, aree critiche
- Database dei dati: serie temporali piezometriche ed eventuali analisi chimiche in CSV
- Sintesi esecutiva con decision-points e vincoli (es. necessità di opere di drenaggio, limitazioni allo scavo per vincoli archeologici...)

REQUISITI TECNICI E COMPETENZE

- Indagini eseguite da tecnici abilitati
- Documentazione della taratura/ scheda tecnica degli strumenti e delle procedure di misura
- Esportazione dati in formati interoperabili e consegna dei dati grezzi oltre al report interpretativo

DECISION-POINT

Se il rapporto geotecnico conferma la presenza di un apporto idrico di falda o sorgenti idriche significative, la progettazione e l'esecuzione delle opere di gestione della sorgente devono essere considerate prerequisito obbligatorio per l'avvio degli interventi di risanamento.

Le opere di gestione della sorgente devono essere sottoposte a collaudo funzionale (es. verifiche di portata, assenza di ristagni) prima dell'inizio delle successive fasi.

NOTE CRITICHE E RACCOMANDAZIONI OPERATIVE

1 - Non sottovalutare la fase geotecnica

La carenza o l'assenza di dati geotecnici è una delle lacune ricorrenti riscontrate nei casi studio e compromette la durabilità delle soluzioni applicate. Un inquadramento insufficiente può portare ad interventi inefficaci e poco sostenibili.

2 - Dimensionamento del monitoraggio piezometrico

L'interpretazione delle riduzioni del contenuto idrico deve sempre tener conto della variabilità stagionale.

3 - Valutare l'aggressività dell'acqua e del terreno di fondazione

Analisi chimiche di falda/terreno sono indispensabili per progettare adeguate misure di intervento e selezionare materiali e soluzioni compatibili al grado di aggressività chimica rilevato.

6.1.2.2 Fase 2 - Conoscenza storico-evolutiva

OBIETTIVO

Costruire un profilo storico, tipologico, costruttivo e materico dell'organismo edilizio che renda interpretabili le dinamiche delle patologie osservate e definisca i vincoli d'intervento.

La conoscenza storico-evolutiva serve a distinguere cause e sintomi, ricostruire interventi pregressi (e i loro effetti) e determinare le condizioni di compatibilità e reversibilità delle possibili misure conservative.

AZIONI MINIME (SEQUENZA CONSIGLIATA)

1 - Ricerca documentale e archivistica

- Consultare archivi istituzionali, pratiche edilizie, progetti e perizie pregresse, fotografie storiche, catasti e piani urbanistici
- Registrare concessioni e permessi antecedenti che possano aver introdotto alterazioni (es. applicazione di barriere, opere di consolidamento...)
- Raccogliere testimonianze orali, sempre documentandone fonte e data

2 - Rilievo geometrico e topografico aggiornato

- Eseguire rilievi metrici e rilievo fotografico sistematico; integrare, dove utile, fotogrammetria o laser-scanner per produrre nuvole di punti e ortofoto georeferenziate
- Contrassegnare punti di controllo topografici e referenziare ciascun rilievo al sistema cartografico utilizzato per il progetto

3 - Rilievo materico e tipologico

- Schedatura dei materiali visibili: tipologia, tessitura muraria, tecniche costruttive, condizioni di degrado, coesistenza di materiali incompatibili, presenza di criticità locali

4 - Analisi degli interventi pregressi

- Ricostruire cronologia, tipologia e materiali/tecniche impiegate negli interventi precedenti; valutare esiti e correlare eventuali peggioramenti dello stato di conservazione alle pratiche adottate (es. uso di intonaci cementizi, finiture non traspiranti...)
- Documentare efficacia/insuccesso delle tecnologie applicate e le conseguenze in combinazione con altri interventi

DELIVERABLE MINIMI

- Dossier storico-evolutivo: cronologia sintetica, elenco fonti, estratti di documenti utili; sezioni specifiche su interventi pregressi e impatti osservati
- Tavole di rilievo: planimetrie aggiornate, sezioni, piante con annotazioni materiche
- Raccolta fotografica geotaggata: immagini georeferenziate con descrizione, scala, orientamento e condizioni di luce
- Scheda dei materiali e delle tecniche costruttive: per ogni elemento indicare descrizione, punto di rilevamento, stato conservativo, priorità d'intervento
- Mappa GIS integrata: stratificazione dati, layer materiali, layer interventi pregressi, punti di indagine potenziale per analisi materiche o di dettaglio

REQUISITI TECNICI E COMPETENZE RICHIESTE

- Multidisciplinarietà dei professionisti coinvolti
- Strumentazione: apparecchiatura fotografica georeferenziabile, stazione totale, software per fotogrammetria/ nuvole di punti
- Formati e metadati obbligatori: coordinate di riferimento, timestamp, identificativi operatore, descrizione condizioni di misura, versione file

DECISION-POINT

Se emergono elementi di alterazione strutturale o interventi pregressi non documentati che possano interferire con eventuali interventi conservativi, occorre predisporre una campagna approfondita di caratterizzazione materica e/o stabilità strutturale prima di procedere con i successivi interventi.

Se la schedatura individua materiali fragili o eterogenei, pianificare prove pilota di pulitura e consolidamento su porzioni limitate prima di interventi diffusi sulle superfici.

INTEGRAZIONE CON FASE 1 E FASE 3

I dati di rilievo e il GIS prodotti in questa fase devono essere integrati con gli output della Fase 1 per creare un quadro sinottico.

I punti di prelievo per analisi salina, petrografica o microstratigrafia vanno selezionati sulla base del rilievo e riportati con coordinate precise per la successiva fase diagnostica (Fase 3).

NOTE CRITICHE E RACCOMANDAZIONI

1 - Documentare tutto

Il dossier storico deve contenere non solo le fonti, ma anche una sintesi critica: quali interventi pregressi sono stati efficaci, quali hanno peggiorato le condizioni e perché. Questo aiuta ad evitare errori ripetuti.

2 - Limitare i prelievi invasivi

La schedatura deve essere utile a circoscrivere ed evitare prelievi invasivi non necessari e a facilitare la selezione di materiali e interventi efficaci e compatibili con l'organismo edilizio. Quando necessari, privilegiare il campionamento di materiale già distaccato o micro-campionamenti accuratamente documentati.

3 - Prevedere una "Scheda di Compatibilità"

Un documento sintetico che metta in relazione materiali, tecniche costruttive e possibili interventi consigliati e sconsigliati (utile in fase di progettazione esecutiva).

6.1.2.3 Fase 3 - Diagnosi preliminare

OBIETTIVO

Ottenere un quadro patologico e causale il più completo possibile, minimizzando l'invasività delle indagini e garantendo la tracciabilità, la ripetibilità e la comparabilità dei dati raccolti.

La diagnosi deve consentire di distinguere manifestazioni (sintomi) dalle cause e di fornire la baseline operativa per la definizione di KPI, punti di monitoraggio permanenti e per la progettazione degli interventi e di eventuali test pilota.

AZIONI MINIME (SEQUENZA OPERATIVA E DETTAGLI ESECUTIVI)

1 - Rilievo visivo e fotografico sistematico

- Mappatura planimetrica e fotografica di tutte le manifestazioni di degrado
- Fotografie geotaggate e annotate per ogni punto
- Produzione di layer delle manifestazioni con codice identificativo univoco per ogni elemento rilevato

2 - Diagnostica non invasiva obbligatoria (prima e come precondizione per qualsiasi ulteriore campagna diagnostica)

- Termografia infrarossa (IRT) campagne termografiche passive per mappare anomalie termiche. Registrazione dei metadati. Utilizzare immagini georeferenziate e associare ogni frame al corrispondente punto geolocalizzato.
- Misure microclimatiche: installazione di sensori per temperatura e umidità relativa nei punti significativi interni ed esterni; sincronizzazione temporale, registrazione continua per la definizione della baseline
- Misure superficiali temo-igrometriche: misure di riferimento con strumenti a contatto per integrare la mappatura qualitativa termografica con dati quantitativi puntuali

3 - Progettazione del monitoraggio

- Definire punti permanenti georeferenziati che verranno monitorati durante tutte le fasi: pre-intervento (baseline), durante l'esecuzione degli interventi e nel post-intervento
- Definire durata minima della baseline: almeno un ciclo stagionale; dove possibile estendere a 12 mesi per

migliori evidenze

- Stabilire frequenze e protocolli di esecuzione delle campagne di monitoraggio

4 - Diagnostica parzialmente invasiva (solo se giustificata)

- Prelievi mirati e limitati (preferibilmente da materiale già distaccato): campionamenti per analisi salina, prove gravimetriche, caratterizzazione dei materiali (documentare sempre posizione, profondità, altezza e modalità di prelievo)
- Carotaggi minimi o saggi stratigrafici solo se necessari per comprendere la stratigrafia degli elementi architettonici (documentare sempre posizione, profondità, altezza e modalità di prelievo)

5 - Richiesta di studi specialistici

- In presenza di fenomeni complessi (interazione salino-chimica severa, biodeterioramento, patologie strutturali correlate, presenza di materiali o superfici con rischi specifici) commissionare studi specialistici per approfondire la causa e definire le contromisure

DELIVERABLE MINIMI

- Mappa preliminare delle criticità: localizzazione, tipo di patologia, priorità di intervento
- Dataset termografico geolocalizzato: immagini e report interpretativo; metadata obbligatori per ciascuna immagine
- Dataset microclima e misure superficiali: serie temporali esportabili con metadata
- Scheda prelievi: per ogni campione definire ID, coordinate, descrizione, dimensione, condizione di campionamento, matrici inviate al laboratorio
- Referti di laboratorio: report e dati grezzi di ciascuna analisi di laboratorio
- Report diagnostico integrato: baseline, correlazioni tra indagini, proposta di punti di monitoraggio permanenti, valutazioni di causa, suggerimenti per le fasi successive

REQUISITI TECNICI E COMPETENZE

- Professionisti: operatori con formazione certificata per termografie IR e analisi specialistiche
- Termocamera (specifiche minime): sensore ≥ 320×240 px, risoluzione termica ≤ 0,05 °C, IFOV ≈ 1,5 mrad. Per ogni campagna termografica registrare: data/ora, posizione georeferenziata, emissività assunta, distanza dall'oggetto, condizioni ambientali, impostazioni della camera, calibrazione, nome operatore.
- Analisi microclimatiche e sensori superficiali: dichiarazione di accuratezza, procedura di calibrazione documentata, esportazione dati georeferenziati in CSV
- Analisi di laboratorio: preferire laboratori accreditati; in assenza di accreditamento richiedere trasparenza su protocolli, limiti di rilevabilità e ripetibilità delle misure

DECISION-POINT

Se la diagnostica non invasiva identifica anomalie chiare ma non riesce a determinarne la causa, programmare saggi e prelievi mirati. Tali indagini devono essere giustificate nel report.

Se le analisi salino-chimiche o petrografiche mostrano criticità rilevanti, occorre richiedere la progettazione di interventi mirati di desalinizzazione ed eventuali test pilota per le soluzioni proposte.

NOTE CRITICHE E RACCOMANDAZIONI OPERATIVE

1 - Non trarre conclusioni definitive dalla sola termografia IR

La termografia IR è uno strumento qualitativo di grande utilità, ma va integrata con misure quantitative e indagini mirate.

2 - Standardizzare la registrazione dei metadati

La mancata registrazione completa dei parametri di misura e diagnosi è la causa principale di non compatibilità fra campagne diagnostiche e di monitoraggio. Occorre imporre dei metadata obbligatori per la ripetibilità delle indagini.

6.1.2.4 Fase 4 - Progettazione ed esecuzione degli interventi

OBIETTIVO

Definire e mettere in opera interventi integrati che risolvino prioritariamente le cause dell'umidità di risalita capillare e, successivamente, i suoi sintomi.

Validare soluzioni sperimentali con test pilota e procedere all'esecuzione operativa su larga scala solo dopo esito positivo del pilot.

Garantire compatibilità materica, reversibilità, minimo intervento, riconoscibilità e sostenibilità, rispettando una sequenza operativa che renda i risultati verificabili e duraturi nel medio-lungo periodo.

Considerare il principio chiave secondo il quale nessuna azione, presa singolarmente, rappresenta una soluzione autonoma: tutte le azioni vanno integrate in modo sinergico, documentate e validate; la sequenza temporale è parte integrante dell'efficacia e della durabilità dell'intervento di risanamento.

AZIONI MINIME (SEQUENZA OPERATIVA)

1 - Strategia integrata e progetto esecutivo

- Redazione del progetto esecutivo con sintesi gli esiti delle fasi precedenti, definisca obiettivi, KPI, cronoprogramma, ruoli e responsabilità in cantiere

2 - Opere di gestione della sorgente idrica (prerequisito)

- Realizzare e collaudare, ove possibile, opere di drenaggio, regimazione esterna, chiusura orizzontale di base ventilata, sistemazione delle pendenze e dei dispositivi di smaltimento delle acque meteoriche.

3 - Implementazione del sistema di deumidificazione per l'arresto della risalita capillare (prerequisito)

- Da effettuare preliminarmente a qualsiasi altro intervento di risanamento dell'organismo edilizio per avviare quanto prima la deumidificazione delle murature e garantire la durabilità degli interventi successivi
- Prediligere tecnologie e sistemi non invasivi che agiscono direttamente sulla causa del fenomeno della risalita capillare

4 - Ventilazione e controllo microclimatico

- Predisposizione di soluzioni di ventilazione naturali o meccaniche per favorire l'evaporazione controllata, evitare fenomeni di condensazione e limitare il biodeterioramento
- Se necessario (es. locali interrati o ipogei) utilizzare sistemi di deumidificazione dell'aria come supporto al controllo microclimatico

5 - Test pilota (per soluzioni non consolidate)

- Redazione del protocollo pilota: estensione e localizzazione dell'area d'intervento, durata minima, KPI, misure e strumenti, procedure di monitoraggio, verifica e validazione degli interventi

6 - Estrazione e gestione dei sali solubili

- La deumidificazione delle murature può mobilizzare i sali solubili verso le superfici murarie: pianificare e programmare interventi di rimozione dei sali (impacchi, lavaggi controllati, spazzolatura meccanica) secondo protocolli adatti al litotipo.
- Il trattamento deve essere, preferibilmente, eseguito dopo una prima stabilizzazione del contenuto umido residuo per evitare ulteriori ricomparse dei sali in superficie.
- Preferire impacchi e lavaggi controllati; utilizzare prodotti compatibili a basso impatto; eseguire prove preliminari per compatibilità chimico-fisica con il substrato

7 - Trattamenti biologici, pulitura, consolidamento e protezione delle superfici

- Identificazione delle specie microbiche (fotoautotrofe ed eterotrofe)
- Selezione ed applicazione del trattamento di disinfezione biologica
- Pulitura delle superfici
- Consolidamento delle superfici
- Protezione delle superfici
- Attenzione all'utilizzo di prodotti che riducono la traspirabilità delle murature che potrebbero ostacolare l'evaporazione del contenuto umido residuo presente nelle murature; attenzione alla compatibilità materica dei prodotti che potrebbero innescare ulteriori fenomeni di degrado (es. accumulo di sali solubili)

8 - Ripristino delle finiture superficiali

- Verifica della stabilità igrometrica dei paramenti murari
- Applicazione di intonaci risananti e finiture superficiali traspiranti (preferibilmente a base di calce naturale), compatibili con il substrato
- Se non è possibile attendere la completa asciugatura delle murature occorre prevedere l'applicazione di cicli di intonaco risanante

9 - Monitoraggio continuo e post-intervento

- Monitoraggio continuo e report periodici
- Verifica dei KPI e implementazione di eventuali misure correttive

10 - Predisposizione della documentazione e piano di manutenzione

- Redazione dettagliata della documentazione di cantiere, report finale KPI
- Predisposizione del piano di manutenzione programmata
- Archiviazione completa della documentazione per audit e studi comparativi

DELIVERABLE MINIMI

- Report esecutivo con cronoprogramma, obiettivi, piano pilota e KPI
- Protocollo test pilota documentato e report pilota con dati grezzi
- Documentazione di cantiere: giornale lavori, schede materiali, certificazioni fornitori, schede di controllo qualità
- Report SAL e conclusivo con verifica KPI e piano di manutenzione
- Archiviazione dei dataset e dei metadati in formati interoperabili

REQUISITI TECNICI E COMPETENZE

- Team multidisciplinare
- Laboratori accreditati per prove di compatibilità materica, analisi salina e microbiologiche
- Validazione dei pilot da terza parte
- Rispetto delle tempistiche e della

sequenza di intervento

INTEGRAZIONE OPERATIVA DELLA CNT-DOMODRY

Sintesi e principio operativo

La CNT-Domodry è oggi una tecnologia consolidata che agisce direttamente sulla causa fisica della risalita capillare e che consente l'arresto del fenomeno e la progressiva riduzione del contenuto idrico delle murature.

Tuttavia, una volta risolta la causa dell'umidità è importante intervenire anche sui sintomi. Pertanto tale tecnologia non costituisce una soluzione universale al risanamento delle murature e va integrata all'interno di una strategia di risanamento più ampia che affianchi misure complementari per il trattamento dei sintomi della risalita capillare e delle naturali manifestazioni di degrado legate al processo di asciugatura delle murature.

Sequenza operativa raccomandata per progetti di risanamento che prevedono l'installazione dei dispositivi CNT-Domodry

- Baseline diagnostica completa per confermare l'effettiva presenza di umidità da risalita capillare
- Installazione della CNT come azione preventiva e avvio del monitoraggio continuo
- Contestualmente all'installazione dei dispositivi CNT, prevedere l'installazione dei due sensori-trasmettitori Wi-Fi per il controllo da remoto dell'umidità muraria e ambientale
- In presenza di microclima particolarmente sfavorevole, o per favorire l'evaporazione del contenuto umido residuo presente nelle murature, prevedere la predisposizione di adeguati sistemi di ventilazione controllata e deumidificazione ambientale
- Monitoraggio del contenuto umido residuo ed estrazione dei sali solubili dalle murature
- Trattamenti biologici, pulitura, consolidamento e protezione delle superfici
- Applicazione di intonaci e finiture traspiranti (preferibilmente dopo la stabilizzazione dei parametri igrometrici)
- Monitoraggio post-intervento e piano di manutenzione

Rischi specifici e interventi di mitigazione

- Effetti estetici post-intervento (efflorescenze, alterazioni cromatiche, degrado delle finiture): in seguito al naturale fenomeno di evaporazione del contenuto umido residuo presente nelle murature possono insorgere ulteriori fenomeni di degrado legati al trasporto dei sali solubili in superficie sotto forma di efflorescenze e sub-efflorescenze saline. L'accumulo di sali solubili in superficie, combinato con condizioni microclimatiche sfavorevoli, comporta l'assorbimento dell'umidità ambientale da parte dei sali igroscopici e la comparsa di alterazioni cromatiche localizzate e degrado delle finiture superficiali. Tale fenomeno è aggravato se si utilizzano finiture superficiali non traspiranti che bloccano l'evaporazione del contenuto umido residuo e l'accumulo di sali al di sotto degli strati di finitura. Pertanto, occorre precisare che la comparsa di efflorescenze saline dopo l'attivazione di un sistema di deumidificazione è spesso segnale che il processo di asciugatura sta avvenendo correttamente e non un fallimento dell'intervento. È tuttavia condizione che richiede azioni correttive programmate (desalinizzazione e finiture traspiranti).
- Asciugatura troppo rapida: un'accelerazione eccessiva dell'evaporazione può generare tensioni rapide negli strati superficiali, con conseguenti fenomeni fessurativi

o distacco. In questi casi occorre rimodulare la portata e la durata dei flussi d'aria (naturali o forzati) in funzione delle condizioni temo-igrometriche; evitare shock termici o correnti d'aria concentrate sulle superfici più sensibili, intensificando le azioni di monitoraggio.

- Asciugatura troppo lenta: può dipendere da spessori murari importanti, elevato contenuto idrico iniziale, presenza di sorgenti laterali o condizioni microclimatiche sfavorevoli. Per ovviare a tale problematica occorre: verificare e risolvere la presenza di eventuali apporti idrici residui (es. infiltrazioni localizzate, umidità da constrospinta laterale del terreno...); combinare il sistema CNT con sistemi di ventilazione controllata e di deumidificazione ambientale.

6.1.2.5 Fase 5 - Monitoraggio continuo e PPM

OBIETTIVO

Verificare l'efficacia e la durabilità degli interventi, attivare azioni correttive quando necessario e definire piani di manutenzione programmata per la conservazione dell'organismo edilizio nel medio-lungo periodo.

Il monitoraggio deve essere considerato parte integrante dell'intervento e deve essere previsto sin dalle prime fasi di progettazione: i KPI definiti nel progetto sono gli strumenti oggettivi per la valutazione di efficacia degli interventi.

PRINCIPI E CAMPO DI APPLICAZIONE DEL MONITORAGGIO CONTINUO

- Il monitoraggio va concepito come intervento continuativo, non come attività episodica
- Deve coprire tutte le fasi operative
- I risultati delle campagne di monitoraggio devono essere depositati in forma interoperabile e confrontabile, con metadati completi

DURATA MINIMA RACCOMANDATA

I fenomeni legati all'umidità mostrano variabilità stagionali su scale temporali molto ampie che richiedono osservazioni multiple per attribuire con sicurezza gli effetti all'intervento di risanamento.

- Minimo raccomandato: 12-24 mesi post-intervento
- Consigliato: almeno 36 mesi per l'acquisizione di dati su più cicli stagionali e consentire la riduzione di bias stagionali

TIPOLOGIA, FREQUENZA E CRITERI OPERATIVI MINIMI

Microclima (parametri ambientali)

- Finalità: interpretare l'andamento termo-igrometrico, identificare condizioni che favoriscono fenomeni di condensazione o biodeterioramento, verificare la qualità del comfort indoor
- Misure raccomandate: temperatura e umidità relativa ambientali
- Frequenza: registrazione automatica oraria o almeno 4 misure giornaliere per i primi due anni

Condizioni termo-igrometriche della muratura (parametri superficiali)

- Finalità: verificare l'effettivo processo di deumidificazione delle murature
- Metodi: termoigrometro a contatto, sensori termo-igrometrici, prove gravimetriche
- Frequenza: registrazione automatica orario o almeno 4 misure giornaliere per il primo anno nel caso di sensori termo-igrometrici; misure trimestrali il primo anno, semestrali gli anni

successivi, nel caso di termo-igrometro a contatto; misure annuali nel caso di prove ponderali

Termografia IR

- Finalità: mappare l'estensione delle anomalie termiche e verificarne la regressione
- Frequenza: trimestrale o semestrale durante la fase attiva di asciugatura; annuale per le verifiche di mantenimento
- Condizioni: le campagne termografiche devono essere eseguite in condizioni termo-igrometriche ambientali comparabili; necessità di archiviazione dei metadati
- Specifiche minime della termocamera: sensore ≥ 320×240 px; risoluzione termica ≤ 0,05 °C; IFOV ≈ 1,5 mrad

Ispezione fisica e documentazione fotografica

- Da effettuare ad ogni SAL e in concomitanza di ciascuna fase saliente di cantiere e di campagna di monitoraggio

KPI: ESEMPI E METODO DI DEFINIZIONE

I KPI (*Key Performance Indicators*) rappresentano la base per i *decision-point* e ciascuno deve indicare metodo di misura, strumentazione accettata, punti di riferimento, tolleranze e procedure di verifica.

Non è possibile stabile a priori soglie numeriche fisse in quanto tali soglie devono essere calibrate sul caso specifico (tipologia edilizia, materiali da costruzione, storia, contesto climatico) e concordate in sede di progetto.

Esempi di KPI possono essere:

- Riduzione % del contenuto idrico rispetto alla baseline
- Riduzione dell'anomalia termica (m^2) mediante confronto delle termografie
- Stabilità del microclima indoor entro soglie predefinite

DECISION-POINT

Occorre definire in fase di progetto le soglie di KPI che innescano azioni correttive concrete, ad esempio:

- Soglia A - Allarme (*early warning*)
- Soglia B - Azione correttiva obbligatoria
- Soglia C - Revisione strategica

DELIVERABLE MINIMI

- Report periodici con: dati georeferenziati grezzi, metadati obbligatori, grafici temporali e tabelle di sintesi (con confronto baseline), mappe termografiche georeferenziate e immagini di ispezione geotaggate, analisi comparativa KPI, commenti interpretativi, azioni suggerite
- Registro interventi e manutenzioni eseguite
- Report finale: valutazione finale dei KPI, piano di manutenzione programmata, deposito completo del dataset
- Archiviazione: deposito dei dati grezzi e dei metadata in *repository* (formato interoperabile, descrizione dataset)

6.2

OPEN KNOWLEDGE PLATFORM TOOL

6.2 Open Knowledge Platform Tool

6.2.1 Raccomandazioni per standardizzazione, ricerca e policy

Le evidenze ricavate dai risultati della ricerca mostrano che il primo nodo da sciogliere per rendere confrontabili e verificabili i risultati degli interventi di restauro e risanamento sul patrimonio architettonico è la mancanza di un'infrastruttura informativa coerente.

Ogni campagna diagnostica, test pilota e intervento di cantiere deve essere accompagnato da un pacchetto informativo digitale che consenta verifica retrospettiva, riuso e comparabilità dei dati: i file grezzi devono essere esportabili in formati aperti (CSV per serie temporali, GeoTIFF/GeoJSON per carte e immagini georeferenziate) e i metadati devono documentare in modo esaustivo *timestamp*, coordinate, strumento e taratura, parametri di acquisizione, condizioni ambientali e operatore. Solo su questa base i singoli casi possono essere trasformati in conoscenza olistica e gli errori interpretativi possono essere ridotti.

Parallelamente all'imposizione di regole sui formati e sui metadati è necessario procedere alla standardizzazione delle procedure e dei requisiti tecnici. In particolare, la termografia, il monitoraggio igrometrico, le analisi saline e le prove gravimetriche devono essere normalizzate con soglie minime strumentali, protocolli di acquisizione e metodi di valutazione dei KPI. Tale sforzo metodologico è condizione necessaria per rendere confrontabili i dataset e per consentire valutazioni statistiche e sperimentali affidabili.

Per favorire l'interoperabilità nel ciclo di vita dell'intervento si raccomanda l'adozione di standard BIM/H-BIM e IFC come struttura di integrazione, collegandoli a sistemi GIS e a un Common Data Environment (CDE) che raccolga schede operative, documentazione di cantiere e dataset di monitoraggio. Una tale infrastruttura consentirebbe di unificare informazioni di natura diversa (3D, temporali, analitiche) e abilitare strumenti di supporto predittivi nelle fasi progettuali e di manutenzione.

Questo orientamento trova conferma e giustificazione nella letteratura sulle tecnologie informatiche applicate al progetto e alla gestione dei processi edilizi: scanner laser, stazioni totali, UAS, fotogrammetria digitale e software di modellazione hanno già semplificato la rappresentazione e il controllo progettuale e consentono la raccolta integrata di dati [Hong (2020); Jin (2019); Llatas (2020)].

L'introduzione del BIM ha dimostrato vantaggi concreti nel digitalizzare le fasi del ciclo di vita e nell'identificare criticità di processo prima dell'esecuzione [Cursi (2022); Hauashdh (2022); Hong (2020); Nikmehr (2021)], come documentato anche da casi applicativi più recenti [Al-Muqdadi (2023); Banfi (2021); Belmondo (2018)].

Analogamente AMI (*Advanced Modalities of Interaction*), IoT (*Internet of Things*), AI (*Intelligenza Artificiale*), DSS (*Decision Support System*) e ML (*Machine Learning*) ampliano le possibilità di diagnosi predittiva e di realizzazione di *digital twin* per la gestione 4D del patrimonio [Hong (2020); Llatas (2020); Nikmehr (2021); Hauashdh (2022)].

Tuttavia, occorre riconoscere i limiti pratici legati all'interoperabilità tra strumenti, ancora parziale, e al trasferimento dei dati che spesso determina perdita o disomogeneità delle informazioni [ISO/IEC 2382; Cursi (2022); Hauashdh (2022); Yang (2020)].

Questo è particolarmente evidente nell'ambito del restauro e della manutenzione del patrimonio costruito, dove la documentazione digitale è scarsa, acquisita con metodi disomogenei

e quindi poco confrontabile [Cursi (2022); Hauashdh (2022); Hong (2020); Llatas (2020); Lubelli (2018); Nikmehr (2021); Yang (2020)].

Per superare tali limiti la ricerca e le procedure analitiche devono essere sistematizzate e normalizzate con metodologie, formati e protocolli articolati in maniera tale da consentire l'interazione tra dati eterogenei e la loro digitalizzazione in flussi informativi interoperabili [Shvaiko (2013)].

L'efficacia di questo percorso e la trasformazione delle tecnologie disponibili in un valido supporto operativo richiedono interventi paralleli su più fronti: definizione tecnica, sperimentazione, formazione e governance.

Operativamente, il primo passo potrebbe essere la costituzione di un tavolo tecnico nazionale multidisciplinare che elabori linee guida sperimentali: protocolli diagnostici, template per schede (compatibili con ICCD/ICR e con la scheda tipo sviluppata nella ricerca), formati di deposito dati e uno schema minimo di KPI contrattuali. Queste linee guida vanno poi validate con progetti-pilota selezionati (pubblici e privati) che prevedano l'obbligo di depositare dataset e report in un *repository* istituzionale, consentendo così di verificare e calibrare i protocolli prima di una generalizzazione normativa.

Sul versante delle politiche pubbliche, i Criteri Ambientali Minimi (CAM) e i capitolati di gara rappresentano leve immediate e concrete per diffondere pratiche omogenee: inserire nei bandi requisiti di diagnosi minima, depositi di metadati e periodi di monitoraggio obbligatorio permette di normalizzare prassi e incentivare la produzione di dataset utili alla ricerca. Occorre tuttavia precisare che i CAM e i capitolati non sostituiscono una norma tecnica specialistica: servono come strumento contrattuale per innestare un cambiamento di pratica mentre si sviluppano gli standard tecnici veri e propri, tenendo conto delle esigenze di tutela del patrimonio storico e della frammentazione amministrativa italiana.

La ricerca deve, inoltre, essere orientata alla produzione di dataset longitudinali su casistiche tipologiche diversificate per consentire la definizione di KPI robusti e trasferibili, nonché a sperimentazioni comparative che verifichino durata e trasferibilità delle soluzioni in contesti climatici e costruttivi diversi. Lo sviluppo di template H-BIM per la catalogazione diagnostica e l'applicazione di AI e ML per modelli predittivi e *digital twin* rappresentano investimenti prioritari, ma vanno perseguiti accompagnando ogni studio con protocolli di validazione e criteri di qualità dei dati.

Infine, la diffusione di buone pratiche e la transizione verso standard operativi richiedono percorsi di formazione certificata per tutti gli *stakeholders* coinvolti nel processo di restauro del patrimonio architettonico e meccanismi di validazione e certificazione dell'efficacia di soluzioni, tecniche e materiali innovativi.

La governance dei dati (deposito, accesso, proprietà intellettuale e tracciabilità) va regolata in modo chiaro: la ricerca indica che soluzioni tecnologiche come la blockchain possono garantire la *proof-of-origin* dei dati [Eppinger (2021); Murray-Rust (2008)], ma la blockchain deve essere utilizzata come strumento di tracciatura, non come sostituto delle procedure di validazione scientifica.

Pertanto, l'adozione sistematica delle tecnologie digitali può trasformare radicalmente la gestione della conoscenza e della manutenzione del patrimonio, ma perché questo avvenga è necessario intervenire in modo coordinato sulla standardizzazione dei dati, sulla sperimentazione controllata, sulla formazione e su politiche pubbliche che incentivino la condivisione e la comparabilità delle informazioni [Cursi (2022); Hong (2020); Nikmehr (2021); AA.VV. (2021); Lubelli (2018)].

Nel tentativo di colmare il divario tra strumenti digitali disponibili e supporto decisionale nel campo della conservazione del patrimonio architettonico, diversi esperimenti hanno cercato di sviluppare sistemi informativi orientati alla gestione integrata dei dati e alla valutazione del rischio.

Tali esperienze condividono l'obiettivo di rendere accessibili, strutturate e comparabili informazioni complesse, a supporto delle scelte progettuali e delle strategie di manutenzione

preventiva e programmata del patrimonio architettonico.

Un riferimento consolidato in questo ambito è rappresentato dalla Carta del Rischio sviluppata dall'Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro (ISCR), concepita per fornire un quadro conoscitivo sullo stato di conservazione dei beni architettonici e sui relativi livelli di vulnerabilità e rischio. Il sistema distingue tra vulnerabilità individuale del bene e pericolo territoriale, configurandosi come un GIS integrato ad una banca dati specialistica.

Ciascun bene è catalogato attraverso schede dedicate, differenziate per categorie, che raccolgono informazioni anagrafiche e conservative quali tipologia, destinazione d'uso, ubicazione, epoca di costruzione e stato di conservazione, costituendo una base informativa utile per l'analisi a scala territoriale e la definizione di priorità di intervento [AA.VV. (2013); Beni Culturali, Carta del Rischio].

Un'impostazione analoga, orientata in modo più esplicito alla prevenzione del patrimonio architettonico, caratterizza il progetto sviluppato nell'ambito del Programma di Ricerca Interdisciplinare "Venezia 2021". In questo caso l'obiettivo era la definizione di indicatori e descrittori capaci di restituire il livello di vulnerabilità del patrimonio edilizio, fornendo un supporto conoscitivo alla definizione di strategie di restauro preventivo per la conservazione nel lungo periodo [AA.VV. (2021)].

Sempre nella prospettiva di integrare diagnosi, gestione e manutenzione, il programma di ricerca interuniversitario "SCN_00520 Product and process innovation for sustainable and planned maintenance, conservation and restoration of the cultural heritage MIUR Smart Cities and Communities and Social Innovation" ha portato allo sviluppo della piattaforma digitale HeMaIn (Heritage Maintenance Innovation). La piattaforma, realizzata in collaborazione con la società informatica TAB Consulting, è stata concepita come strumento di supporto alla gestione del processo di manutenzione del patrimonio architettonico, ponendo l'accento sull'organizzazione dei dati, sulla pianificazione degli interventi e sulla continuità informativa nel tempo [Bernardo (2021); Guida (2018); IES].

Nel loro insieme, queste esperienze dimostrano come l'efficacia degli strumenti digitali non risieda tanto nella singola tecnologia adottata, quanto nella capacità di strutturare l'informazione, renderla interoperabile e orientarla esplicitamente al processo decisionale. Al tempo stesso, esse evidenziano la necessità di un quadro metodologico e normativo condiviso che consenta di integrare tali strumenti all'interno di strategie di standardizzazione, ricerca applicata e policy, evitando la frammentazione di soluzioni isolate e difficilmente trasferibili.

6.2.2 Verso l'Open Knowledge Platform Tool

Il presente lavoro individua nello sviluppo di un'Open Knowledge Platform Tool un risultato operativo e metodologico centrale finalizzato a raccogliere, standardizzare e rendere confrontabili le informazioni necessarie all'intero processo di restauro e risanamento del patrimonio architettonico.

L'idea di un simile strumento informatico nasce dall'esigenza pratica e documentata di superare l'attuale frammentazione della documentazione, la scarsa confrontabilità dei dati e la difficoltà di trasferire la conoscenza tra contesti diversi, aspetti che la letteratura e i casi studio analizzati hanno ripetutamente evidenziato [Castelluccio (2019); Lubelli (2018); AA.VV. (2020)].

L'obiettivo è duplice: rendere disponibili dati e protocolli che supportino la manutenzione preventiva e programmata del patrimonio architettonico (piattaforma digitale come strumento operativo) e creare uno spazio dove le evidenze sperimentali possano essere raccolte per favorire l'innovazione (incubatore di innovazioni e buone pratiche). Infatti, non esiste ancora una piattaforma digitale aperta e implementabile che consenta in un unico database una panoramica critica degli strumenti, dei metodi, dei processi e dei materiali esistenti per supportare lo sviluppo della manutenzione preventiva e programmata

e per pianificare tutte le fasi di un progetto di restauro.

La piattaforma deve consentire la gestione integrata dell'intero ciclo di vita dell'intervento (conoscenza, progetto, intervento, monitoraggio, manutenzione) e facilitare l'adozione di protocolli ripetibili e verificabili, in coerenza con i principi del restauro e con i requisiti di sostenibilità.

Per essere utile alla comunità tecnico-scientifica e agli operatori, la piattaforma deve soddisfare requisiti stringenti di qualità informativa: tracciabilità delle fonti, metadati esaustivi, formati interoperabili, e meccanismi di certificazione e governance dei dati. A tale scopo la ricerca ha preso in considerazione soluzioni tecnologiche e procedure organizzative già disponibili (BIM/H-BIM, IFC, GIS, CDE), nonché strumenti per la proof-of-origin (es. blockchain) come supporto alla tracciabilità della provenienza dei dataset, senza però sostituire i processi di validazione scientifica [Eppinger (2021); Murray-Rust (2008); Cursi (2022); Nikmehr (2021)].

6.2.2.1 La scheda tipo

In seguito all'analisi dei metodi di catalogazione, dei modelli informativi attualmente in uso, si è deciso di sviluppare una "Scheda Tipo" pensata come dossier digitale per la raccolta strutturata delle informazioni relative a ciascun organismo architettonico.

Il suo scopo principale è trasformare informazioni eterogenee (archivistiche, spaziali, materiche, diagnostiche, operative...) in un corpus informativo strutturato, tracciabile e confrontabile.

Per garantire la piena integrazione con il quadro nazionale, la Scheda Tipo è stata costituita adottando le regole degli Standard Catalografici ICCD [CCD; Tucci (2018)] per la parte anagrafica e facendo riferimento alla Carta del Rischio sviluppata dall'ICR per la documentazione dello stato di conservazione [Accardo (2005); Beni culturali].

Per la descrizione tecnico-strutturale del bene si è fatto ricorso alla classificazione del sistema tecnologico definita dalla norma UNI 8290 (Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia), consentendo così la suddivisione dell'organismo edilizio in livelli informativi (classi di unità tecnologiche, unità tecnologiche, classi di elementi tecnici).

La sezione dedicata allo stato di conservazione è stata inoltre armonizzata con il lessico di UNI 11182:2006 (Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Descrizione della forma di alterazione - Termini e definizioni), per standardizzare l'attribuzione della tipologia di degrado, della gravità, della diffusione e delle azioni suggerite.

Per rispondere ad esigenze pratiche di ricerca, la Scheda Tipo è stata realizzata utilizzando l'open software *Obsidian v.1.1.16* che opera su file *Markdown* e consente una gestione e comparazione delle informazioni più efficiente. La scelta di questo strumento garantisce, altresì, leggerezza dei dati, possibilità di link interni, *versioning* e facilità di esportazione dei dati verso formati più strutturati.

Proprio le caratteristiche del software hanno consentito di progettare una scheda che non si configura come un documento isolato: ogni campo è pensato per collegarsi a file esterni (modelli 3D/IFC, GeoTIFF, CSV, report di laboratorio), consentendo l'integrazione con workflow BIM/H-BIM e con piattaforme open data.

La "Scheda Tipo" si articola in due macro-capitoli, "Anagrafica del bene architettonico" e "Descrizione architettonico/strutturale del bene architettonico", che coprono tutte le aree informative necessarie per seguire l'intero ciclo di vita dell'edificio.

La sezione "Anagrafica del bene architettonico" contiene (Fig. 221):

- Dati anagrafici (Identificazione univoca del bene, livelli di ricerca, soggetti coinvolti, riferimenti archivistici e bibliografici): informazioni che consentono di ricondurre ogni scheda a contesti amministrativi e storici certi, fondamentali per la rintracciabilità e la validazione delle fonti.
- Georeferenziazione e dati di contesto

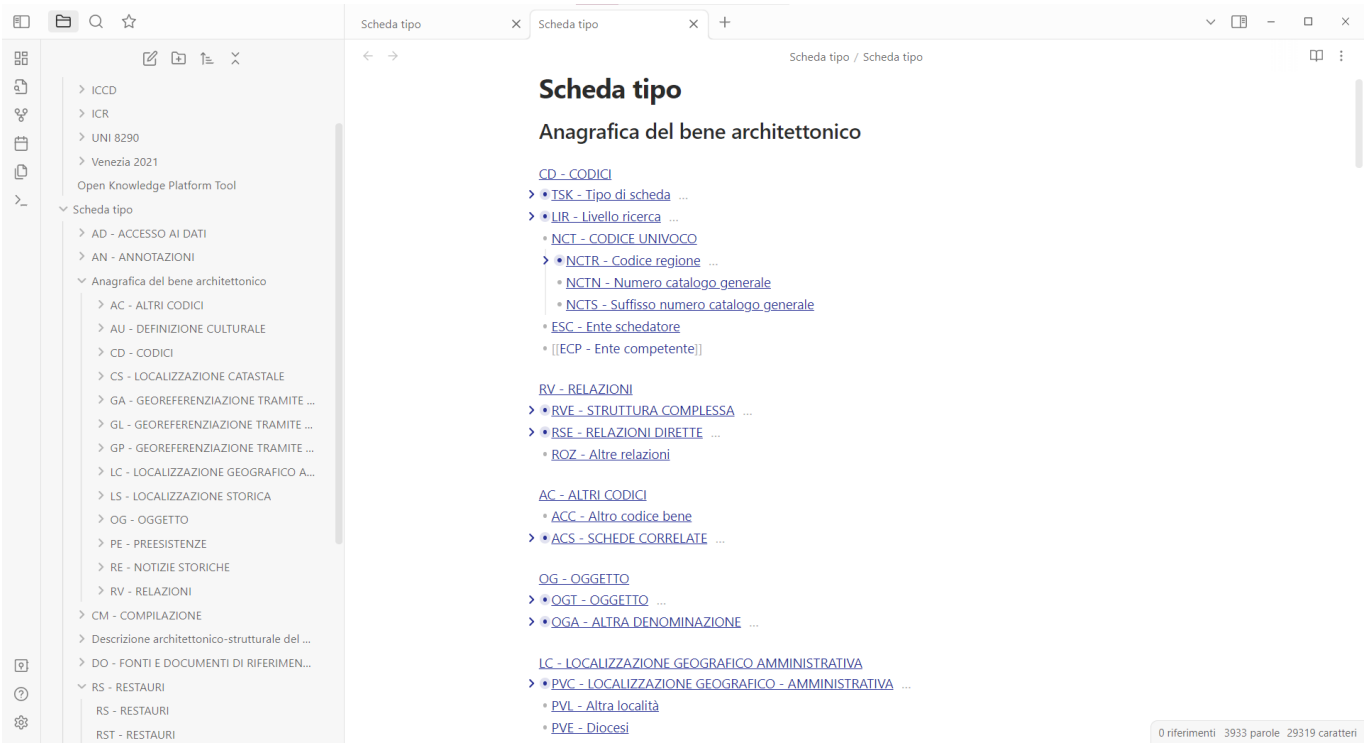
(modalità per georeferenziare l'oggetto tramite punto/linea/area, con indicazione esplicita del sistema di riferimento, della tecnica di rilievo adottata e della qualità della georeferenziazione): questa sezione rende possibile l'integrazione della scheda in GIS e l'accoppiamento fra rilievi diagnostici e mappe territoriali.

- Quadro storico-culturale ed evolutivo (toponomastica storica, cronologia e attribuzioni per la documentazione dell'evoluzione storica dell'organismo edilizio): informazioni indispensabili per interpretare cause e modifiche strutturali che influenzano i fenomeni di degrado

La seconda sezione "Descrizione architettonico/strutturale del bene architettonico" è costituita da (Fig. 222-223):

- Descrizione architettonico-strutturale: organizzata secondo la logica della norma UNI 8290 (classi di unità tecnologiche, unità tecnologiche, classi di elementi tecnici), questa parte consente di dettagliare ogni componente dell'organismo edilizio indicando tecnica costruttiva, materiali e grado di ispezionabilità ed è pensata come sistema integrativo per l'implementazione dei modelli H-BIM
- Stato di conservazione e analisi dei degradi: la scheda integra una classificazione dei fenomeni di degrado (compresa una tassonomia dettagliata per le tipologie di umidità) con campi per gravità, diffusione percentuale, urgenza e raccomandazioni d'intervento. Per ciascun danno è prevista la connessione all'evidenza diagnostica (termografia, analisi salina, prove gravimetriche, ecc.), così da collegare osservazione visiva e misure strumentali.
- Interventi pregressi: la sezione raccoglie cronologie di interventi, materiali e tecniche utilizzati, esiti (aspetti positivi/negativi). Tale quadro storico è cruciale per valutare gli effetti di azioni passate e per definire la strategia operativa

Fig. 221 | Screenshot della sezione "Anagrafica del bene architettonico" della Scheda Tipo realizzata con Obsidian v.1.1.16



futura.

La Scheda Tipo è inoltre fornita di una sezione per la documentazione multimediale e bibliografica (campi dedicati a fotografie geotaggate, disegni, video, referti di laboratorio e bibliografia rendono la scheda un vero e proprio archivio digitale; ciascun elemento è accompagnato da metadati che ne descrivono origine, formato, autore, data e localizzazione) ed una sezione inerente all'accesso ai dati, modalità di compilazione e governance con indicatori su profili d'accesso, motivazioni del rilascio dei dati, scadenze, oltre ai riferimenti del compilatore, del referente scientifico e del funzionario responsabile.

La scheda è pensata per poter essere progressivamente implementata con nuove informazioni in modo tale da riuscire a tener traccia dell'intero ciclo di vita dell'organismo edilizio.

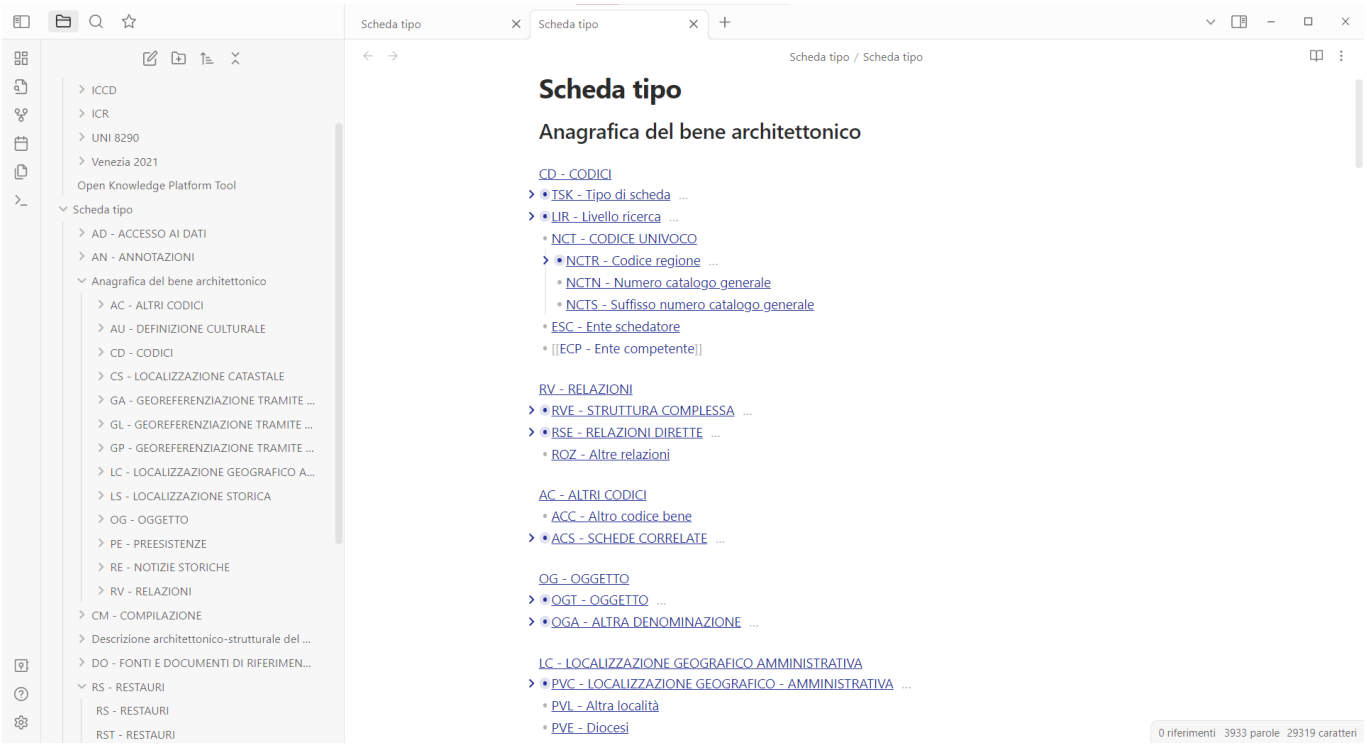
La scheda è progettata per lavorare con formati aperti: serie temporali esportabili in CSV, immagini e mappe in GeoTIFF/GeoJSON, modelli 3D/IFC per H-BIM. Per tutte le misure diagnostiche e per i file allegati sono previsti metadati obbligatori (timestamp, coordinate/EPSG, strumento/modello, taratura/calibrazione, condizioni ambientali, nome operatore).

L'adozione di vocabolari controllati (per danni, materiali, interventi ed elementi costruttivi) e di codici univoci (ICCD) rende la scheda immediatamente compatibile con standard nazionali e agevola l'implementazione dei dati.

Dal punto di vista dell'integrazione tecnica, la scheda è pensata per essere collegabile a un Common Data Environment (CDE) e interoperabile con BIM/H-BIM; dove necessario la scheda rimanda a riferimenti esterni (file, repository, record SIGECweb) invece di incorporare dati pesanti, preservando leggibilità e scalabilità.

La scheda è uno dei risultati principali della ricerca perché fornisce lo strumento operativo per raccogliere informazioni omogenee, permettere depositi istituzionali, alimentare

Fig. 222 | Screenshot della sezione "Descrizione architettonico/strutturale del bene architettonico" della Scheda Tipo realizzata con Obsidian v.1.1.16



dataset longitudinali e supportare la definizione di KPI trasferibili. È coerente con le proposte di standardizzazione e con l'uso dei CAM/ capitoli di gara: collegando la scheda a requisiti contrattuali (metadata obbligatori, durata minima di monitoraggio, KPI), è possibile rendere praticabili a livello amministrativo le buone pratiche tecniche descritte nel capitolo sulle Best Practices.

In sintesi, la scheda tipo è un modello operativo pensato per collegare conoscenza storica, rilievo spaziale, diagnostica strumentale, storia degli interventi e governance dei dati in un unico dossier digitale interoperabile. La sua struttura modulare e la scelta di formati e metadati coerenti con ICCD/ICR e con gli standard tecnici (UNI/IFC/GIS) ne fanno lo strumento ideale per trasformare i casi studio isolati in un corpus comparabile e ripetibile, capace di sostenere sia le esigenze immediate di progetto sia la costruzione di conoscenza aggregata per ricerca e policy.

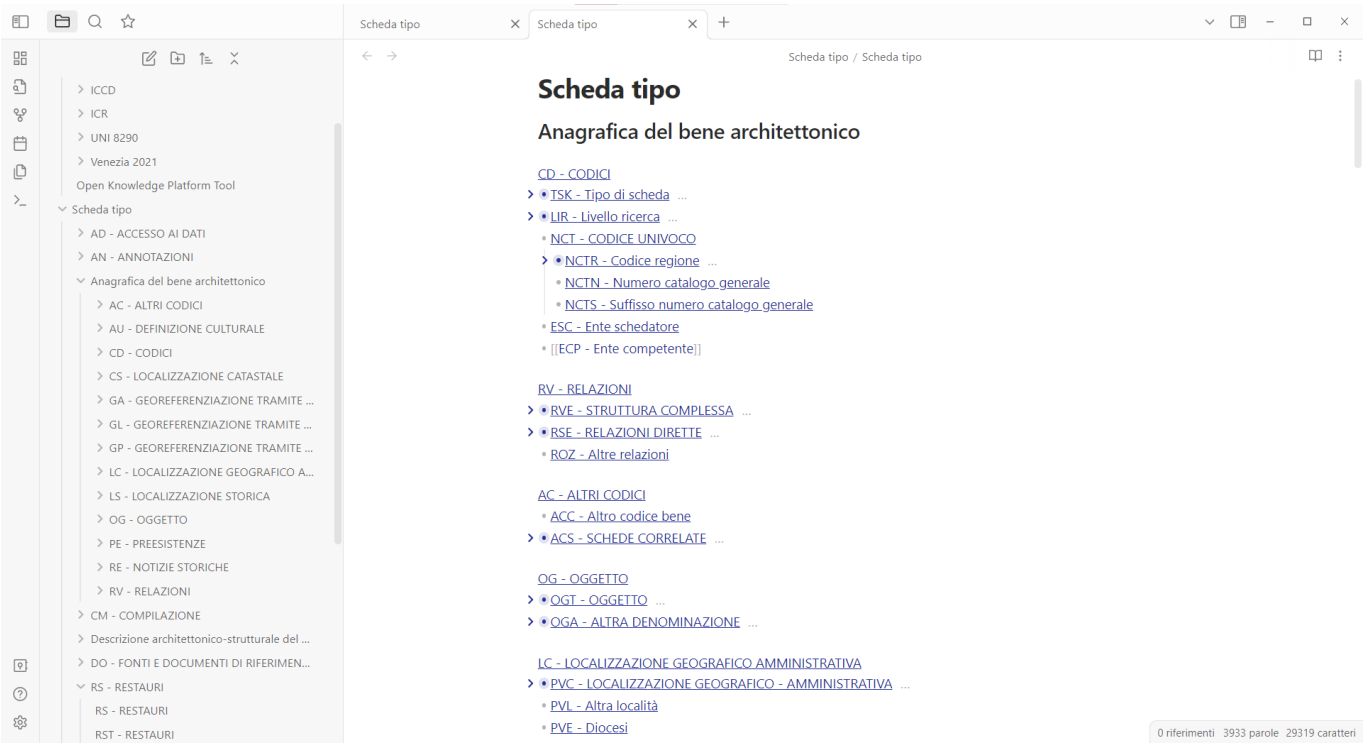
6.2.3 Prospettive di integrazione nel modello digitale

Le linee guida, la Scheda Tipo e la proposta di Open Knowledge Platform Tool esposti nei paragrafi precedenti acquisiscono valore operativo solo se concepiti come parti di un modello digitale integrato [Senna PP (2020); Jangam SK (2023)]: un ecosistema informativo stratificato capace di trasformare la ricchezza documentaria raccolta in conoscenza interrogabile, ripetibile e tracciabile nel tempo.

L'elemento innovativo della proposta non risiede nell'uso degli strumenti digitali in sé, ma nella strutturazione di una catena informativa chiusa e tracciabile che collega il rilievo e la diagnostica alla decisione progettuale e alla verifica longitudinale degli effetti dell'intervento.

La necessità di tale strutturazione deriva dalla complessità intrinseca del patrimonio documentale che accompagna gli interventi conservativi. L'introduzione di strumenti di

Fig. 223 | Screenshot delle sezioni "Stato di Conservazione" e "Restauri" della Scheda Tipo realizzata con Obsidian v.1.1.16



datificazione strutturata e di protocolli di intelligenza artificiale risponde precisamente a questa criticità [Senna PP (2020); Uddin MKS (2024); Xiang X. (2020)]: non per automatizzare il giudizio, ma per governare la complessità, rendere coerente la classificazione documentale e trasformare un insieme eterogeneo di materiali in un sistema informativo capace di orientare decisioni verificabili e monitorabili nel tempo.

Per modello digitale si intende, pertanto, un insieme coordinato di componenti interoperanti [Senna PP (2020); Jangam SK (2023); Tao F (2024)]:

- Nucleo semantico HBIM/IFC per assegnare identificativi persistenti a bene, elemento, punto di misura e intervento
- CDE (Common Data Environment) per il deposito controllato con registro metadati e versioning
- Strato GIS per la georeferenziazione
- Strato sensori/serie temporali per rilevazioni microclimatiche e monitoraggi diagnostici
- Strato analitico composto da micro-servizi (estrazione, classificazione, analisi temporale, anomaly detection) esposti via API (Application Programming Interface)
- Interfaccia utente, o "agente virtuale" su cloud, che traduce i dati in indicatori, report e risposte interrogabili

L'agente virtuale rappresenta il livello di interfaccia cognitiva del modello digitale: non un'entità autonoma che sostituisce il tecnico, ma un mediatore intelligente che trasforma dati strutturati in informazioni operative. Collocato sopra il CDE e i micro-servizi analitici, esso svolge funzioni di orchestrazione, semplificazione e controllo. In termini operativi l'agente aggrega e normalizza le richieste dell'utente, attiva i micro-servizi necessari (ad esempio OCR/NLP, classificazione immagini o analisi di serie temporali) [Aslam F. (2023); Gao M. (2024); Zhang Y. (2024)], costruisce indicatori sintetici e visualizzazioni, e registra interrogazioni, versioni dei modelli e azioni conseguenti, garantendo tracciabilità e auditabilità del processo.

Dal punto di vista architetturale l'agente si articola in tre moduli principali: un modulo di acquisizione e validazione, che verifica la coerenza dei metadati e la presenza dei campi obbligatori; un modulo di orchestrazione, che coordina i workflow analitici invocando i micro-servizi; e un modulo di dialogo e visualizzazione, che restituisce KPI, grafici, report e sintesi interpretative. L'interazione può avvenire tramite query testuali, filtri predefiniti o dashboard visuali; ogni risposta deve essere accompagnata da informazioni di provenienza, livello di affidabilità e registrazione delle eventuali verifiche umane effettuate. [Aslam F. (2023); Thien HT (2023)]

Esempi operativi chiariscono il valore metodologico dell'agente: un funzionario può interrogare il sistema richiedendo l'andamento dell'umidità in un determinato paramento negli ultimi dodici mesi e ottenere una visualizzazione con serie temporali, soglie superate, collegamenti agli elementi HBIM corrispondenti e verifica della completezza dei metadati; un conservatore può ricercare casi con pattern termografici analoghi e ottenere un elenco comparativo con indicazione del livello di somiglianza. In questo modo il controllo non avviene più tramite consultazione manuale di documenti eterogenei, ma attraverso indicatori sintetici e tracciabili, riducendo l'asimmetria informativa tra progettista ed ente di verifica, come la Soprintendenza, e favorendo possibili collaborazioni con istituti tecnici specializzati quali l'Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro.

È tuttavia necessario sottolineare che l'agente non "genera" conoscenza autonoma né sostituisce la responsabilità professionale: elabora e sintetizza dati già presenti nella base informativa e propone indicatori di supporto alla decisione. Ogni funzione deve essere accompagnata da protocolli di validazione, procedure human-in-the-loop e politiche chiare di accesso, logging e tracciabilità delle versioni. [Thien HT (2023)]

Il presupposto imprescindibile di questo modello è la datificazione [Senna PP (2020); Jangam

SK (2023)]. La Scheda Tipo deve poter essere compilata in formati strutturati (CSV/JSON/DB relazionale), con campi obbligatori, vocabolari controllati e metadati minimi.

Ogni entità deve essere identificata in modo persistente. Solo in questo modo un documento, un'immagine o un referto diagnostico diventano unità informative confrontabili nel tempo e interrogabili con HBIM, digital twin e servizi analitici di intelligenza artificiale. In particolare, nel contesto di questa ricerca il digital twin va inteso come rappresentazione informativa dinamica dell'opera, aggiornabile e arricchita progressivamente con dati osservativi e con le decisioni registrate, più che come una "scatola" predittiva autonoma: la sua utilità risiede nella capacità di rendere immediatamente leggibili gli stati, le tendenze e le relazioni tra parametri, a supporto di scelte progettuali documentabili. [Tao F (2024)]

In questo contesto l'intelligenza artificiale non è intesa come sostituto del giudizio professionale, ma come strumento funzionale e circoscritto. Le applicazioni principali riguarderebbero:

- Estrazione automatica di informazioni mediante OCR (Optical Character Recognition) e NLP (Natural Language Processing) [Patel (2024); Rongali SK (2025); Uddin MKS (2024)]
- Classificazione delle informazioni tramite reti leggere o tecniche di transfer learning
- Controllo qualità e anomaly detection mediante regole automatizzate e algoritmi di rilevazione per individuare campi mancanti, incoerenze, valori fuori soglia o scostamenti temporali.

Ogni funzione deve essere affiancata da protocolli di validazione chiari, con dataset di test indipendenti e metriche di performance dichiarate (es. accuracy, precision/recall/F1-score per la classificazione; RMSE-Root Mean Square Error o MAPE-Mean Absolute Percentage Error per modelli predittivi). È inoltre necessario prevedere procedure di human-in-the-loop per la verifica e la correzione degli output, nonché la tracciabilità delle versioni dei modelli utilizzati.

Per rendere la proposta concretamente verificabile si può ipotizzare un MVP (Minimum Viable Product) contenuto ma completo. Esso prevede la redazione di un BEP(BIM Execution Plan)/EIR(Exchange Information Requirements) minimale che definisca obiettivi, livelli informativi LOD/LOI e ruoli; l'attivazione di un CDE "light" con registro metadati; la digitalizzazione e normalizzazione della Scheda Tipo; una modellazione HBIM limitata agli elementi critici; una dadhboard per la visualizzazione dei KPI essenziali con possibilità di interrogazione tramite API.

Affinché il modello sia adottabile in ambito istituzionale è necessario definire regole chiare su proprietà, accessi, licenze e conservazione dei dati, nonché individuare figure responsabili della governance informative, quali data steward e BIM manager. [Jangam SK (2023)]

È opportuno privilegiare formati aperti per ridurre il rischio di lock-in tecnologico e allineare vocabolari e metadati a repertori riconosciuti, così da consentire verifiche e audit anche da parti di enti terzi, come la Soprintendenza, o in collaborazione con istituti tecnici specializzati quali l'Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro.

Rimangono tuttavia alcuni limiti strutturali. La qualità e la completezza della base dati condizionano direttamente l'affidabilità degli algoritmi; dataset parziali o sbilanciati possono generare falsi positivi o falsi negativi; l'automazione non elimina la responsabilità professionale né le questioni normative legate a privacy e proprietà intellettuale. Per questo motivo la raccomandazione conclusiva è concentrare gli sforzi iniziali sulla qualità della datificazione, sull'adozione di protocolli di validazione trasparenti e sulla sperimentazione attraverso progetti pilota misurabili e replicabili.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il presente lavoro di tesi ha affrontato in modo sistematico e critico il tema del risanamento del patrimonio architettonico affetto dall'umidità di risalita capillare, collocandolo all'interno di una visione più ampia della conservazione del patrimonio architettonico come processo continuo, integrato e multidisciplinare.

Muovendo da un inquadramento teorico e fisico del fenomeno, la ricerca ha progressivamente costruito un percorso metodologico che connette la conoscenza del comportamento dei materiali e dei meccanismi di trasporto dell'acqua alla sperimentazione applicata di tecnologie di intervento e alla definizione di strumenti operativi per la manutenzione preventiva e programmata.

Uno dei principali risultati della ricerca risiede nell'aver riaffermato la necessità di interpretare l'edificio come organismo edilizio complesso, nel quale i fenomeni di degrado non possono essere letti in modo isolato, ma come esito dell'interazione tra caratteristiche costruttive, materiali, condizioni ambientali e modalità d'uso nel tempo. In questo senso, l'analisi delle tipologie di umidità e dei meccanismi di risalita capillare ha evidenziato come molte delle criticità riscontrate nella pratica professionale derivino da diagnosi semplificate o parziali, che non tengono conto della compresenza di più fenomeni o delle specificità del contesto edilizio.

La disamina critica delle tecniche di intervento contro la risalita capillare ha consentito di superare una visione meramente tecnologica del problema, mettendo in luce come l'efficacia di ogni soluzione sia strettamente dipendente dalle condizioni al contorno e dalla sua integrazione all'interno di un processo conoscitivo e progettuale ben strutturato. In particolare, la ricerca ha evidenziato come le tecnologie non invasive possano rappresentare un'opzione potenzialmente compatibile con i principi della conservazione, a condizione che vengano applicate secondo protocolli rigorosi, supportati da una fase diagnostica approfondita e da un monitoraggio continuo nel tempo.

All'interno di questo quadro, l'attività sperimentale condotta sui casi studio ha costituito un passaggio centrale della ricerca. L'applicazione della tecnologia CNT®-Domodry® non è stata considerata come un fine in sé, ma come uno strumento da valutare criticamente all'interno di un processo più ampio. I risultati del monitoraggio hanno mostrato trend di riduzione dei livelli di umidità nelle murature e confermato la necessità di tempi di osservazione medio-lunghi e di indicatori quantitativi affidabili per la valutazione delle prestazioni. Al contempo, la sperimentazione ha messo in evidenza i limiti intrinseci di tali tecnologie, sottolineando come esse non possano prescindere da interventi complementari (gestione dei sali, condizioni di ventilazione, scelta delle

finiture) né sostituire una corretta progettazione complessiva dell'intervento di risanamento.

Un ulteriore contributo rilevante della tesi riguarda la definizione di best practices che strutturano in modo coerente le fasi di diagnosi, intervento e monitoraggio. Tali best practices, elaborate sulla base delle evidenze teoriche e sperimentali raccolte, mirano a ridurre l'incertezza decisionale e a favorire un approccio basato su dati misurabili e verificabili. In questo senso, la ricerca contribuisce a colmare il divario esistente tra conoscenza scientifica e pratica professionale, proponendo strumenti concretamente utilizzabili nei processi di conservazione del patrimonio architettonico.

La progettazione e lo sviluppo della piattaforma digitale come open knowledge tool rappresenta un ulteriore risultato fondamentale del lavoro. La piattaforma non è concepita come un semplice archivio di dati, ma come un'infrastruttura conoscitiva in grado di supportare la progettazione integrata e la manutenzione preventiva e programmata. Rendendo accessibili protocolli, dati diagnostici e risultati di monitoraggio a tutti gli stakeholder del processo di conservazione, essa favorisce una gestione più consapevole e sostenibile degli interventi, in linea con i principi ambientali, economici e sociali richiamati dal quadro normativo e strategico del PNRR.

Nel complesso, la ricerca dimostra come l'integrazione tra approccio scientifico, sperimentazione applicata e strumenti digitali possa costituire una risposta efficace alle sfide poste dal risanamento dell'umidità di risalita nel patrimonio architettonico. Tuttavia, è necessario riconoscere esplicitamente i limiti del lavoro svolto. In primo luogo, la variabilità dei contesti edilizi e dei materiali rende difficile una generalizzazione immediata dei risultati; in secondo luogo, i tempi di osservazione, sebbene adeguati agli obiettivi della tesi, non consentono di valutare in modo definitivo gli effetti a lungo termine di alcune soluzioni implementate.

Alla luce di tali considerazioni, si delineano diversi sviluppi futuri della ricerca. Un primo ambito riguarda l'estensione del monitoraggio su archi temporali più lunghi e su un numero maggiore di casi studio, al fine di rafforzare la base statistica dei risultati e di affinare i protocolli di valutazione delle prestazioni. Un secondo ambito concerne l'integrazione della piattaforma digitale con modelli H-BIM e digital twin, ampliandone le potenzialità predittive e il supporto alla gestione del ciclo di vita dell'edificio. Ulteriori sviluppi potrebbero riguardare la standardizzazione dei protocolli operativi e degli indicatori di performance, con l'obiettivo di contribuire a futuri percorsi di normazione tecnica nel settore del risanamento edilizio.

Infine, la natura della borsa di dottorato, istituita ai sensi del D.M. 352/2022 nell'ambito del PNRR e

orientata alla collaborazione con il sistema produttivo, apre prospettive concrete di trasferimento dei risultati della ricerca al mondo delle imprese e della pubblica amministrazione. In questo senso, la tesi non si conclude come esito chiuso, ma come base metodologica e operativa per ulteriori sviluppi scientifici, applicativi e professionali, contribuendo alla costruzione di un approccio più consapevole, sostenibile e condiviso alla conservazione del patrimonio architettonico.

APPENDICE A
Normativa nazionale italiana

La presente appendice raccoglie le principali disposizioni normative nazionali che regolano la tutela, la conservazione e gli interventi tecnici sul patrimonio architettonico esistente.

Nei casi studio analizzati, il fenomeno dell'umidità di risalita capillare non rappresenta esclusivamente una problematica fisico-materica, ma si colloca all'interno di edifici sottoposti a tutela e, in alcuni casi, interessati da valutazioni strutturali o interventi di consolidamento. Di conseguenza, ogni scelta progettuale, dalla diagnosi alle soluzioni operative, si inserisce in un quadro regolamentare articolato, che comprende sia la disciplina dei beni culturali sia la normativa tecnica per le costruzioni esistenti.

L'unificazione in un'unica appendice delle norme di tutela e di quelle tecniche risponde alla volontà di restituire la natura integrata dell'intervento sul costruito storico, in cui dimensione giuridica, conservativa e strutturale risultano strettamente interconnesse. La normativa sulla tutela definisce il regime autorizzativo, le competenze amministrative e i principi di conservazione; la normativa tecnica stabilisce invece i criteri di sicurezza, verifica e intervento sugli organismi edilizi esistenti.

L'obiettivo dell'appendice non è riprodurre integralmente i testi normativi, ma evidenziare i riferimenti che costituiscono il quadro regolativo entro cui si collocano le pratiche analizzate nei casi studio, chiarendo lo stato di vigenza delle norme e il loro ruolo nell'orientare, o vincolare, le scelte operative.

L. 1089/39 - Tutela delle cose d'interesse Artistico o Storico

Stato della norma:

Non più vigente.

La legge è stata abrogata dal D.Lgs. 29 ottobre 1999, n. 490 (Testo Unico delle disposizioni legislative in materia di beni culturali e ambientali), a sua volta sostituito dal D.Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42 – Codice dei beni culturali e del paesaggio.

Rimane tuttavia un riferimento storico fondamentale per comprendere l'evoluzione del sistema italiano di tutela.

Struttura:

La legge era composta da 73 articoli, suddivisi in otto capi:

- Capo I - Disposizioni generali (artt. 1-10)
- Capo II - Disposizioni per la conservazione, integrità e sicurezza delle cose (artt. 11-22)
- Capo III - Disposizioni sulle alienazioni e gli altri modi di trasmissione delle cose (artt. 23-34)
- Capo IV - Disposizioni sulla esportazione ed importazione (artt. 35-42)
- Capo V - Disciplina dei ritrovamenti e delle scoperte (artt. 43-50)

- Capo VI - Disciplina delle riproduzioni e del godimento pubblico (artt. 51-53)
- Capo VII - Disciplina delle espropriazioni (artt. 54-57)
- Capo VIII - Sanzioni e disposizioni transitorie (artt. 58-73)

Breve descrizione:

La Legge 1 giugno 1939, n. 1089 rappresenta il primo organico intervento legislativo nazionale volto alla tutela delle cose di interesse artistico o storico.

All'art. 1 stabiliva che sono soggette alla legge le cose, immobili e mobili, che presentano interesse artistico, storico, archeologico o etnografico, includendo espressamente ville, parchi e giardini di interesse storico-artistico.

La norma introduceva un sistema di tutela fondato sulla dichiarazione di interesse e sulla conseguente imposizione di vincoli, prevedendo l'obbligo di autorizzazione preventiva per interventi che potessero alterare l'integrità del bene. Stabiliva inoltre limitazioni alla circolazione e all'esportazione, nonché poteri di vigilanza e intervento sostitutivo da parte dell'autorità pubblica.

Dal punto di vista critico, la legge del 1939 si colloca in una fase storica in cui la tutela è concepita prevalentemente come protezione del bene in sé, con un'impostazione centrata sul controllo statale e sulla conservazione materiale. Pur superata dalla normativa successiva, essa ha posto le basi dell'attuale sistema vincolistico italiano, influenzando profondamente la costruzione del regime autorizzativo oggi disciplinato dal Codice dei beni culturali.

Nel contesto della presente ricerca, il riferimento alla L. 1089/1939 assume rilievo storico-interpretativo, in quanto consente di comprendere la genesi del sistema di tutela entro cui si collocano gli edifici analizzati, soprattutto nei casi in cui i vincoli siano stati apposti in epoca antecedente alle riforme degli anni Novanta.

Fonte/link:

Legge 1 giugno 1939, n. 1089, pubblicata in Gazzetta Ufficiale n. 184 dell'8 agosto 1939.

Testo storico disponibile presso il Ministero della Cultura – Direzione Generale Biblioteche e diritto d'autore: https://biblioteche.cultura.gov.it/it/documenti/Normativa/Legge_1_giugno_1939_n_1089.pdf

D.Lgs. 42/2004 - Codice dei beni culturali e del paesaggio

Stato della norma:

In vigore

Il decreto legislativo è stato emanato in attuazione dell'art. 10 della L. 6 luglio 2002, n. 137. È

tuttora vigente, sebbene oggetto di numerose modifiche e integrazioni nel tempo. Rappresenta il testo normativo fondamentale in materia di tutela e valorizzazione del patrimonio culturale e paesaggistico italiano.

Struttura:

Il Codice dei beni culturali e del paesaggio è un testo unico composto da 184 articoli, suddivisi in cinque parti principali, oltre ad allegati e disposizioni transitorie:

- Parte Prima - Disposizioni generali (artt. 1-9)
- Parte Seconda - Beni culturali (artt. 10-130)
- Parte Terza - Beni paesaggistici (artt. 131-159)
- Parte Quarta - Sanzioni (artt. 160-181)
- Parte Quinta - Disposizioni transitorie e finali (artt. 182-184)

La Parte Seconda è a sua volta suddivisa in Titoli relativi a tutela, circolazione, autorizzazioni, interventi conservativi e vigilanza.

Breve descrizione:

Il Codice definisce cosa si intende per patrimonio culturale (art. 2), distinguendo tra beni culturali e beni paesaggistici, e stabilisce i criteri di individuazione dei beni sottoposti a tutela (artt. 10–13). Disciplina inoltre il regime autorizzativo per gli interventi sui beni vincolati (artt. 21–22), imponendo che ogni intervento che possa incidere sull'integrità materiale o sul valore culturale del bene sia preventivamente autorizzato dall'amministrazione competente.

Per quanto concerne gli interventi di conservazione, il Codice stabilisce che la tutela si attua anche mediante attività di manutenzione, prevenzione e restauro (art. 29), definendo quest'ultimo come l'intervento diretto sul bene volto a mantenerne l'integrità materiale e ad assicurarne la conservazione.

Nel contesto dei casi studio analizzati, il Codice rappresenta il quadro giuridico entro cui si collocano le operazioni di risanamento dall'umidità di risalita capillare negli edifici vincolati. Le scelte diagnostiche e operative non possono essere valutate esclusivamente sotto il profilo tecnico, ma devono essere considerate alla luce delle prescrizioni autorizzative, dei principi di conservazione e delle competenze amministrative previste dalla norma.

Dal punto di vista critico, il Codice introduce una distinzione netta tra tutela (funzione pubblica primaria) e valorizzazione, e attribuisce centralità al principio di conservazione dell'integrità materiale del bene, elemento particolarmente rilevante nei casi in cui gli interventi di deumidificazione comportino modificazioni delle murature storiche.

Fonte/link:

Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, pubblicato in Gazzetta Ufficiale n. 45 del 24 febbraio 2004 – Suppl. Ordinario n. 28.

Testo vigente consultabile sulla banca dati ufficiale: https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2004-02-24&atto.codiceRedazionale=004G0066

D.M. 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" (NTC 2018)

Stato della norma:

In vigore: ha sostituito il precedente D.M. 14 gennaio 2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni".

È attualmente la norma tecnica nazionale di riferimento per la progettazione, esecuzione e collaudo delle costruzioni, inclusi gli interventi su edifici esistenti.

La norma è inoltre integrata dalla Circolare esplicativa 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. "Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018", che fornisce istruzioni applicative.

Struttura:

Le NTC 2018 sono articolate in 12 Capitoli, accompagnati da Appendici:

- Oggetto
- Sicurezza e prestazioni attese
- Azioni sulle costruzioni
- Costruzioni civili e industriali
- Ponti
- Progettazione geotecnica
- Progettazione per azioni sismiche
- Costruzioni esistenti
- Collaudo statico
- Redazione dei progetti strutturali esecutivi e delle relazioni di calcolo
- Materiali e prodotti per uso strutturale
- Riferimenti tecnici

Breve descrizione:

Il D.M. 17 gennaio 2018 definisce i principi per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni in Italia, stabilendo i criteri di sicurezza, affidabilità e durabilità delle opere strutturali.

Per quanto concerne il patrimonio architettonico esistente, il riferimento centrale è il Capitolo 8 – Costruzioni esistenti, che disciplina le modalità di valutazione della sicurezza, i livelli di conoscenza (LC1, LC2, LC3), i fattori di confidenza e le tipologie di intervento (riparazione o interventi locali, miglioramento sismico, adeguamento sismico).

Nei casi studio analizzati, le problematiche di degrado legate all'umidità di risalita si intrecciano talvolta con condizioni di vulnerabilità strutturale o con interventi di consolidamento. In tali contesti, le NTC 2018 costituiscono il quadro tecnico cogente entro cui devono essere impostate eventuali verifiche strutturali e valutazioni di sicurezza.

Dal punto di vista critico, la norma introduce un approccio prestazionale e conoscitivo che assume particolare rilevanza per l'edilizia storica: la definizione del livello di conoscenza e la correlazione tra indagini e riduzione delle incertezze strutturali rappresentano un passaggio metodologico coerente con l'impostazione diagnostica integrata adottata nella presente ricerca.

Fonte/link:

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto 17 gennaio 2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni, pubblicato in Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20 febbraio 2018 – Suppl. Ordinario n. 8.

Testo vigente disponibile sul sito del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e sulla banca dati Normativa.

APPENDICE B
Normativa tecnica e diagnostica

La metodologia adottata nei casi studio si fonda su un approccio diagnostico integrato, che combina rilievo visivo, indagini non distruttive, analisi di laboratorio e monitoraggio microclimatico. Tale impostazione non è stata sviluppata in modo empirico, ma si inserisce in un sistema di standard tecnici nazionali e internazionali che disciplinano modalità di prova, condizioni operative e criteri di interpretazione dei risultati.

La presente appendice raccoglie le principali norme UNI, EN, ISO e ASTM richiamate nei casi studio o pertinenti alle metodologie impiegate (determinazione dell'umidità ponderale, test di assorbimento, misurazioni cromatiche, prove adesive, termografia a infrarossi, protocolli di indagine non distruttiva).

L'inclusione di tali riferimenti consente di esplicitare il fondamento tecnico-scientifico delle indagini svolte e di chiarire che la raccolta e l'analisi dei dati sono state condotte secondo procedure standardizzate, ripetibili e comparabili. In questo modo, l'appendice rafforza la coerenza metodologica dichiarata nel capitolo dei casi studio e contribuisce a colmare la lacuna, evidenziata in letteratura, relativa alla carenza di protocolli condivisi per la valutazione dell'efficacia degli interventi di risanamento.

UNI EN 11085:2003 - Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione del contenuto d'acqua: Metodo ponderale

Stato della norma:

In vigore.

Recepimento italiano della norma europea EN 1925:1999 "Natural stone test methods - Determination of water absorption coefficient by capillarity" modificata e rinumerata in ambito UNI.

Struttura:

La norma è strutturata secondo il formato tipico dei metodi di prova europei (campo di applicazione, principio del metodo, apparecchiatura, procedura, calcolo dei risultati e rapporto di prova), in conformità alle regole redazionali CEN.

Breve descrizione:

La UNI EN 11085:2003 definisce un metodo di prova per la determinazione dell'assorbimento d'acqua per capillarità nei materiali lapidei naturali. Il principio del metodo consiste nel porre una superficie del provino a contatto con acqua in condizioni controllate e nel misurare nel tempo

l'incremento di massa dovuto all'assorbimento capillare.

Il parametro ottenuto consente di caratterizzare il comportamento igroscopico e la capacità di imbibizione del materiale, fornendo indicazioni utili per la valutazione della vulnerabilità ai fenomeni di umidità, cristallizzazione salina e degrado.

Nel contesto dei casi studio analizzati, tale norma assume rilievo metodologico in quanto consente di inquadrare le misure di assorbimento non come prove empiriche, ma come determinazioni condotte secondo un protocollo standardizzato. Ciò è particolarmente significativo nello studio dell'umidità di risalita capillare, dove la comparabilità dei dati e la ripetibilità delle misure rappresentano condizioni essenziali per una valutazione critica dell'efficacia degli interventi di risanamento.

Dal punto di vista interpretativo, la norma fornisce un parametro prestazionale del materiale in condizioni controllate di laboratorio; è pertanto necessario considerare con cautela la trasposizione diretta dei risultati al comportamento in opera, che può essere influenzato da condizioni ambientali, stato di degrado e presenza di sali solubili.

Fonte/link:

UNI – Ente Italiano di Normazione, catalogo ufficiale norme tecniche.

UNI EN 15886:2010 - Conservazione dei Beni Culturali - Metodi di prova - Misura del colore delle superfici

Stato della norma:

In vigore.

Recepimento italiano della norma europea EN 15886:2010 "Conservation of cultural property - Test methods - Colour measurement of surfaces" modificata e rinumerata in ambito UNI.

Struttura:

La norma è strutturata secondo il formato tipico dei metodi di prova europei (campo di applicazione, principio del metodo, apparecchiatura, procedura, calcolo dei risultati e rapporto di prova), in conformità alle regole redazionali CEN.

Breve descrizione:

La UNI EN 15886:2010 definisce un metodo normato per la misura del colore delle superfici di materiali inorganici porosi impiegati nel campo dei beni culturali. Il metodo è stato pensato per valutare coordinate colorimetriche e variazioni cromatiche nel tempo (es. alterazioni dopo trattamenti o invecchiamento), e non si occupa dell'aspetto delle superfici lucide (limite esplicitato

dalla norma).

La norma utilizza coordinate e spazi colorimetrici standard facendo riferimento allo spazio CIE Lab* per l'espressione delle coordinate e per il calcolo delle differenze cromatiche. Questo rende i risultati numerici interoperabili e confrontabili tra strumenti e laboratori, a condizione di rispettare condizioni di misura omogenee.

Il metodo richiede, infatti, la specificazione dell'apparecchiatura (es. tipo di spettrofotometro/colorimetro, geometria di misura) e delle condizioni di prova, variabili che possono influenzare sensibilmente la ripetibilità e la comparabilità dei risultati.

Fonte/link:

UNI – Ente Italiano di Normazione, catalogo ufficiale norme tecniche.

UNI EN 11432:2011 - Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Misura della capacità di assorbimento di acqua mediante spugna di contatto

Stato della norma:

Ritirata senza sostituzione l'8 agosto 2024.

Per la metodica del "contact sponge" è stata pubblicata successivamente la norma UNI EN 17655:2022 "Conservazione del Patrimonio Culturale - Determinazione dell'assorbimento di acqua mediante il metodo della spugna di contatto".

Struttura:

La norma è strutturata secondo il formato tipico dei metodi di prova europei (campo di applicazione, principio del metodo, apparecchiatura, procedura, calcolo dei risultati e rapporto di prova), in conformità alle regole redazionali CEN.

Breve descrizione:

La norma UNI EN 11432:2011 definisce un metodo sperimentale per la determinazione della capacità di assorbimento d'acqua delle superfici lapidee mediante spugna di contatto, una tecnica sviluppata per consentire misure rapide e relativamente non invasive su materiali utilizzati nel patrimonio architettonico.

Il principio della prova consiste nel porre una spugna preventivamente saturata d'acqua a contatto con la superficie del materiale da analizzare per un tempo definito. La quantità d'acqua trasferita alla superficie viene determinata attraverso la variazione di massa della spugna prima e dopo il

contatto. Il risultato consente di stimare la velocità e la capacità di assorbimento superficiale del materiale.

Questo metodo è stato sviluppato per rispondere alle esigenze specifiche della diagnostica nel settore della conservazione dei beni culturali, dove spesso non è possibile prelevare campioni o effettuare prove distruttive. Rispetto ai metodi di laboratorio tradizionali, la prova con spugna di contatto permette infatti di eseguire misurazioni direttamente in situ, limitando l'impatto sul bene analizzato.

Nel contesto degli studi sul degrado legato all'umidità, la misura della capacità di assorbimento d'acqua rappresenta un parametro significativo per valutare il comportamento igroscopico dei materiali, la loro porosità superficiale e l'efficacia di eventuali trattamenti protettivi o consolidanti..

Fonte/link:

UNI – Ente Italiano di Normazione, catalogo ufficiale norme tecniche.

ASTM D3359-23 - Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test

Stato della norma:

In vigore.

Struttura:

La norma è organizzata secondo il tipico formato dei metodi di prova e comprende le sezioni tipiche di un test standard (scopo, riferimenti normativi, termini e definizioni, principio, procedura, modalità di valutazione, precisione e rapporto di prova). Al suo interno distingue due metodi operativi principali:

- Test Method A (X-cut/X-peel): procedura in cui si pratica un taglio a X attraverso il film fino al substrato, si applica il nastro adesivo e si rimuove per valutare il distacco;
- Test Method B (cross-cut/cross-hatch): procedura in cui si esegue un reticolo di incisioni, si applica il nastro adesivo e lo si rimuove per valutare il distacco

Breve descrizione:

La norma ASTM D3359 definisce procedure standardizzate per la valutazione qualitativa dell'adesione di rivestimenti applicati su substrati rigidi attraverso il cosiddetto tape test. Il metodo si basa sull'applicazione e successiva rimozione controllata di un nastro adesivo su un'area precedentemente incisa o delimitata del rivestimento, al fine di verificare l'eventuale distacco del film. La norma prevede due procedure principali: il Method A (X-cut tape test), utilizzato per

rivestimenti più spessi o applicati su superfici non perfettamente piane, e il Method B (cross-cut tape test), che prevede una griglia di incisioni e consente una valutazione più sistematica del grado di adesione. I risultati sono espressi tramite una scala di classificazione che indica il livello di distacco del rivestimento dal supporto. Pur essendo originariamente sviluppata per rivestimenti industriali e protettivi, la procedura trova applicazione anche nel campo della conservazione dei materiali e dei beni culturali per la valutazione preliminare dell'adesione di film protettivi, consolidanti o trattamenti superficiali.

Fonte/link:

Catalogo ufficiale ASTM International – ASTM D3359-23 Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test.

APPENDICE C
Normativa nazionale spagnola

L'inserimento di casi studio spagnoli introduce un necessario confronto tra differenti sistemi normativi e amministrativi. Le procedure autorizzative, i criteri di tutela e i requisiti tecnici applicabili agli edifici storici presentano infatti specificità legate al contesto giuridico nazionale e regionale.

La presente appendice raccoglie i principali riferimenti normativi spagnoli pertinenti ai casi analizzati, al fine di chiarire il quadro regolamentare entro cui si sono sviluppate le scelte diagnostiche e operative osservate. L'obiettivo non è proporre una comparazione esaustiva tra ordinamenti, ma evidenziare le condizioni normative che possono influenzare l'impostazione degli interventi e la loro trasferibilità in altri contesti.

Il confronto internazionale consente di arricchire la riflessione critica sulle strategie di risanamento, mettendo in luce come le soluzioni tecniche non siano mai completamente neutre, ma si sviluppino all'interno di specifici assetti regolamentari e culturali.

Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español

Stato della norma:

In vigore.

Struttura:

Il testo si compone di 79 articoli suddivisi in nove titoli, oltre a 11 disposizioni aggiuntive, 8 disposizioni transitorie, una disposizione finale ed una abrogativa:

- Titolo preliminare - Disposizioni generali (artt. 1-8)
- Titolo I - Dichiarazione di Bene di Interesse Culturale (artt. 9-13)
- Titolo II - Beni immobili (artt. 14-25)
- Titolo III - Beni mobili (artt. 26-34)
- Titolo IV - Protezione dei beni mobili e immobili (artt. 35-39)
- Titolo V - Patrimonio archeologico (artt. 40-45)
- Titolo VI - Patrimonio etnografico (artt. 46-47)
- Titolo VII - Patrimonio documentale e bibliografico di archivi, biblioteche e musei (artt. 48-66)
- Titolo VIII - Misure promozionali (artt. 67-74)
- Titolo IX - Illeciti amministrativi e relative sanzioni (artt. 75-79)

Breve descrizione:

La Ley 16/1985 istituisce il quadro giuridico fondamentale per la tutela del Patrimonio Histórico Español, definendo i concetti chiave, le modalità di dichiarazione dei beni di interesse culturale e le misure di protezione, conservazione, inventariazione e controllo. La legge stabilisce procedure amministrative per la dichiarazione dei BIC, attribuisce poteri di vincolo e prescrizione alle autorità competenti e disciplina la protezione dei beni mobili e immobili, la disciplina delle scoperte e ritrovamenti, nonché le normative relative alla circolazione e all'esportazione dei beni culturali.

Dal punto di vista operativo, la normativa impone che le attività di diagnosi, conservazione e restauro su beni dichiarati siano eseguite nel rispetto delle procedure autorizzative e delle prescrizioni tecniche e amministrative: ciò include l'obbligo di ottenere autorizzazioni preventive quando gli interventi possano incidere sull'integrità o sul valore culturale dei beni. Tale regime autorizzativo influisce direttamente sulla pianificazione delle campagne diagnostiche e sugli interventi di cantiere, richiedendo una comunicazione e coordinamento con le autorità competenti e, in molti casi, l'adozione di misure conservative restrittive.

Criticamente, la Ley 16/1985 articola un bilanciamento tra tutela centralizzata (ruolo dello Stato) e compiti devoluti alle Comunità Autonome, generando un quadro in cui la gestione operativa della tutela può variare territorialmente: questa variabilità amministrativa è un elemento da considerare quando si confrontano pratiche diagnostiche e operative tra contesti diversi (es. confronto con casi italiani). Per i casi studio che coinvolgono edifici o opere protette in Spagna, la legge fornisce quindi il riferimento normativo imprescindibile per comprendere limiti, responsabilità e procedure autorizzative entro cui si sono svolti i rilievi, i trattamenti e gli interventi osservati.

Fonte/link:

Versione ufficiale del testo pubblicata nel *Boletín Oficial del Estado*: https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1985-12534#top

Código Técnico de la Edificación (CTE)

Stato della norma:

In vigore.

Il CTE fu originariamente approvato con il Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo e da allora è stato oggetto di aggiornamenti e integrazioni tecniche pubblicate tramite gli specifici Documentos Básicos e relativi Documenti di apoyo.

Struttura:

Il quadro normativo del CTE è organizzato attorno al Real Decreto di approvazione (RD 314/2006) e ai Documentos Básicos (DB), ciascuno dedicato a dei requisiti minimi che gli edifici devono soddisfare:

- DB-SE Seguridad estructural
- DB-SI Seguridad en caso de incendio
- DB-SUA Seguridad de utilización y accesibilidad
- DB-HE Ahorro de energia
- DB-HR Protección frente al ruido
- DB-HS Salubridad

A corredo dei DB sono pubblicati dei Documenti di Apoyo, guide e versioni commentate che ne facilitano l'applicazione pratica.

Breve descrizione:

Il *Código Técnico de la Edificación* costituisce il principale riferimento normativo per la regolamentazione tecnica dell'edilizia in Spagna. Esso definisce i requisiti minimi di qualità che gli edifici devono soddisfare in relazione alle esigenze fondamentali di sicurezza e abitabilità stabiliti dalla *Ley 38/1999 de Ordenación de la Edificación (LOE)*. In questo senso il CTE traduce in specifiche tecniche operative gli obiettivi generali stabiliti dalla legislazione edilizia spagnola, fornendo criteri e metodi per dimostrare la conformità dei progetti ai requisiti normativi.

La norma si applica agli edifici pubblici e privati i cui progetti richiedono un permesso o autorizzazione amministrativo e interviene nelle diverse fasi del processo edilizio, dalla progettazione alla costruzione e alla manutenzione dell'edificio. Il sistema normativo è basato su un approccio prestazionale: la norma stabilisce gli obiettivi di sicurezza e qualità che devono essere raggiunti, mentre i *Documentos Básicos* indicano le modalità tecniche generalmente accettate per dimostrare il rispetto di tali requisiti.

Nel contesto degli interventi sul patrimonio architettonico esistente, il CTE rappresenta quindi il riferimento tecnico entro cui devono essere valutate le prestazioni dell'edificio in termini di sicurezza strutturale, salubrità, efficienza energetica e comfort ambientale. Tuttavia, nel caso degli edifici storici o sottoposti a tutela, l'applicazione delle prescrizioni del CTE richiede spesso una valutazione critica e un adattamento delle soluzioni tecniche, al fine di conciliare il rispetto dei requisiti prestazionali con la conservazione delle caratteristiche storiche e materiche dell'edificio.

Fonte/link:

Sito ufficiale del Código Técnico de la Edificación (CTE) — repository dei Documentos Básicos, Documentos de Apoyo e guide: https://www.codigotecnico.org/

Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, che approva il CTE; testo e versioni consolidate pubblicate nel Boletín Oficial del Estado (BOE): https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/03/17/314/con

Plan de Acción Territorial de Ordenación y Dinamización de la Huerta de València (PAT Huerta de València)

Stato della norma:

In vigore.

Il piano è stato approvato con il *Decret 219/2018, de 30 de novembre, del Consell*, pubblicato nel *Diari Oficial de la Generalitat Valenciana*.

Il piano costituisce uno strumento di pianificazione territoriale di ambito sovracomunale finalizzato alla tutela, gestione e dinamizzazione della Huerta de València. Negli anni successivi il quadro normativo è stato oggetto di aggiornamenti e modifiche, in particolare nell'ambito della legislazione regionale sulla Huerta de València.

Struttura:

Il PAT è concepito come un *Plan de Acción Territorial* di natura settoriale e sovracomunale articolato 82 articoli ed otto titoli, oltre a disposizioni aggiuntive e finali:

- Titolo I - Disposizioni preliminari (artt. 1-10)
- Titolo II - Il paesaggio dell'Horta di Valencia. Unità territoriali e paesaggistiche e catalogo delle tutele (artt. 11-13)
- Titolo III - L'infrastruttura verde de l'Horta di Valencia (artt. 14-35)
- Titolo IV - Regime dei suoli non urbanizzabili. Regolamentazione degli usi e delle attività (artt. 36-51)
- Titolo V - Il sistema insediativo urbano dell'Horta di Valencia (artt. 52-57)
- Titolo VI - Linee guida per l'integrazione paesaggistica delle infrastrutture nell'Horta (artt. 58-68)
- Titolo VII - Uso pubblico dell'Horta di Valencia (artt. 69-80)
- Titolo VIII - Effetti e servitù della legislazione costiera e aeronautica (artt. 81-82)

Breve descrizione:

Il Plan de Acción Territorial de Ordenación y Dinamización de la Huerta de València (PAT) rappresenta lo strumento di pianificazione territoriale attraverso cui la Generalitat Valenciana disciplina la tutela e la gestione della Huerta de València, uno dei paesaggi agrari storici più rilevanti dell'area mediterranea. Il piano si inserisce nel quadro delle politiche regionali di protezione del suolo agricolo e di salvaguardia del paesaggio culturale, stabilendo criteri di pianificazione sovracomunale che orientano e coordinano la pianificazione urbanistica dei comuni interessati.

La normativa del piano definisce l'ambito territoriale della Huerta, individua unità territoriali e di

paesaggio e stabilisce un sistema di protezione articolato in diverse categorie di tutela, tra cui le aree di Huerta de Protección Especial con differenti livelli di salvaguardia. Il PAT disciplina inoltre l'infrastruttura verde territoriale, la regolazione degli usi agricoli e delle attività compatibili, nonché i criteri di integrazione paesaggistica per infrastrutture e interventi sul territorio, con l'obiettivo di garantire la conservazione dei valori ambientali, agronomici e culturali del paesaggio agrario tradizionale.

Accanto alla componente normativa, il piano introduce un sistema di obiettivi strategici, strategie operative e azioni dinamizzatrici finalizzato a garantire l'effettiva attuazione delle politiche di tutela e valorizzazione. Gli obiettivi del piano vengono infatti perseguiti attraverso due tipologie principali di strumenti: da un lato la normativa territoriale, che stabilisce condizioni e limiti per l'uso del suolo e per le trasformazioni edilizie; dall'altro un programma di interventi e progetti finalizzati alla dinamizzazione agricola, alla valorizzazione del paesaggio e al rafforzamento delle attività economiche legate alla Huerta. Le azioni previste sono organizzate in un programma di attuazione strutturato secondo le strategie del piano e descritte mediante schede operative che individuano finalità, priorità, soggetti responsabili, tempi di realizzazione e possibili fonti di finanziamento.

Nel contesto degli interventi di conservazione e trasformazione del patrimonio architettonico situato nell'ambito della Huerta, il PAT assume un ruolo rilevante poiché introduce vincoli e indirizzi territoriali che incidono sulla localizzazione degli interventi, sulla compatibilità degli usi e sulle modalità di integrazione paesaggistica delle opere. Il piano mira infatti non solo alla protezione del paesaggio agrario storico, ma anche alla sua dinamizzazione economica e produttiva, promuovendo il mantenimento dell'attività agricola e la valorizzazione dei valori ambientali, culturali e identitari del territorio.

Fonte/link:

Pagina informativa ufficiale della Generalitat Valenciana – Planificación Territorial e Infraestructura Verde - PAT Horta de València: https://mediambient.gva.es/es/web/planificacion-territorial-e-infraestructura-verde/pat-horta-de-valencia

BIBLIOGRAFIA

1. AA.VV. (2013). *Metodo scientifico ed innovazione tecnologica per la salvaguardia e recupero del patrimonio storico: Casi applicativi ed esempi di successo nella diagnosi, prevenzione e risoluzione delle patologie da umidità capillare in siti UNESCO a Ragusa e in altri prestigiosi siti in Italia*. Atti del convegno, Ragusa, 5–6 ottobre 2012.
2. AA.VV.. (2020). *Tecnologie per il recupero del costruito – Umidità nelle costruzioni: diagnosi e intervento – Atti del Convegno: Dal Taglio Meccanico alla CNT-APPs.* Luciano Editore. ISBN 978-88-944-2510-5
3. AA.VV. (2021). *Indicatori condivisi per la costruzione del modello e del piano di monitoraggio e intervento: Esiti di una ricerca interdisciplinare*. In G. Driussi (a cura di), La qualità dell'intervento sui beni culturali: Attualità, problemi e prospettive. Giornata di studi "Scienza e Beni Culturali" (pp. 35–37). Venezia
4. Accardo G., Cacace C., Rinaldi R., (2005) *Il Sistema Informativo Territoriale della carta del Rischio.* In AEKOS – Scienza e Restauro dell'Architettura Nardini Editore Anno VI – Nuova Serie
5. Acordon, A. (2013). *Applicazioni della tecnologia elettrofisica a neutralizzazione di carica in edifici religiosi del levante ligure afflitti da differenti problematiche conservative*. In Atti del convegno: Metodo scientifico ed innovazione tecnologica per la salvaguardia e recupero del patrimonio storico. Casi applicativi ed esempi di successo nella diagnosi, prevenzione e risoluzione delle patologie da umidità capillare in siti Unesco a Ragusa e in altri prestigiosi siti in Italia (pp. 199–236). Ragusa, 5–6 Ottobre 2012
6. Agyekum, K., Ayarkwa, J., & Koranteng, C. (2016). C*ontrolling rising damp in new buildings: Field trials of proposed treatment methods*. In International Conference on Infrastructure Development in Africa (pp. 447–466). South Africa
7. Agyekum, K., Blay, K., & Opoku, A. (2019). *Mechanisms for preventing rising damp in new building infrastructure*. International Journal of Building Pathology and Adaptation, 37(1), 87–107. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ijbpa-06-2018-0048/full/html
8. Ahmad, A. G., & Abdul Rahman, H. F. (2010). *Treatment of salt attack and rising damp in heritage buildings in Penang, Malaysia*. Journal of Construction in Developing Countries, 15(1), 93–113
9. Aiello Giuseppe, Islam Abusoyon, Giulia Marcon, Salvatore Quaranta, Donatella Bongiorno (2022) *Design of a Smart Control System for electrophysical dehumidification devices: preliminary results*. In Proc. of the International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives
10. Alessandrini, G. (2011). *La conservazione dei beni culturali e la normativa tecnica: Passato, presente e futuro. Dossier beni culturali: Università e competenze*. Promos Ricerche. https://www.promosricerche.org/wp-content/uploads/2011/11/dossier_beni_culturali_uc_7.pdf
11. Altamura, L. (2013). *La governance dei beni culturali in Italia: Approccio multilivello e casi di studio* (Tesi di laurea magistrale, LUISS Guido Carli). LUISS Guido Carli. https://tesi.luiss.it/23831/1/130113_ALTAMURA_LUDOVICA.pdf
12. Altavilla A. (1986) *S. Francesco d'Assisi: il complesso conventuale. In AA.VV. Matera. Piazza San Francesco D'Assisi: Origine ed Evoluzione di uno Spazio Urbano*. BMG srl, Matera
13. Andriani, G. F., & Walsh, N. (2002). *Physical properties and textural parameters of calcarenitic*

rocks: Qualitative and quantitative evaluations. Engineering Geology, 67(1–2), 5–15

14. ANIT. (2021). *Risanamento termico di murature umide e degradate: Manuale ANIT di approfondimento tecnico*. Tep Srl.
15. Aquino A (2021) *Decay of natural and artificial stones used in historical buildings: influence of mineralogy and microstructure and new restoration methods* (Tesi di Dottorato), Dipartimento di Scienze della Terra Università di Pisa
16. Arazo, Á., & Jarque, F. (1978). *Arquitectura popular valenciana. Diputación Provincial de Valencia*. ISBN 84-7795-979-X.
17. Areddu, A. (2018). *Itinerari culturali: Profili giuridici*. Università degli Studi di Sassari. https://iris.uniss.it/retrieve/e1dc1a2c-d48f-1507-e053-3a05fe0ac7a3/Areddu_A_Itinerari_culturali_profili_giuridici.pdf
18. Aslam F. (2023). The Impact of Artificial Intelligence on Chatbot Technology: A Study on the Current Advancements and Leading Innovations. European Journal of Technology. Vol. 7, Issue 2, pp. 62-72. ISSN 2520-0712
19. ASTM International. (2008). *Standard test methods for measuring adhesion by tape test (ASTM D3359-08). West Conshohocken, PA: ASTM International*. https://doi.org/10.1520/D3359-08
20. Avsec, S., Jagiełło-Kowalczyk, M., Żabicka, A., Gil-Mastalerczyk, J., & Gawlak, A. (2024). *Human-centered systems thinking in technology-enhanced sustainable and inclusive architectural design*. Sustainability, 16(22), 9802. https://doi.org/10.3390/su16229802
21. Babalola DO, Sholanke AB, Adewale BA, Ene VO (2024) *Design of a Therapeutic Student Centre in Covenant University, Ota, Nigeria: User-Centred Approach*. Civil Engineering and Architecture 12(4):2598-2608
22. Baldassarre B, Calabretta G, Karpen IO, Bocken N, Hultink EJ (2024) *Responsible Design Thinking for Sustainable Development: Critical Literature Review, New Conceptual Framework, and Research Agenda.* Journal of Business Ethics 195:25-46
23. Bandini M. (1952) *La riforma fondiaria in Italia.* Moneca e Credito, 5(17). https://doi.org/10.13133/2037-3651/12152
24. Barreira E., Almeida R.M.S.F., Delgado J.M.P.Q. (2016) *Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components.* Construction and Building Materials 110:251-269
25. Bartholdy, J., Midtgaard, M. R., Rörig-Dalgaard, I., & Taube, M. (2025). *Water absorption in medieval lime plaster: Influence of binder ratio, preparation protocol, and limewashing*. Construction and Building Materials, 486, 141946. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.141946
26. Beni Culturali. http://www.cartadelrischio.beniculturali.it/ [2023-01-18]
27. Bernardo, G., Guida, A., Porcari, V., Campanella, L., Dell'Aglio, E., Reale, R., Cardellicchio, F., Salvi, A. M., Casieri, C., Cerichelli, G., Gabriele, F., & Spreti, N. (2021). *Culture economy: Innovative strategies to sustainable restoration of artistic heritage. Part II.* In Atti del XXII Convegno Internazionale "Diagnosis for the Conservation and Valorization of Cultural Heritage" (pp. 325–334). Cervino Edizioni. ISBN 978-88-95609-61-4. Napoli, 9–10 dicembre 2021
28. Bernardo, G., Guida, A., Porcari, V. D., & Visone, F. (2022). T*he preventive maintenance of the*

religious heritage of the city of Matera, Italy. In F. Palla, I. Rusu, L. Lanteri, C. Pelosi, & N. Apostolescu (Eds.), Proceedings of the 12th European Symposium on Religious Art, Restoration & Conservation (pp. [se le conosci, inserisci qui le pagine]). Kermes. Torino

29. Bernardo G, Rinaldi C, Guida A (2023) *Toward a Heritage Digital Guidelines in Planned Preventive Maintenance (PPM).* IFKAD2023 - Managing Knowledge for Sustainability, 880-894
30. Bernardo G, Rinaldi C, Guida A (2024) *Critical analysis of restoration practices against rising damp.* TEMA 10(2):104-116
31. Bernardo G, Rinaldi C, Guida A (2024) *Towards best restoration practices: the restoration by rising damp of San Basilio's Castle of Pisticci (Italy)*. REHABEND2024 Euro-American Congress: Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management, 2126-2134
32. Bixio, A. (2008). *Torri di mare e osservatori di paesaggi costieri: Disegni, documenti ed immagini delle torri costiere in Basilicata (Collana Architettura & Paesaggio).* Edizioni Grafie
33. Boncompagni I (2023) *La Pieve di San Gennaro in Lucchesia: un restauro sostenibile*. XIV Conference of AIES, 14-15 Dec 2023, Napoli
34. Bonomo A.E., Prosser G., Rizzo G., Sileo M. (2017) *Degradation diagnosis on Gravina Calcarenite: classification and damage indexes on the Sassi di Matera site (Southern Italy).* IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, Lecce
35. Bonomo A.E., Prosser G., Rizzo G., Koch R., Munnecke A. (2018) *Degradation connected to loss of materials on the gravina calcarenite: an example from rupestri-an churches in Matera (Southern Italy).* 6th International Conference: YOCOCU, Youth in Conservation on Cultural Heritage, Matera
36. Boschi, R., Minelli, C., & Segala, P. (a cura di). (2014). *Dopo Giovanni Urbani: Quale cultura per la durabilità del patrimonio dei territori storici*. Nardini Editore.
37. Brevetto CH 718 393 B1 - patent ownership: Leonardo Solutions s.r.l.
38. British Board of Agrément. (BBA) (n.d.). *Construction product certification*. https://www.bbacerts.co.uk/
39. British Board of Agrément. (2010). *Safeguard damp-proof systems: Safeguard Hydracheck*. https://static.safeguardeurope.com/pdfs/bba_damp_proofing.pdf
40. Buttolo, G. (2016). *Il controllo microclimatico passivo: caratterizzazione sperimentale delle isoterme di adsorbimento dei materiali essiccanti e applicazione numerica in ambito museale* [Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Energetica, Politecnico di Milano]
41. Cacciotti, R., Kaiser, A., Sardella, A., De Nuntiis, P., Drdàcky, M., Hanus, C., & Bonazza, A. (2021). *Climate change-induced disasters and cultural heritage: Optimizing management strategies in Central Europe*. Climate Risk Management, 31, 100301. https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100301
42. Camera dei Deputati – Assemblea Costituente. (1946). *Relazione al Parlamento presentata dal Governo in esercizio dei poteri della Costituente — Volume 1, Parte 2.* Roma: Tipografia della Camera. https://legislature.camera.it/_dati/costituente/documenti/ministerocostituente/p7_Vol1_2.pdf
43. Campanella L, Dell'Aglio E, Reale R (2021) *Culture Economy: innovative strategies to*

sustainable restoration of artistic heritage. Part I - Development of natural gels for cleaning the stone materials of cultural heritage from iron stains and biodeteriogenic microorganism. In: Campanella L., Piccioli C., Rendina A., Romanelli V. Atti del Convegno – XII Convegno Internazionale – Diagnosis for the Conservation and Valorization of Cultural Heritage. Cervino Edizioni, Napoli, 313-324

44. Cantoni, M., & Imalini, E. (2017, August 16). *Water flow in carbon and silicon carbide nanotubes*. arXiv. https://arxiv.org/abs/1708.03459v2
45. Cardellicchio, F., Bufo, S. A., Mang, S. M., Camele, I., Salvi, A. M., & Scrano, L. (2023). *The bio-patina on a hypogeum wall of the Matera-Sassi rupestrian church "San Pietro Barisano" before and after treatment with glycoalkaloids.* Molecules, 28(1), Article 330. https://doi.org/10.3390/molecules28010330
46. Caroselli M, Ruffolo SA, Piqué F (2021) *Mortars and plasters - how to manage mor-tars and plasters conservation*. Archaeological and Anthropological Sciences 13:188
47. Caruso, M., Buttazzoni, M., Passoni, C., Labo, S., Marini, A., & Pinho, R. (2024). *An updated multi-criteria decision-making method for the sustainable renovation of buildings including environmental, economic and social life-cycle metrics*. Journal of Building Engineering, 98, 110967. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110967
48. Castelluccio, R., & Vitiello, V. (2016). *Deleting of rising damp in the archaeological site of Piazza Armerina through the application of the technology by neutralising electrical charge T.N.C*. In Atti del XIV Forum Internazionale di Studi – Le Vie dei Mercanti (pp. 1457–146). Arcadia Ricerche
49. Casti, M. (2015). *Cristallizzazione del solfato di sodio in calcari biomicritici: l'uso di inibitori per la mitigazione del degrado*. Tesi di Dottorato in Tecnologie per la Conservazione dei Beni Architettonici e Ambientali, Università degli Studi di Cagliari
50. Catani, F., Contaldi, P., & Marongiu Buonaiuti, F. (2016). *La tutela dei beni culturali*. Università di Macerata. http://diue.unimc.it/ricerca/Latuteladeibeniculturali_Catani_Contaldi_MarongiuBuonaiuti.pdf
51. Chen, Y., Ni, Z., & Wang, G. (2008). *Electroosmotic flow in nanotubes with high surface charge densities*. Nano Letters, 8(1), 42–48.
52. Chen, W., Yin, Y., Cao, B., Cheng, X., & Wang, F. (2024). *The diffusion process of different moisture sources in the radiant cooling room and the condensation risk assessment*. Building and Environment, 260, 111686. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111686
53. Ciocan, V., Turcanu, E. F., Verdes, M., Luciu, R. S., Balan, M. C., Hudisteanu, S. V., & Burlacu, A. (2019). *Hygro-thermal monitoring inside Gheorghe Asachi library and their effects on heritage conservation*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 586, 012043. https://doi.org/10.1088/1757-899X/586/1/012043
54. Collins FC, Noichl F, Slepicka M, Cones G, Borrmann A (2024) *360-Degree Tri-Modal Scanning: Engineering a Modular Multi-Sensor Platform for Semantic Enrichment of BIM Models*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences X-1-2024:41-48
55. Complete Preservation. (2020, 30 agosto). *What is BRE DIGEST 245*. https://www.

completepreservation.co.uk/what-is-bre-digest-245/

56. Comune di Rosate. (2023). *Norme del Documento di Piano – Variante generale al PGT 2022-2023 (DP – Norme di attuazione)*. Comune di Rosate. https://municipium-images-production.s3-eu-west-1.amazonaws.com/s3/5954/allegati/variante-generale-pgt-2022-2023-vas/pgt-adottato-documenti-di-piano/norme_dp.pdf

57. Concas D., Guida A. (2022) *Identità e alterità. Strategie di recupero e valor-izzazione dei Sassi di Matera.* In: Crova C., Concas D., Ciaschi A. I 60 anni della Carta di Gubbio. Strategie per la salvaguardia dei centri storici. Il Prato casa editrice, Saonara (PD)

58. Congedo, P. M., Baglivo, C., D'Agostino, D., Quarta, G., & Di Gloria, P. (2021). *Rising damp in building stones: Numerical and experimental comparison in Lecce stone and carparo under controlled microclimatic conditions*. Construction and Building Materials, 296, 123713. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123713

59. Costanzo A, Minasi M, Casula G, Musacchio M, Buongiorno MF (2015) *Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and IR Thermography Applied to a Historical Building*. Sensors 15:194-213

60. Crispino M (2017) *Colobraro. Un paese, una storia, una cultura. 3rd edn.* Amministrazione Comunale di Colobraro, Colobraro (MT)

61. Cui L, Shibata S (2024) *Exploring climate-adaptive green-space designs for hot and humid climates: Lessons from Japanese dry gardens*. Urban Forestry & Urban Greening 93:128207

62. Cursi S., Martinelli L., Paraciani N., Calcerano F., Gigliarelli E., (2022) *Linking external knowledge to heritage BIM.* Automation in Construction, Vol. 141

63. D'Alessandro Restauri Srl. (2020). *Relazione sulla sperimentazione: San Pietro Barisano – San Francesco D'Assisi, Matera*

64. Decreto Legislativo 42/2004. (2004). *Codice dei beni culturali e del paesaggio*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.

65. De Fino M, Fatiguso F, Scioti A, De Tommasi G (2013) *Non destructive investigation for historic documentation and construction qualification of monumental buildings: the case of S. Gregory Church in Bari, South Italy*. WIT Transactions on The Built Environment 131:99-110

66. De Leo, R. (2012). *La difficile transizione dalla riforma agraria alle politiche di sviluppo: Osservazioni a partire dal caso Puglia-Lucania-Molise.* https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/43416370/De_Leo_-_Riforma_agraria-libre.pdf?...

67. Delgado, J. M. P. Q., Guimaraes, A. S., de Freitas, V. P., Antepara, I., Koci, V., & Cerny, R. (2016). *Salt damage and rising damp treatment in building structures*. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, Article 1280894. https://doi.org/10.1155/2016/1280894

68. Delle Cave V. (2018) *Metodologie innovative di processo e di prodotto per la conservazione e manutenzione del Patrimonio Architettonico: Architetture Ecclesiastiche nei Sassi di Matera.* Tesi di laurea in Laboratorio di Progettazione V: Architettura e Patrimonio. Corso di laurea magistrale a ciclo unico in Architettura, Università degli Studi della Basilicata, A.A. 2017/2018

69. Delli Santi M (2015) *La Geomatica per il monitoraggio del patrimonio architettoni-co della provincia di Matera*. In: Atti della 19° Conferenza Nazionale ASITA, pp. 355-362. ISBN: 978-88-

941232-5-8

70. Del Rey, M. (2024). *Arquitecturas en tierra fértil. La casa rural. Un estudio a través del tiempo*. Instituto Alicantino de Cultura Juan Gil-Albert

71. Desarnaud Julie, Yves Vanhellemont, Barbara Lubelli, Michael de Bouw (2021) *Effectiveness of electromagnetic and electro-osmosis methods for the treatment of rising damp*. In 1st International Conference on Moisture in Buildings (ICMB21), London. DOI: 10.14293/ICMB210086

72. De Suoza Leao Rodrigues A, Bolzan Agnelli Martinez L, Castro Silveira Z (2024) *An iterative design procedure for the development of assistive devices based on a participatory approach*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 46:127

73. Diaz Goncalves, T., & Santos, T. O. (2024). *State of conservation of an industrial brick masonry chimney: A case-study in Montijo, Portugal*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 9, 91. https://doi.org/10.1007/s41024-024-00443-1

74. Di Fraia, S., Massarotti, N., & Nithiarasu, P. (2016). *Modelling electro-osmotic flow in porous media: A review*. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow. http://dx.doi.org/10.1108/HFF-11-2016-0437

75. Ding Y, Zueva P, Grazuleviciute-Vileniske I, Yablonska H, Poczatko M (2021) *A traditional Japanese garden and its lessons for modern times*. Scientific Journal of Latvia University of Life Sciences and Technologies Landscape Architecture and Art 19(19):85-97

76. Doblhoff-Dier, K., & Koper, M. T. M. (2021). *Modeling the Gouy–Chapman diffuse capacitance with attractive ion–surface interaction*. The Journal of Physical Chemistry C, 125(30), 16664–16673. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c02381

77. Dong L, Xiong Y, Huang Q, Xu X, Huo Z, Huang G (2021) *Evaporation-induced salt crystallization and feedback on hydrological function in porous media with dif-ferent grain morphologies*. Journal of Hydrology 598:126427

78. Driussi G. (2021) *La qualità dell'intervento sui beni culturali - Attualità, Problemi e Prospettive*. Giornata di Studi Scienza e Beni Culturali, pp. 35-37, Venezia

79. Dubini, P., Baia Curioni, S., Campanini, L., Guelpa, F., & Cofone, D. (2011, ottobre). *La gestione del patrimonio artistico e culturale in Italia: La relazione fra tutela e valorizzazione*. Intesa Sanpaolo. https://group.intesasanpaolo.com/content/dam/portalgroup/repository-documenti/public/Contenuti/GEST-STRUTTURA/sviluppo/Prova_CB_Spalla_DX/CNT-04-000000008684B.pdf

80. Elnagar E, Duvier C, Batra Z, Christoffersen J, Mandin C, Schweiker M, Wargocki P (2024) *Creating a comprehensive framework for design, construction and man-agement of healthy buildings*. Energy & Buildings 324:114883

81. EMERISDA Project. (2014). *Summary report on existing methods against rising damp. D2.1 FINAL version 31-07-2014*

82. EMERISDA Project (2015) *Report identifying possible methods against rising damp to be tested in the project. DL2.2 FINAL version 25-02-2015*.

83. Endo, M., Takeda, T., Kim, Y. J., Koshiba, K., & Ishii, K. (2001). *High power electric double layer capacitor (EDLC's); From operating principle to pore size control in advanced activated carbons*.

Carbon Science, 1(3 & 4), 117–128.

84. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI). (1981). *UNI 8290-1: Edilizia residenziale – Sistema tecnologico – Classificazione e terminologia*. UNI.

85. Eppinger E., Jain A., Vimalnath P., Gurtoo A., Tietze F., Chea R.H., (2021) *Sustainability transitions in manufacturing: the role of intellectual property.* Current Opinion in Environmental Sustainability, Vo. 49, pp. 118-126

86. Ergenc D, Fort R, Varas-Muriel MJ, Alvarez de Buergo M (2021) *Mortars and plas-ters - How to characterize aerial mortars and plasters.* Archaeological and Anthro-pological Sciences 13:197

87. Eslami, N., Ottosen, L. M., Feijoo Conde, J., Franzoni, E., & Paz-Garcia, J. M. (2024). *Experimental study of electroosmosis and (Cl^-) diffusion in fired-clay bricks*. Construction and Building Materials, 447, 138176. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138176

88. Eslami, N. (2024, February). *Electroosmosis in masonry* (PhD thesis). DTU Sustain, Department of Environmental and Resource Engineering, Technical University of Denmark

89. Esquilache Martí, F. (2018). *Els constructors de l'Horta de València: Origen, evolució i estructura social d'una gran horta andalusina entre els segles VIII i XIII.* Publicacions de la Universitat de València. ISBN 978-84-9134-372-1.

90. Falchi A, Slanzi D, Balliana E, Driussi G, Zendri E (2018) *Rising damp in historical buildings: A Venetian perspective.* Building and Environment 131:117-127

91. Falchi, L., Lucéro Gomez, P., & Zendri, E. (2024). *On the contribution of tidal floods on damp walls of Venice*. International Journal of Disaster Risk Reduction, 110, 104609. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104609

92. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). *Spain – Horta of Valencia* [Global Important Agricultural Heritage System]. https://www.fao.org/giahs/around-the-world/detail//spain-horta-valencia/fr/

93. Favaro, T. (2013). *L'umidità di risalita capillare a Venezia: Problematiche e criticità delle tecniche d'intervento tradizionali e casi applicativi del sistema elettrofisico a neutralizzazione di carica per la deumidificazione muraria*. In AA.VV., Atti del convegno: Metodo scientifico ed innovazione tecnologica per la salvaguardia e recupero del patrimonio storico. Casi applicativi ed esempi di successo nella diagnosi, prevenzione e risoluzione delle patologie da umidità capillare in siti Unesco a Ragusa e in altri prestigiosi siti in Italia (pp. 163–186). Ragusa, 5–6 Ottobre 2012

94. Feijoo, J., Ottosen, L. M., Matyscak, O., & Fort, R. (2020). *Electrokinetic desalination of a farmhouse applying a proton pump approach: First in situ experience*. Construction and Building Materials, 243, 118308. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118308

95. Feilden, B. M. (2003). *Conservation of historic buildings (3rd ed.)*. Architectural Press

96. Filieri M.T. (2019) *San Gennaro: La Pieve romanica e il suo paesaggio*. PubliEd Editore in Lucca

97. Fioravanti, G. (2017). *Angolo di contatto [Dispense del corso Chimica delle superfici ed interfacce]*. Università degli Studi dell'Aquila. http://ing.univaq.it/fioravanti/chimica/Corso%20Chimica%20delle%20Superfici%20ed%20Interfasi/Lucidi%20Lezioni/09_Angolo_di_Contatto_2017_18.pdf

98. Firnkes, M., Pedone, D., Knezevic, J., Döblinger, M., & Rant, U. (2010). *Electrically facilitated translocations of proteins through silicon nitride nanopores: Conjoint and competitive action of diffusion, electrophoresis, and electroosmosis*. Nano Letters, 10(6), 2162–2167. https://doi.org/10.1021/nl100861c

99. Flanagan, M. T. (2008, 7 luglio). *Gouy-Chapman-Stern: Models the Gouy-Chapman and Gouy-Chapman-Stern Equations*. Michael Thomas Flanagan's Java Scientific Library. https://www.ee.ucl.ac.uk/mflanaga/java/GouyChapmanStern.html#model

100. Fragata, A., Veiga, R., & Velosa, A. (2016). *Substitution ventilated render systems for historic masonry: Salt crystallization tests evaluation*. Construction and Building Materials, 102, 592–600. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.130

101. Fragata, A., Veiga, R., & Velosa, A. (2021). *Performance of a salt-accumulating substitution lime render for salt-laden historic masonry walls*. Heritage, 4, 3879–3891. https://doi.org/10.3390/heritage4040212

102. Franzoni, E. (2014). *Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge*. Construction and Building Materials, 54, 123–136. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.054

103. Franzoni, E. (2018). *State-of-the-art on methods for reducing rising damp in masonry*. Journal of Cultural Heritage, 31(S), S3–S9. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.001

104. Franzoni, E., Berk, B., Bassi, M., & Marrone, C. (2023). *An integrated approach to the monitoring of rising damp in historic brick masonry*. Construction and Building Materials, 370, 130631. https://doi.org/1 0.1016/j.conbuildmat.2023.130631

105. Furlan S (2024) *I Dry Garden: I Giardini a Basso Fabbisogno Idrico*. Tesi di Laurea in "Riassetto del territorio e tutela del paesaggio", Università degli Studi di Padova

106. Gabriele F, Bruno L, Casieri C, Ranaldi R, Rugnini L, Spreti N (2022) *Application and Monitoring of Oxidative Alginate-Biocide Hydrogels for Two Case Studies in "The Sassi and the Park of the Rupestrian Churches of Matera"*. Coatings 12:462

107. Gade R, Moeslund TB (2014) *Thermal cameras and applications: a survey*. Machine Vision and Applications 25:245-262

108. Gao M., Bu W., Miao B., Wu Y., Li Y., Li J., Tang S., Wu Q., Zhuang Y. (2024). Generalist Virtual Agents: A Survey on Autonomous Agents Across Digital Platforms. Journal of latex class files, Vol. X (X)

109. García-Álvarez Coque, J. M., & Bigné, G. (2020). *El regadío histórico de la Huerta de València (España) como Sistema Importante del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM)*. Agroalimentaria, 26(50), 281–301. Universidad de los Andes. https://www.redalyc.org/journal/1992/199264891017/html/

110. Gebbia, V., & Gebbia, V. (2015). *Umidità negli edifici: Diagnostica e risanamento (2 edizione)*. Grafill

111. Generalitat Valenciana. (2018). Ley 5/2018, de 6 de marzo, de la Huerta de València. Diario Oficial de la Generalitat Valenciana. https://mediambient.gva.es/documents/20551069/165095422/Ley+5-2018%2C+de+6+de+marzo%2C+de+la+Generalitat%2C+de+la+Huerta+de+Val%C3%A8ncia.pdf/6002e462-b64e-4c0b-83c9-f856b246deab?t=1520861499488

112. Generalitat Valenciana. (2018). PAT Huerta de València – Planificación Territorial e Infraestructura Verde. https://mediambient.gva.es/es/web/planificacion-territorial-e-infraestructura-verda/pat-horta-de-valencia

113. Generalitat Valenciana, Conselleria de Medi Ambient, Infraestructuras y Territorio. (2018). Plan de Acción Territorial de la Infraestructura Verde del Litoral (PATIVEL). https://mediambient.gva.es/va/web/planificacion-territorial-e-infraestructura-verde/plan-de-accion-territorial-de-la-infraestructura-verda-del-litoral

114. Gholamalipour, P., Ge, H., & Stathopoulos, T. (2022). *Wind-driven rain (WDR) loading on building facades: A state-of-the-art review*. Building and Environment, 221, 109314. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109314

115. Gholami Z, Jalilisadrabad S, Amrollahi R (2023) *Investigating the impact of using modified cool materials by titanium dioxide (TiO2)-based photocatalytic self-cleaning nanoparticles in urban facades on urban microclimate parameters*. Case Studies in Construction Materials 19:e02268

116. Giaretton, M., Dizhur, D., Da Porto, F., & Ingham, J. M. (2016). *Seismic assessment and improvement of unreinforced stone masonry buildings: Literature review and application to New Zealand*. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 49(2), 156–167

117. Giuffrè, A., & Carocci, C. (1997). *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione dei Sassi di Matera*. Edizioni La Bautta. Matera

118. Gizzi, F. T., Sileo, M., Biscione, M., Danese, M., & Álvarez de Buergo, M. (2016). *The conservation state of the Sassi of Matera site (Southern Italy) and its correlation with the environmental conditions analysed through spatial analysis techniques*. Journal of Cultural Heritage, 17, 61–74. https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.05.002

119. Gomes Barbosa MT, Rosse VJ, Laurindo NG (2021) *Thermography evaluation strategy proposal due moisture damage on building facades.* Journal of Building Engineering 43:102555

120. Grinzato E, Bison PG, Marinetti S (2002) *Monitoring of ancient buildings by the thermal method.* Journal of Cultural Heritage 3:21-29

121. Gubbiotti, A., Baldelli, M., Di Muccio, G., Malgaretti, P., Marbach, S., & Chinappi, M. (2022). *Electroosmosis in nanopores: Computational methods and technological applications.* Advances in Physics: X, 7(1), 2036638. https://doi.org/10.1080/23746149.2022.2036638

122. Guida, A., & Porcari, V. D. (2018). *Innovation of the management process for the recovery and maintenance of cultural heritage*. In L. Villegas, I. Lombillo, H. Blanco, & Y. Boffill (Eds.), Proceedings of REHABEND 2018: Construction pathology, rehabilitation technology and heritage management (7th REHABEND Congress) (pp. [inserire intervallo di pagine, se noto]). Cáceres, Spain, May 15–18, 2018

123. Guimaraes, A. S., Delgado, J. M. P. Q., de Freitas, V. P., & Albuquerque, A. P. (2016). *The effect of salt solutions and absorption cycles in the capillary and drying coefficient of red brick samples with different joints*. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, Article 7868194. https://doi.org/10.1155/2016/7868194

124. Guolo, E. (2024). *Studio dei fenomeni di umidità da risalita capillare nel contesto Veneziano* (Tesi di dottorato, Università Iuav di Venezia).

125. Hall, C., & Hoff, W. D. (2009). *Water transport in brick, stone and concrete (2nd ed.)*. CRC Press.

126. Hamida MB, Jylha T, Remoy H, Gruis V (2021) *Circular building adaptability and its determinants - A literature review*. International Journal of Building Pathology and Adaptation 41(6):47-69

127. Han, W., Pei, S., & Liu, F. (2022). *Material characterization of the brick in the Ming Dynasty heritage wall of Pianguan Country: A case study*. Case Studies in Construction Materials, 16, e00940. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00940

128. Hauashdh, A., Jailani, J., Rahman, I. A., & Al-Fadhali, N. (2022). *Strategic approaches towards achieving sustainable and effective building maintenance practices in maintenance-managed buildings: A combination of expert interviews and a literature review*. Journal of Building Engineering, 45, 103490. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103490

129. Hermosilla, J., & Iranzo, E. (s.d.). *L'Horta de València: El jardín cultural mediterráneo, en transformación*. Departament de Geografia, Universitat de València. https://paisajesturisticosvalencianos.com/paisajes/lhorta-de-valencia/

130. Hernàndez, F. J. (2024). *Historia de la barraca valenciana*. Editorial Sargantana. ISBN 978-84-127516-8-0

131. Hines, T. (2023). *Difficulties encountered and solutions developed in restoring masonry buildings: Investigation of five significant buildings*. https://www.architecttomhines.com/

132. Hird, R., & Bolton, M. D. (2016). *Migration of sodium chloride in dry porous materials*. Proceedings of the Royal Society A, 472, 20150710. http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2015.0710

133. Hola, A., Matkowski, Z., & Hola, J. (2017). . Procedia Engineering, 172, 363–368. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.063

134. Hong, T., Wang, Z., Luo, X., & Zhang, W. (2020). *State-of-the-art on research and applications of machine learning in the building lifecycle*. Energy and Buildings, 212, 109831. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109831

135. ICCD – SIGECweb. http://iccd.beniculturali.it/it/sigec-web [2023-02-21]

136. ICCD – Standard catalografici. http://www.iccd.beniculturali.it/it/standard-catalografici [2023-02-21]

137. Il castello di San Basilio, https://ilcastellodisanbasilio.it/ [Maggio 2023]

138. IES Integrated Environmental System for Cultural Heritage. https://smartcities.tabsrl.com/ [2023-03-18]

139. Instituto Geológico y Minero de España. (2005). *Mapa Geológico de España 1:50 000 – Hoja 696 "Burjasot"*. https://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/pdfs/d6_G50/Magna50_696.pdf

140. Instituto Geológico y Minero de España. (2005). *Mapa Geológico de España 1:50 000 – Hoja 722 "Illa del Toro"*. https://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/pdfs/d7_G50/Magna50_722.pdf

141. Intini P. C., Intini P., Quartulli A. (2021) *Plinio e Paolo Marconi Architetti per l'Ente Riforma*

in Puglia, Basilicata e Molise. La chiesa dell'Assunta di Lamadacqua a Noci: un restauro del moderno. Giacovelli Editore, Bari

142. ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). (2016). *Carta geologica d'Italia alla scala 1:50 000, Foglio 261 "Lucca".* ISPRA. https://www.openaccessrepository.it/records/212039

143. ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). (2016). *Carta geologica d'Italia alla scala 1:50 000, Foglio 508 "Policoro".* ISPRA. https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/note_illustrative/508_Policoro.pdf

144. ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (2016). *Carta geologica d'Italia alla scala 1:50 000, Foglio 523 "Rotondella".* ISPRA. https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/note_illustrative/523_Rotondella.pdf

145. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). (n.d.). *Cartografia Geologica d'Italia alla scala 1:100 000 – Foglio 45 - Milano.* https://sgi.isprambiente.it/geologia100k/mostra_foglio.aspx?numero_foglio=45

146. ISPRA – Servizio Geologico d'Italia. (n.d.). *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100 000 – Foglio 190 - Monopoli.* https://sgi.isprambiente.it/geologia100k/mostra_foglio.aspx?numero_foglio=190

147. Italiapedia, Masseria-Castello di San Basilio, http://www.italiapedia.it/masseria-castello-di-san-basilio_appr_218_comune-di-pisticci_077-020 [Maggio 2023]

148. Jangam, S. K. (2023). Data architecture models for enterprise applications and their implications for data integration and analytics. International Journal of Emerging Trends in Computer Science and Information Technology, 4(3), 91–100. https://doi.org/10.63282/3050-9246.IJETCSIT-V4I3P110

149. Janssens, K., Marincioni, V., & Van Den Bossche, N. (2023). *Improving hygrothermal risk assessment tools for brick walls in a changing climate*. Journal of Physics: Conference Series, 2654, 012024. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2654/1/012024

150. Janssens, K., Vandemeulebrouke, I., Marincioni, V., & Van Den Bossche, N. (2024). *Hygrothermal risk assessment tool for brick walls in a changing climate*. Journal of Building Physics, 48(3), 420–421. https://doi.org/10.1177/17442591241266484

151. Jedrzejczak P, Parus A, Balicki S, Kornaus K, Janczarek M, Wilk KA, Jesionowski T, Slosarczyk A, Klapiszewski L (2023) *The influence of various forms of titanium dioxide on the performance of resultant cement composites with photocatalytic and antibacterial functions*. Materials Research Bulletin 160:112139

152. Jin, R., Zhong, B., Ma, L., Hashemi, A., & Ding, L. (2019). *Integrating BIM with building performance analysis in the project life cycle*. Automation in Construction, 106, 102861. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102861

153. Kasemsarn K, Sawadsri A, Harrison D, Nickpour F (2024) *Museums for Older Adults and Mobility-Impaired People: Applying Inclusive Design Principles and Digital Storytelling Guidelines - A Review*. Heritage 7:1893-1916

154. Kilian, R., Borgatta, L., & Wendler, E. (2023). *Investigation of the deterioration mechanisms induced by moisture and soluble salts in the necropolis of Porta Nocera, Pompeii (Italy).* Heritage

Science, 11(1), 72. https://doi.org/10.1186/s40494-023-00900-z

155. Koca, A., Ugural, M. N., & Yaman, E. (2024). *Rising damp treatment in historical buildings by electro-osmosis: A case study*. Buildings, 14, 1460. https://doi.org/10.3390/buildings14051460

156. Körber, P. (2018). *Mortar and brick materials treated with hydrophobic injection media, studied by environmental scanning electron microscopy*. Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences, 13(2), 55–66. https://doi.org/10.1556/606.2018.13.2.6

157. Kportufe, G. S. (2015). *The devastating effects of rising damp in the construction industry.* Industrial Engineering Letters, 5(10), 28–35

158. Ksinopoulou, E., Aggelakopoulou, E., & Eleftheriou, V. (2022). *Investigation of a suitable porous stone for the restoration work on the Acropolis circuit wall*. Construction and Building Materials, 335, 127522. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127522

159. Kushnierova, L., Ghiassi, B., & Khine, M. (2024). *Comparative study of moisture absorption and resistance to NaCl salt of clay-based plasters incorporating porous aggregate*. MATEC Web of Conferences, 403, 05003. https://doi.org/10.1051/matecconf/202440305003

160. Larcher, M., Leonardi, E., Troi, A., Stefani, A., Nerobutto, G., & Herrera-Avellanosa, D. (2025). *Assessing the impact of moisture buffering properties of materials on indoor environmental quality: A study on a recycled material plaster*. Building and Environment, 267, 112170. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112170

161. Llatas C., Soust-Verdaguer B., Passer A., (2020) *Implementing Life Cycle Sustainability Assessment during design stages in Building Information Modelling: From systematic literature review to a methodological approach,* Building and Environment, Vol. 182

162. Lentini, F., & Carbone, S. (1980). *Note illustrative del Foglio 507 – Pisticci. Carta geologica del Bacino dell'Agri alla scala 1:50.000*. Regione Basilicata. https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/507_PISTICCI/Foglio.html [Settembre 2025]

163. Lerma JL, Cabrelles M, Portalés C (2011) *Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade.* Construction and Building Materials 25:2190-2197

164. Lešinskis, A., Strauts, U., Metāls, M., Millers, R., & Afoņičevs, V. (2024). *Ventilation and air conditioning design approach based on ASHRAE psychrometric chart and Mollier diagram*. Frontiers in Built Environment, 10, 1372288. https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1372288

165. Lettieri, M., Calia, A., Mecchi, A. M., & Quarta, G. (2004). *Consolidation treatments on highly porous calcareous stone: A review of methodologies and products*. In Proceedings of the 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin (pp. 442–447). Lisboa

166. Liao, H., Ren, R., & Li, L. (2023). *Existing building renovation: A review of barriers to economic and environmental benefits*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(5), 4058. https://doi.org/10.3390/ijerph20054058

167. Lis A, Zienowicz M, Blachnio A (2024) *Lighting Features Affecting the Well-Being of Able-Bodied People and People with Physical Disabilities in the Park in the Evening: An Integrated and Sustainable Approach to Lighting Urban Green Areas.* Sustainability 16:8871

168. Liuzzi, S. (2025). *Moisture buffer capacity of materials as a mean to improve occupants'*

comfort and reduce energy demand in buildings. SSRN. https://doi.org/10.2139/ssrn.5251207

169. Lombardi, S. (2005). *Umidità nelle murature: diagnosi e recupero* (Tesi di dottorato, Università degli Studi di Napoli Federico II)

170. Lombardia Beni Culturali. (s.d.). *Chiesa di S. Giuseppe (Rosate).* https://www.lombardiabeniculturali.it/architetture/schede-complete/MI100-06246/ [Settembre 2025]

171. Lopez-Arce, P., Doehne, E., Greenshields, J., Benavente, D., & Young, D. (2009). *Treatment of rising damp and salt decay: The historic masonry buildings of Adelaide, South Australia*. Materials and Structures, 42, 827–848. https://doi.org/10.1617/s11527-008-9427-1

172. Lubelli, B., van Hees, R. P. J., & Bolhuis, J. (2018). *Effectiveness of methods against rising damp in buildings: Results from the EMERISDA project*. Journal of Cultural Heritage, 31S, S15–S22. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.025

173. Lubelli, B., Nijland, T. G., & van Hees, R. P. J. (2021). *Characterization and compatibility assessment of commercial stone repair mortars*. Journal of Cultural Heritage, 49, 174–182. https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.02.001

174. Lucchi E (2018) *Applications of infrared thermography in the energy audit of buildings: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews 82:3077-3090

175. Lucchi, E. (2018). *Review of preventive conservation in museum buildings.* Journal of Cultural Heritage, 29, 180–193. https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.009

176. Mahmoodzadeh M, Gretka V, Mukhopadhyaya P (2023) *Challenges and opportunities in quantitative aerial thermography if building envelopes.* Journal of Building Engineering 69:106214

177. Masini, N. (2006). *Dai Normanni agli Angioni: Castelli e fortificazioni*. In C. D. Fonseca (a cura di), Storia della Basilicata – 2. Il Medioevo. Edizioni Laterza

178. Massari, G. (1969). *L'umidità nei monumenti*. Rome Centre

179. Mecca, I. (2012). *Borghi e paesaggi rurali della Basilicata: tipologie edilizie e tecniche costruttive.* In EdA, Esempi di Architettura, novembre 2012

180. Meda US, Vora K, Mandi UA (2022) *Titanium dioxide based heterogeneous and heterojunction photocatalysts for pollution control applications in the construction industry*. Process Safety and Environmental Protection 161:771-787

181. Metals, M., Lešinskis, A., Borodinecs, A., & Turauskis, K. (2024). *Study on indoor air temperature and moisture behaviour in historical churches*. Energy & Buildings, 310, 114083. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114083

182. Mileto, C., & Vegas, F. (2007). *Centro histórico de Valencia: Ocho siglos de arquitectura residencial. Vol. 2.* Valencia: Edicions Generals de la Universitat Politècnica de València.

183. Ministero della Cultura. (2020). *Masseria S. Basilio. Vincoli in Rete.* https://vincoliinrete.beniculturali.it/VincoliInRete/vir/bene/dettagliobene3028099 [Settembre 2025]

184. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT), Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL. PP. – Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni" (D.M. 17 gennaio 2018), par. C8.4.1, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2019

185. Ministero dell'Università e della Ricerca. (2022, 9 aprile). *Decreto ministeriale n. 352 - Riparto di 5.000 borse di dottorati innovativi che rispondono ai fabbisogni di innovazione delle imprese e promuovono l'assunzione dei ricercatori dalle imprese*.

186. Modena Claudio, Filippo Casarin, Francesca Da Porto, Enrico Garbin, Nicola Mazzon, Marco Munari, Matteo Panizza, and Maria Rosa Valluzzi (2009). *Structural Interventions on Historical Masonry Buildings: Review of Eurocode 8 Provisions in the Light of the Italian Experience.* In Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, edited by E. Cosenza, 225–236. Napoli, Italy: Doppiavoce

187. Modena, C., Casarin, F., Da Porto, F., Garbin, E., Mazzon, N., Munari, M., Panizza, M., & Valluzzi, M. R. (2009). *Structural interventions on historical masonry buildings: Review of Eurocode 8 provisions in the light of the Italian experience.* In E. Cosenza (Ed.), Eurocode 8 perspectives from the Italian standpoint workshop (pp. 225–236). Doppiavoce

188. Modena, C., Valluzzi, M. R., Da Porto, F., Casarin, F., Garbin, E., Munari, M., Mazzon, N., Panizza, M., & Dalla Benetta, M. (2009, 12 luglio). *Recent advances in the structural analysis and intervention criteria for historic stone masonry constructions subjected to seismic actions.* Proceedings of the ISCARSAH Symposium "Assessment and strengthening of historical stone masonry constructions subjected to seismic actions", Mostar, Bosnia and Herzegovina

189. Moller Eva B., Birgit Olsen (2011). *Rising damp, a reoccurring problem in basements: a case study with differentattempts to stop the moisture.* In J. Vinha, J. Piironen, & K. Salminen (Eds.), 9th Nordic Symposium on BuildingPhysics: Proceedings (1 ed., Vol. 2, pp. 765-772). Tampere University of Technology.

190. Monczynski, B., Ksit, B., & Szymczak-Graczyk, A. (2019). *Assessment of the effectiveness of secondary horizontal insulation against rising damp performed by chemical injection*. In WMCAUS 2018 (IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 471, 052063). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/5/052063

191. Morese, G. (2014). *The Lucaniana Ionian landscape (18th–19th century).* Landscape History, 35(1), 31–46. https://doi.org/10.1080/01433768.2014.916909

192. Murray-Rust P., (2008) *Open Data in Science.* Nature Precedings

193. Nikmehr B., Hosseini M.R., Martek I., Zavadskas E.K., Autucheviciene J., (2021) *Digitalization as a Strategic Means of Achieving Sustainable Efficiencies in Construction Management: A Critical Review.* Sustainability, Vol. 13

194. Musso, S. F. (a cura di). (s.d.). *Banca dati: Tecniche di restauro*. UTET Scienze Tecniche

195. NorMaL PnD-PM 90/55. Criteri generali per l'applicazione delle PnD

196. NorMaL 42/93. Criteri generali per la scelta e l'applicazione di indagini non distrut-tive

197. Nunes, C., Skruzna, O., & Valek, J. (2018). *Study of nitrate contaminated samples from a historic building with the hygroscopic moisture content method: Contribution of laboratory data to interpret results practical significance*. Journal of Cultural Heritage, 30, 57–69. https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.09.013

198. Occhipinti, R., Caggiani, M. C., De Ferri, L., Xu, Z., Steindal, C. C., Razavi, N., Andiulo, F., Mazzoleni, P., & Barone, G. (2023). *Structural properties of volcanic precursors-based geopolymers before and after natural weathering*. Ceramics International, 49, 21892–21902.

https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.013

199. Padula R. (2000) *Relazione del Progetto di Restauro della Chiesa Rupestre di San Pietro Barisano Matera*

200. Passoni, C., Marini, A., Belleri, A., & Menna, C. (2021). *Redefining the concept of sustainable renovation of buildings: State of the art and an LCT-based design framework*. Sustainable Cities and Society, 64, 102519. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102519

201. Passoni, C., Palumbo, E., Pinho, R., & Marini, A. (2022). *The LCT challenge: Defining new design objectives to increase the sustainability of building retrofit interventions*. Sustainability, 14(14), 8860. https://doi.org/10.3390/su14148860

202. Patel D. (2024). Comparing Traditional OCR with Generative AI-Assisted OCR: Advancements and Applications. International Journal of Science and Research (IJSR), Vol. 14(6), pp. 347-351. DOI: https://dx.doi.org/10.21275/SR25603211507

203. Pizzetti, C. (1989). *Condizionamento dell'aria e refrigerazione: Teoria e calcolo degli impianti.* Masson

204. Povellato A. (2012) *La questione fondiaria oggi. Dalla piccola proprietà contatina all'aggregazione tra imprese.* In Riforma fondiaria e paesaggio. A sessant'anni dalle leggi di riforma: dibattito politico-sociale e linee di sviluppo. 183-19. Rubettino Editore Srl. ISBN 978-88-498-2497-0

205. Premoli, A. (2015). *L'ex Chiesa di San Nicolao a Bellano. Metodi di misura del contenuto di umidità nelle murature e progetto di un nuovo allestimento museale* (Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Milano)

206. Proietti, N., Calicchia, P., Colao, F., De Simone, S., Di Tullio, V., Luvidi, L., Prestileo, F., Romani, M., & Tatì, A. (2021). *Moisture damage in ancient masonry: A multidisciplinary approach for in situ diagnostics*. Minerals, 11(4), 406. https://doi.org/10.3390/min11040406

207. Property Care Association (PCA). (2017). *Code of practice: Investigation and control of dampness in buildings.* Property Care Association

208. Quartulli A, Intini P., Intini P. (2022) *Borgate rurali del XX secolo: Plinio e PAolo Marconi progettisti per l'Ente Riforma in Basilicata e Puglia*. In ICOMOS-CIAV Italia, Rural Architecture: the Memory of the Country Convegno internazionale - 21/22 MAggio 2022 ISBN 979-12-210-1036-7

209. Rahimi, N. (2022). *Life cycle thinking: Sustainable ideation tool for architects and designers*. Master's thesis, Faculty of Arts and Humanities, Linnaeus University.

210. Rakha T, El Masri Y, Chen K, Panagoulia E, De Wilde P (2022) *Building envelope anomaly characterization and simulation using drone time-lapse thermography*. Energy & Buildings 259:111754

211. Regione Basilicata. (2014). *Prologo.* Patrimonio Culturale Regione Basilicata. https://patrimonioculturale.regione.basilicata.it/rbc/upload/file_1432818842952.pdf

212. Regione Lombardia. (n.d.). Chiesa di S. Giuseppe, Via Roma 30 – Rosate (MI) [Scheda n. MI100-06246]. Lombardia Beni Culturali. https://www.lombardiabeniculturali.it/architetture/schede/MI100-06246/

213. Regione Lombardia. (n.d.). Scheda MI100-06246 – Chiesa di S. Giuseppe. In Catalogo Generale dei Beni Culturali. https://catalogo.beniculturali.it/detail/Lombardia/ArchitecturalOrLandscapeHeritage/MI100-06246_R03

214. Restucci A (1998) *Matera, I Sassi. Manuale del Recupero.* Electa, Milano

215. Ricca, M., Donato, A., Cirone, M., Ruffolo, S. A., Costanzo, A., Buongiorno, F., Mantella, G., La Russa, M. F., & Randazzo, L. (2023). *Building materials and decay assessment of the Gerace Cathedral (Reggio Calabria, Southern Italy)*. Case Studies in Construction Materials, 19, e02225. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02225

216. Ricca, M., Greca, R., Riente, C., Barca, D., Randazzo, L., Ruffolo, S. A., & La Russa, M. F. (2023). *Diagnostic study and efficiency evaluation of treatments against rising damp and salts crystallization in ornamental stones: The case of the green stone sacristy washbasin in the Church of San Domenico in Cosenza (Calabria, Italy)*. In Proceedings of the IMEKO TC-4 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (pp. 968–972). Rome, Italy

217. Riminesi Cristiano, Antonio Sansonetti, Andrea Scala (2018) *Assessment of the effectiveness of a dehumidification system by emission of electromagnetic fields: Proposal of a protocol*. Journal of Cultural Heritage, 31S, S46-S51. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.002

218. Rirsch, E., & Zhang, Z. (2010). *Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties*. Construction and Building Materials, 24, 1815–1820. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.024

219. Roche, G. (2012). *La termografia per l'edilizia e l'industria: Manuale operativo per le verifiche termografiche.* Maggioli Editore

220. Rodriguez Peruchi, A. B., Zuchinali, F. F., & Bernardin, A. M. (2021). *Development of a water-based acrylic paint with resistance to efflorescence and test method to determine the appearance of stains*. Journal of Building Engineering, 35, 102005. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102005

221. Rong, W., & Bahauddin, A. (2023). *Heritage and rehabilitation strategies for Confucian courtyard architecture: A case study in Liaocheng, China*. Buildings, 13(3), 599. https://doi.org/10.3390/buildings13030599

222. Rongali S.K. (2025). Natural Language Processing (NLP) in Artificial Intelligence. Woeld Journal of Advanced Research and Reviews, Vol.25(1), pp. 2515-2519. https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.25.1.0277

223. Rossetto, M. (2013). *Umidità di risalita capillare negli edifici storici: La tecnologia elettrofisica a neutralizzazione di carica quale indispensabile strumento a impatto zero per la prevenzione e la definitiva risoluzione del problema.* In Atti del convegno: Metodo scientifico ed innovazione tecnologica per la salvaguardia e recupero del patrimonio storico. Casi applicativi ed esempi di successo nella diagnosi, prevenzione e risoluzione delle patologie da umidità capillare in siti Unesco a Ragusa e in altri prestigiosi siti in Italia (pp. 107–126). Ragusa, 5–6 Ottobre 2012

224. Rossi, M. (1982). *Problemi di conservazione del Cenacolo nei secoli XVI e XVII*. Arte Lombarda, 62, 58–65.

225. Rouquerol, J., Avnir, D., Fairbridge, C. W., Everett, D. H., Haynes, J. M., Pernicone, N., Ramsay,

J. D. F., Sing, K. S. W., & Unger, K. K. (1994). *Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report)*. Pure and Applied Chemistry, 66(8), 1739–1758. https://doi.org/10.1351/pac199466081739

226. Rowe PG, Chung Y (2023) *Design Thinking and Storytelling in Architecture*. Birk-hauser, Basel

227. Safeguard Europe Ltd. (2007). *Rising damp & its control*. Horsham, West Sussex, United Kingdom: Safeguard Europe Ltd.

228. Safeguard Europe Ltd. (2016). *Rising damp & its control*. Horsham, West Sussex, United Kingdom: Safeguard Europe Ltd. ISBN 978-0-9933430-0-1

229. Sahu, M., & Majee, S. (2024). *A comparative analysis of methods and applications for automated model generation in architectural design for building renovation processes*. AIS – Architecture Image Studies Scientific Journal, 5(1). Ubiquity. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

230. Sandu Im Deak G, Ding Y, Ivashko Y, Sandu AV, Moncea MA, Sandu IG (2021) *New materials for finishing of ancient monuments and process of obtaining and ap-plying*. International Journal of Conservation Sciences 12(4):1249-1258

231. Sardella, A., De Nuntiis, P., & Bonazza, A. (2018). *Efficiency evaluation of treatments against rising damp by scale models and test in situ*. Journal of Cultural Heritage, 31S, S30–S37. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.020

232. Sardella, A., Lubelli, B., & Bonazza, A. (2021). *Effectiveness of a dehumidifying render system in tackling rising damp: Laboratory, small scale and field tests*. Construction and Building Materials, 306, 124810. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124810

233. Scrano L., Laviano R., Salzano G., Santacroce M., De Franchi S.A., Batanek J., Bufo S.A. (2020) *Natural biocides and bio-calcite: innovative tools for cultural her-itage*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 949

234. Seidu, R., Young, B., Nemcic, D., Robinson, H., & Ebohon, O. (2019). *Sustainable solutions to dampness in building: A case study of selected period properties in England*. In Conference Proceedings of 1st Association of Researchers in Construction Safety, Health and Well-Being (ARCOSH) Conference (pp. 63–75). South Africa

235. Senna P.P., Almeida A.H., Barros A.C., Bessa R.J., Azevedo A.L. (2020). Architecture Model for a Holistic and Interoperable Digital Energy Management Platform. Procedia Manufacturing, Volume 51, pp. 1117-1124. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.157

236. Sesana, E., Gagnon, A. S., Ciantelli, C., Cassar, J., & Hughes, J. J. (2021). *Climate change impacts on cultural heritage: A literature review*. WIREs Climate Change, 12(4), e710. https://doi.org/10.1002/wcc.710

237. Shepherd,N.,Cohen,J.B.,Carmen,W.,Chundu,M.,Ernsten,C.,Guevara,O.,Haas,F.,Hussain,S.T., Riede,F.,Siders,A.R.,Singh,C.,Sithole,P.,&Troi,A.(2022).*ICSMCHCwhitepaperIII:Theroleofcultural and natural heritage for climate action: Contribution of Solutions Group III to the International Co-Sponsored Meeting on Culture, Heritage and Climate Change (White paper)*. ICOMOS. https://www.heritageresearch-hub.eu/app/uploads/2022/10/ICSM-CHC-White-Paper-III-The-Role-of-Cultural-and-Natural-Heritage-for-Climate-Action.pdf

238. Shvaiko P., Euzenat J., (2013) *Ontology Matching: State of the Art and Future Challenges*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 25, pp. 158-176

239. SMART CITIES – SCN_00520. *Innovazione di prodotto e di processo per una manutenzione, conservazione e restauro sostenibile e programmato del patrimonio culturale: Ricerche archivistiche e bibliografiche.* Final report

240. Snyder, J. L., Getpreecharsawas, J., Fang, D. Z., Gaborski, T. R., Striemer, C. C., Fauchet, P. M., Borkholder, D. A., & McGrath, J. L. (2013). *High-performance, low-voltage electroosmotic pumps with molecularly thin silicon nanomembranes*. PNAS, 110(46), 18425–18430. https://doi.org/10.1073/pnas.1308109110

241. Socoloski, R. F., & Masuero, A. B. (2019). *Evaluation of the efficiency of the treatment for rising damp on walls through the insertion of chemical barriers by gravity.* Construction and Building Materials, 210, 660–672. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.018

242. Spilotro G (1980) *Relazione Tecnica dei lavori di consolidamento statico della chiesa di San Francesco d'Assisi di Matera.* Provveditorato OO.PP. Per la Basilicata - Matera

243. Stastny, P., Gasparik, J., & Makys, O. (2021). *Analysis of moisture and salinity of historical constructions before and after the application of REMEDIATIONS*. Journal of Building Engineering, 41, 102785. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102785

244. Taboroff, J., Couté, P., Orr, S. A., Ali, S., al Shawesh, S., & Roda Technology Ltd. (2023, October). *SLR climate change impacts on cultural heritage: Final report (Report No. WOR-2484J)*. Triple Line Consulting; British Council.

245. Tao F., Sun X., Cheng J., Zhu Y., Liu W., Wang Y., Xu H., Hu T., Liu T., Sun Z., Xu J., Bao J., Xiang F., Jin X. (2024). makeTwin: A reference architecture for digital twin software platform.Chinese Journal of Aeronautics. Volume 37, Issue 1, pp. 1-18. https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.05.002

246. Testo. (s.d.). Kit Testo 890 X2 [Termocamera]. Testo. https://www.testo.com/it-IT/kit-testo-890/p/0563-0890-X2

247. Thien H.T., Quoc-Viet P., Xuan-Qui P., Thanh T.N., Zhu H., Dong-Seong K. (2023). Artificial intelligence for the metaverse: A survey. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 117, Part A, 105581. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105581

248. TNO. (n.d.). Innovation for life. https://www.tno.nl/en/

249. Torres, I. (2018). *New technique for treating rising damp in historical buildings: Wall base ventilation*. Journal of Cultural Heritage, 31(Suppl.), S60–S70. https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.007

250. Tucci R., (2018) *Le voci, le opere e le cose. La catalogazione dei beni culturali demoetnoantropologici*. Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo, Roma

251. Tulakov, E., Inoyatov, D., Kurbonov, A., Sirojiddinov, S., Abdullayeva, S., Matyokubov, B., & Kulmirzayev, J. (2024). *Experimental analysis of moisture protection of buildings*. E3S Web of Conferences, 559, 04018. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455904018

252. Uddin M.K.S. (2024). A Review of Utilizing Natural Language Processing and Ai for Advanced Data Visualization in Real-time Analytics. Global Mainstream Journal, Vol. 1(4). http://dx.doi.org/10.62304/ijmisds.v1i04.185

253. Ufficio Nazionale per i Beni Culturali Ecclesiastici e l'Edilizia di Culto (BeWeB). (n.d.). Chiesa di San Giuseppe. https://www.beweb.chiesacattolica.it/edificidiculto/edificio/15156/Chiesa%2Bdi%2BSan%2BGiuseppe

254. UNI. (2003). UNI EN 11085 Materiali lapidei naturali ed artificiali. Determinazione del contenuto d'acqua: Metodo ponderale. Ente Italiano di Normazione

255. UNI. (2010). UNI EN 15886 Conservazione dei beni culturali – Metodi di prova – Misura del colore delle superfici

256. UNI. (2011) UNI 11432 Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Misura della capacità di assorbimento di acqua mediante spugna di contatto

257. Valdez Madrid DE, Winardhi CW, De Belie N, Cnudde V (2024) *Exploring Lime Mortar Microstructure: Investigating the Impact of Mixed-in Additives and their Role in Salt Efflorescence Inhibition*. In: MATEC Web of Conference 403:03006

258. Valencia en Blanco y Negro. (2020, 12 aprile). *Viviendo en una barraca valenciana*. https://valenciablancoynegro.blogspot.com/2020/04/viviendo-en-una-barraca-valenciana.html

259. Valente C., (1949) *L'architettura rustica nella Lucania*. In: Lares, Novembre-Dicembre 1940, Vol. 11, No. 6 (Novembre-Dicembre 1940). Casa Editrice Leo S. Olshki s.r.l., 1940, pp. 424-434

260. Vanhellemont, Y., Bolhuis, J., de Bouw, M., Dubois, S., Lubelli, B., Miedema, L., & van Hees, R. (2018). *Are electrokinetic methods suitable for the treatment of rising damp?* Journal of Cultural Heritage, 31S, S23–S29. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.010

261. Viceconte, G. (2022). San Basilio a Pisticci. *Una residenza d'artista in un castello della Basilicata. Artribune.* https://www.artribune.com/arti-visive/arte-contemporanea/2022/09/san-basilio-a-pisticci-castello-basilicata-intervista-aloisia-leopardi/ [Maggio 2023]

262. Vidas S, Moghadam P, Bosse M (2013) *3D Thermal Mapping of Building Interiors using a RGB-D and Thermal Camera*. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2311-2318

263. Visit Pisticci, Castello di San Basilio, https://visitpisticci.it/luogo-di-interesse/castello-di-san-basilio/ [Maggio 2023]

264. Vitale V (2018) *The middle valley of the Sinni (Italy, southern Basilicata). Analysis of visibility between medieval fortified sites (11th-14th century A.D.).* Journal of Research and Didactics in Geography (J-READING) 2(7):83-93

265. Vitiello, V., Castelluccio, R. (2019). *Il risanamento delle murature affette da umidità di risalita capillare. Il metodo CNT*. LucianoEditore

266. Vollmer M, Mollmann KP (2010) *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications,* WILEY-VCH, Weinheim

267. Volpe F.P. (1818) *Memorie Storiche profane e religiose su la Città di Matera.* Napoli, Stamperia Simoniana

268. Watchorn V, Hitch D, Tucker R, Frawley P, Aedy K, Grant C (2023) *Evaluating universal design of built environments: an empirical study of stakeholder practice and perceptions.* Journal of Housing and the Built Environment 38:1491-1510

269. Weiss, T., Valek, J., Slizkova, Z., Slavik, M., Nahunkova, P., Mares, J., & Kozlovcev, P. (2024). *Migration of water and salt in confined archaeological complexes: Comprehensive investigation below the third courtyard of the Prague Castle*. International Journal of Architectural Heritage. https://doi.org/10.1080/15583058.2024.2341048

270. Xiang X, Yang C, Chen J, Tang R, Hu L (2020). A comprehensive model of teaching digital design in architecture that incorporates sustainability. Sustainability, 12(20), 8368. https://doi.org/10.3390/su12208368

271. Yang X., Grussenmeyer P., Koehl M., Macher H., Murtiyoso A., Landes T., (2020) *Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques*. Journal of Cultural Heritage, Vol. 46, pp. 350-360

272. Yang Z, Li Q, Liu M, Xue N, Yu L, Xu L, Wu K (2022) *Efflorescence inhibition and microstructure evolution of Portland cement-based artificial stone induced by mineral additives.* Case Studies in Construction Materials 17:e01509

273. Zhang Y., Liang C., Li X. (2024). Understanding virtual agents' service quality in the context of customer service: A fit-viability perspective. Electronic Commerce Research and Applications, Vol. 65, 101280. https://doi.org/10.1016/j.elerap.2024.101380

274. Zhang T, Xu H, Wang C (2022) *Self-adaptability and topological deformation of Ganlan architectural heritage: Conservation and regeneration of Lianghekou Tujia village in Western Hubei, China.* Frontiers of Architectural Research 11:865-876

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questo percorso di dottorato desidero esprimere la mia gratitudine a tutti coloro che hanno contribuito, direttamente o indirettamente, alla realizzazione di questo lavoro.

Ringrazio innanzitutto le mie tutor, la Prof.ssa Antonella Guida e la Prof.ssa Graziella Bernardo, per il costante confronto, gli stimoli offerti durante il percorso di dottorato e la disponibilità nel seguire le diverse fasi della ricerca. A loro va anche la mia gratitudine per l'attenzione e la fiducia con cui mi hanno accompagnata in questi anni. La loro esperienza, unita all'attenzione metodologica e al rigore scientifico che mi hanno trasmesso, ha rappresentato un punto di riferimento fondamentale per la mia crescita professionale e personale.

Ringrazio Maria Luisa Zerilli e tutto il team del *Gruppo Leonardo Solutions s.r.l.-Domodry*, con cui ho avuto il piacere di collaborare dall'inizio di questo percorso e che mi ha fatto sentire parte integrante del gruppo di lavoro. La disponibilità al confronto, la condivisione di competenze e il supporto nelle diverse fasi del progetto hanno contribuito in modo significativo alla realizzazione di questo lavoro.

Desidero ringraziare Pilar Martí Rodrigo e Carlos Muñoz Alfonso, dello studio *mmarq–Estudio de arquitectura y urbanismo*, che durante il mio periodo all'estero mi hanno accolta come una collaboratrice a pieno titolo, facendomi sentire a casa. Il confronto quotidiano sui progetti, l'affiancamento nelle pratiche di restauro e la condivisione del loro metodo progettuale hanno arricchito profondamente il mio percorso, non solo come ricercatrice ma anche come professionista del settore.

Desidero inoltre ringraziare tutti coloro che, a vario titolo, hanno contribuito allo sviluppo di questa ricerca. In particolare i professionisti, gli amministratori locali, i proprietari dei beni analizzati e quanti hanno reso possibile lo svolgimento dei sopralluoghi e delle attività sul campo, mettendo a disposizione informazioni, documentazione e preziose testimonianze relative ai casi studio analizzati. Il loro contributo ha rappresentato un supporto fondamentale per lo svolgimento e l'approfondimento di questo lavoro di ricerca.

Ringrazio i miei genitori, Francesca e Vincenzo, per avermi sempre incoraggiata e spronata a credere nelle mie capacità e a non mollare, anche quando il percorso sembrava essere più difficile del previsto. Mi avete sostenuta con pazienza infinita, supportandomi e sopportandomi sempre. Grazie al vostro amore, alla vostra fiducia e alla vostra presenza costante mi avete trasmesso i valori e la forza che mi hanno permesso di arrivare fin qui e di diventare la donna che sono oggi, e di cui vado fiera.

Ringrazio Alessia, la mia sorellina: nello stesso periodo abbiamo intrapreso percorsi simili, fatti di dubbi e fatiche; sei stata l'unica a comprendere davvero quel senso di smarrimento che a volte mi accompagnava. Grazie per esserci stata, per gli sfoghi condivisi e per la vicinanza silenziosa, anche a distanza. Oggi, a conclusione di questo mio percorso, spero che queste parole ti ricordino che anche le stagioni più dure passano e che la soddisfazione di aver raggiunto il traguardo, nonostante le mille difficoltà, ripaga ogni fatica. E, come tu mi hai sempre definita il "genio della famiglia", io ti dico: credi in te stessa e nella tua genialità!

Ringrazio Giuseppe, il mio ragazzo, il mio compagno di vita, colui che più di tutti ha sopportato le mie frustazioni, condiviso gioie e preoccupazioni e festeggiato ogni traguardo di questo percorso insieme a me. Grazie per avermi aiutata a gestire le ansie, per avermi consolata nei momenti più difficili e per tutte le notti insonni trascorse al mio fianco. Anche quando minacciavo di lasciare tutto e scappare a Honolulu con Merlino, sei sempre riuscito a farmi tornare il sorriso e ad aiutarmi a ritrovare la strada. Grazie per la pazienza, la presenza, le risate e l'amore che non mi hai mai fatto mancare.

Ringrazio Giuseppe ed Alba, che per me sono molto più di amici di famiglia e che ormai sono diventati come degli zii. Grazie per avermi spronata a cogliere le opportunità che la vita mi ha messo davanti, compresa quella di intraprendere questo dottorato. Da voi ho imparato anche quanto sia importante trovare il giusto equilibrio tra impegno e leggerezza, tra studio e vita privata, senza mai sottovalutare né l'uno né l'altro.

Ringrazio me stessa per essere arrivata fin qui: per la determinazione, la pazienza e la forza che non immaginavo di possedere. È stato un percorso complesso, costellato di alti e bassi e ci sono state volte in cui ho pensato di non farcela, ma ho resistito, convinta che ne valesse la pena e che me lo meritassi. Ringrazio me stessa per aver preservato curiosità ed entusiasmo anche nei momenti più difficili, imparando a riconoscere i miei limiti e a trasformarli in nuovi punti di partenza. Questa tesi non è solo il frutto di studio e lavoro, ma anche della mia crescita personale, di cui oggi posso dire di essere profondamente fiera!

Non posso infine dimenticare Zeus, il mio pelosetto, che purtroppo mi ha lasciata quasi all'inizio del mio dottorato. La sua presenza, il suo ricordo e l'affetto sincero che mi ha donato hanno continuato a sostenermi silenziosamente e a darmi forza in questi anni.