

Francesca **Visone**

**Preserving heritage in a changing environment.
Strategie proattive per il consolidamento
dei materiali lapidei porosi:
il caso dei Sassi di Matera**

ICAR/10 | GEO/09

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





Università degli Studi della Basilicata

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

Preserving heritage in a changing environment.

Strategie proattive per il consolidamento dei materiali lapidei porosi:
il caso dei *Sassi di Matera*

Settore Scientifico Disciplinare
ICAR/10 – GEO/09

Coordinatrice del Dottorato
Ch.ma Prof.ssa Antonella **Guida**

Dottoranda
Dott.ssa Francesca **Visone**

Tutor

Ch.ma Prof.ssa Antonella **Guida**
Università degli Studi della **Basilicata**

Ch.mo Prof. Nicola **Masini**

CNR – ISPC

Co-tutor

Ch.mo Prof. Fabrizio **Antonelli**

Università **IUAV** di Venezia

Ch.ma Prof.ssa Elena **Tesser**

Università **IUAV** di Venezia

Desidero esprimere la mia più sincera gratitudine alla prof.ssa Antonella Guida e al prof. Nicola Masini per la fiducia con cui hanno accolto e sostenuto il progetto sin dall'inizio. Alla prof.ssa Bernardo va la mia riconoscenza per lo stimolante scambio di idee. Un ringraziamento speciale a Maria Sileo per l'immane supporto e le preziose indicazioni. Esprimo, inoltre, la mia gratitudine agli Arch. Andrisani e Porcari per il contributo essenziale nelle fasi iniziali della ricerca e per il reperimento dei materiali oggetto di studio.

Un ringraziamento particolare al prof. Fabrizio Antonelli e alla dott.ssa Elena Tesser per il fondamentale supporto scientifico e i contributi essenziali alla riuscita del lavoro. Un sincero grazie allo staff del LAMA – Laboratorio Analisi Materiali Antichi dell'Università Iuav di Venezia, in particolare ad Alberto Conventi, Floriana Majerle, Rebecca Piovesan e Giulia Lodi, per la preziosa collaborazione e il costante sostegno durante le attività di ricerca. Rivolgo un sentito ringraziamento al laboratorio LabSCo – Laboratorio di Scienza delle Costruzioni dell'Università Iuav di Venezia per le prove di compressione eseguite sui materiali. Un grazie di cuore ai miei colleghi, la cui vicinanza e collaborazione hanno rappresentato una fonte continua di motivazione lungo tutto il percorso.

UNESCO is conducting a preliminary damage assessment for cultural properties through remote monitoring based on satellite imagery. As of 29 November 2024, UNESCO has verified damage to 75 sites since 7 October 2023 – 10 religious sites, 48 buildings of historical and/or artistic interest, 3 depositories of movable cultural property, 6 monuments, 1 museum and 7 archeological sites.

<https://www.unesco.org/en/gaza/assessment?hub=102070>

Last update: 5 December 2024

Indice

Abstract – IT

Abstract – EN

0. Prefazione

0.1 Intersezioni tra patrimonio culturale, cambiamenti climatici e sostenibilità

0.2 Strategie di conservazione dei Sassi di Matera (Basilicata, Italia) e obiettivi specifici della ricerca

1. Status Quaestionis

1.1 Introduzione ai processi di degrado di substrati carbonatici

1.2 Impatto del Cambiamento Climatico sul Patrimonio Storico Costruito: Tematiche Principali e Approcci alla Conservazione nell'analisi della Letteratura di riferimento

1.3 La conservazione del patrimonio costruito nel tempo: cenni teorici e principali tipologie di trattamento

1.3.1 Pre-consolidamento

1.3.2 Pulitura

1.3.3 Protezione

1.3.4 Incollaggi-stuccature

1.3.5 Consolidamento

1.4 Introduzione ai prodotti consolidanti per il trattamento di materiali lapidei

1.4.1 Consolidanti inorganici

1.4.2 Consolidanti organici

1.4.3 Consolidanti a base di silicio

1.4.4 Nanoparticelle di idrossido di calcio

1.4.5 Nanoparticelle di biossido di silicio

2. Sperimentazione

2.1 Introduzione

2.1.1 Excursus storico della città dei Sassi

2.1.2 La definizione della città contemporanea e l'emergenza Sassi

2.1.3 Caratteri morfologici del paesaggio

2.1.4 Calcarenite di Gravina

2.1.4.1 Caratteri distintivi della roccia

2.1.4.2 Principali morfologie di degrado

2.1.5 Cambiamento climatico e Sassi di Matera: quali rischi per il sito UNESCO?

2.1.5.1 Introduzione

2.1.5.2 Classificazione del clima materano

2.1.5.3 Il dataset CHIRPS per la valutazione dell'andamento delle Precipitazioni a Matera

2.1.5.4 La funzione di Lipfert per la stima della recessione superficiale

2.1.5.5 Analisi dell'Andamento Pluviometrico a Matera: risultati

2.1.5.6 Stima della recessione superficiale e proiezioni future: risultati

2.1.5.7 Conclusioni

2.2 Materiali

2.2.1 Litotipi oggetto dello studio

2.2.2 Prodotti consolidanti

2.3 Metodi

2.3.1 Caratterizzazione dei litotipi

2.3.2 Applicazione e valutazione dei trattamenti consolidanti

2.3.3 Valutazione dell'efficacia a lungo termine dei trattamenti

2.4 Caratterizzazione dei litotipi

2.4.1 Caratterizzazione mineralogico-petrografica dei campioni

2.4.2 Determinazione dei parametri fisico-meccanici

2.5 Valutazione dell'efficacia e della compatibilità dei trattamenti consolidanti.

2.5.1 Monitoraggio delle caratteristiche macroscopiche dei provini

2.5.2 Analisi SEM-EDS

2.5.3 Analisi porosimetriche mediante porosimetria ad intrusione di mercurio

2.5.4 Variazione dei parametri fisico-meccanici

2.5.5 Variazione delle coordinate cromatiche

2.6 Valutazione comparativa dell'efficacia a lungo termine dei trattamenti di consolidamento testati

2.7 Strategie di conservazione proattive per il sito UNESCO dei Sassi di Matera: conclusioni e prospettive future

Appendice A

Appendice B

Appendice C

Appendice D

Appendice E

Abstract – IT

Il presente studio esamina le problematiche legate alla conservazione del patrimonio architettonico, concentrandosi in particolare sul contesto dei *Sassi di Matera* (Basilicata, Italia), sito UNESCO di rilevanza mondiale.

In questo contesto, l'impiego predominante della calcarenite, una roccia sedimentaria carbonatica altamente porosa, rende le strutture particolarmente vulnerabili ai processi di degrado, accelerati dai cambiamenti climatici. Il deterioramento della calcarenite, aggravato da fattori quali umidità, erosione e inquinamento atmosferico, richiede un approccio integrato che combini metodologie tradizionali e tecniche innovative.

La ricerca si concentra sulla valutazione di diverse strategie di consolidamento, includendo l'impiego di nanoparticelle di idrossido di calcio e nanoparticelle di silice, per migliorare la resistenza meccanica e la stabilità microstrutturale del substrato lapideo, preservandone, al contempo, le caratteristiche chimico-fisiche ed estetiche originarie.

Mediante un'analisi multi-analitica e l'utilizzo di tecniche diagnostiche non distruttive, lo studio ha valutato la penetrazione e l'efficacia dei trattamenti consolidanti, nonché la loro durabilità nel tempo.

L'approccio sperimentale ha consentito di individuare le soluzioni più efficaci per il consolidamento della calcarenite di Gravina, nel contesto di una conservazione preventiva e adattiva.

La sperimentazione è stata condotta presso il *LAMA – Laboratorio Analisi Materiali Antichi* dell'Università IUAV di Venezia, sotto la supervisione del Prof. Fabrizio Antonelli e della Dott.ssa Elena Tesser.

I risultati offrono *linee guida* per la definizione di strategie di conservazione mirate ad accrescere la resilienza del patrimonio culturale agli impatti dei cambiamenti climatici (§ 2.7), assicurandone la tutela a lungo termine e la trasmissione alle future generazioni.

Abstract – EN

The study explores the challenges related to the conservation of architectural heritage, focusing specifically on the context of the *Sassi of Matera* (Basilicata region, Italy), UNESCO World Heritage site of global significance.

In this context, the predominant use of calcarenite, a highly porous carbonate sedimentary rock, makes the structures particularly vulnerable to decay processes, accelerated by climate change. The deterioration of calcarenite, exacerbated by factors such as humidity, erosion, and air pollution, requires an integrated approach that combines traditional methods with innovative techniques.

The research focuses on the evaluation of various consolidation strategies, including the use of calcium hydroxide nanoparticles and silica nanoparticles, to improve the mechanical strength and microstructural stability of the stone substrate while preserving its original chemical-physical and aesthetic characteristics.

Through a multi-analytical approach and the use of non-destructive diagnostic techniques, the study assessed the penetration and effectiveness of the consolidation treatments, as well as their durability over time.

The experimental approach allowed the identification of the most effective solutions within the framework of preventive and adaptive conservation.

The experimental tests were performed at *LAMA – Laboratory for Analysing Materials of Ancient origin* at the IUAV University of Venice, under the supervision of Prof. Fabrizio Antonelli and Dr. Elena Tesser.

The results provide *guidelines* for defining conservation strategies aimed at increasing the resilience of cultural heritage to the impacts of climate change (§ 2.7), ensuring its long-term protection and transmission to future generations.

0.

Prefazione

0.1

Intersezioni tra patrimonio culturale, cambiamenti climatici e sostenibilità

La rilevanza e l'ampio contributo del patrimonio culturale allo sviluppo sostenibile e inclusivo sono ormai universalmente riconosciuti.

È noto che il patrimonio culturale costituisce, ad oggi, un elemento insostituibile del tessuto socioculturale ed economico di una nazione, con un valore incommensurabile nel promuovere l'unità delle comunità e stimolare la crescita economica e culturale [1].

D'altro canto, *“Il patrimonio culturale, quale risorsa non rinnovabile, unica, non sostituibile e non intercambiabile, è attualmente confrontato a importanti sfide legate a trasformazioni di carattere culturale, ambientale, sociale, economico e tecnologico che interessano tutti gli aspetti della vita contemporanea”* (Conclusioni del Consiglio del 21 maggio 2014 relative al patrimonio culturale come risorsa strategica per un'Europa sostenibile (2014/C 183/08)) [2]. In un contesto globale caratterizzato da cambiamenti climatici sempre più evidenti, il patrimonio culturale e naturale mondiale si confronta con sfide senza precedenti. Negli ultimi decenni, la consapevolezza dell'aumento dei fattori di rischio ha promosso e incentivato l'adozione di approcci alla conservazione che possano essere definiti sostenibili [3,4].

Il concetto di *sviluppo sostenibile*, introdotto nel 1987 dalla *Commissione Brundtland*, ha sottolineato la necessità di bilanciare le esigenze attuali con le necessità delle generazioni future. Questo principio, inizialmente applicato all'economia, alla società e all'ambiente, è stato esteso alla cultura e al patrimonio, rendendo cruciale l'applicazione degli stessi principi di sostenibilità in questi ambiti.

L'*intergenerazionalità*, centrale nella nozione di sostenibilità, si riflette, quindi, nella gestione dei beni culturali e nel campo della conservazione e del restauro, con l'obiettivo principale di preservare il patrimonio per trasmetterlo alle generazioni future.

La gestione sostenibile del patrimonio culturale si configura, dunque, come una scelta strategica per il XXI secolo, come evidenziato dall'inclusione del patrimonio culturale nel programma d'azione globale delineato nell'*Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile*. In particolare il *target 11.4* incoraggia a rafforzare le azioni per la protezione e la promozione del patrimonio culturale e naturale, riconoscendolo come fondamentale per la creazione di città e territori inclusivi, sicuri, resilienti e sostenibili [5].

Nonostante i progressi significativi compiuti in questa direzione, permangono diverse sfide da affrontare.

Al fine di sviluppare una strategia coerente per la gestione dei cambiamenti climatici, è fondamentale che le problematiche, le soluzioni, gli esempi e le migliori pratiche siano strutturati attraverso un processo uniformemente applicabile ai siti iscritti nella *Lista del Patrimonio culturale e naturale mondiale dell'Unesco*.

Il rapporto pubblicato nel maggio 2007, intitolato *World Heritage Reports n°22 - Climate Change and World Heritage*, affronta l'analisi e la gestione degli impatti

dei cambiamenti climatici sul Patrimonio Mondiale, fornendo linee guida per assistere *le Parti* nell'implementazione di appropriate ed efficaci strategie di gestione [6].

Tale processo, come descritto nel rapporto, include:

- Selezione dei Siti: Identificazione e selezione di siti rappresentativi del patrimonio culturale
- Analisi dei Problemi: Individuazione e caratterizzazione dei problemi osservabili o dimostrabili derivanti dai cambiamenti climatici, con un focus sugli effetti specifici su ciascun sito
- Elaborazione delle Risposte: Sviluppo e implementazione di strategie di risposta alle sollecitazioni climatiche, adattate alle esigenze specifiche dei siti di patrimonio culturale. Queste risposte possono comprendere attività di monitoraggio, interventi di manutenzione, gestione adattativa e/o ricerca scientifica.
- Valutazione delle Migliori Pratiche: Analisi e adozione di soluzioni ottimali, o *best practices*, per garantire che le risposte siano efficaci e integrate con le politiche di gestione patrimoniale.

Questo approccio metodologico assicura che le risposte alle sfide climatiche siano sistematicamente allineate con le strategie di gestione del patrimonio, favorendone la resilienza e la sostenibilità a lungo termine [Fig.1].

In questo contesto, le strategie di adattamento ai cambiamenti climatici risultano essenziali per attenuare gli impatti negativi su sistemi socioeconomici e ambientali.

Il rapporto "*Strengthening Cultural Heritage Resilience for Climate Change*" (2022) [7] sottolinea l'importanza cruciale della ricerca e dell'innovazione nella protezione del patrimonio culturale dai cambiamenti climatici, indicando la necessità di studi di base che considerino le specificità dei materiali e delle strutture coinvolte.

L'introduzione di nuovi materiali sostenibili nel restauro, in sostituzione dei tradizionali polimeri sintetici e solventi volatili, rappresenta un passo avanti significativo per ridurre l'impatto ambientale e i rischi alla salute dei professionisti del settore [8]. Tuttavia, valutare la sostenibilità di un materiale nel restauro richiede l'analisi approfondita delle sue prestazioni e delle caratteristiche chimico-fisiche nel tempo.

Per sviluppare metodologie di conservazione sostenibili, è fondamentale, dunque, adottare approcci di ricerca mirati, che comprendano analisi approfondite sul comportamento dei materiali che costituiscono il patrimonio culturale, accompagnate da valutazioni sulla compatibilità e sul monitoraggio continuo degli interventi. Implementare pratiche avanzate di conservazione, inclusi piani di manutenzione orientati all'adattamento, è indispensabile per garantire la resilienza e la durabilità del patrimonio culturale.

In questo contesto, gli interventi di consolidamento emergono come una strategia preventiva essenziale per proteggere il patrimonio culturale dalle conseguenze dei cambiamenti climatici [9]. Questo approccio contribuisce a preservare l'integrità e il valore dei beni culturali nel tempo, assicurandone la trasmissione alle generazioni future.

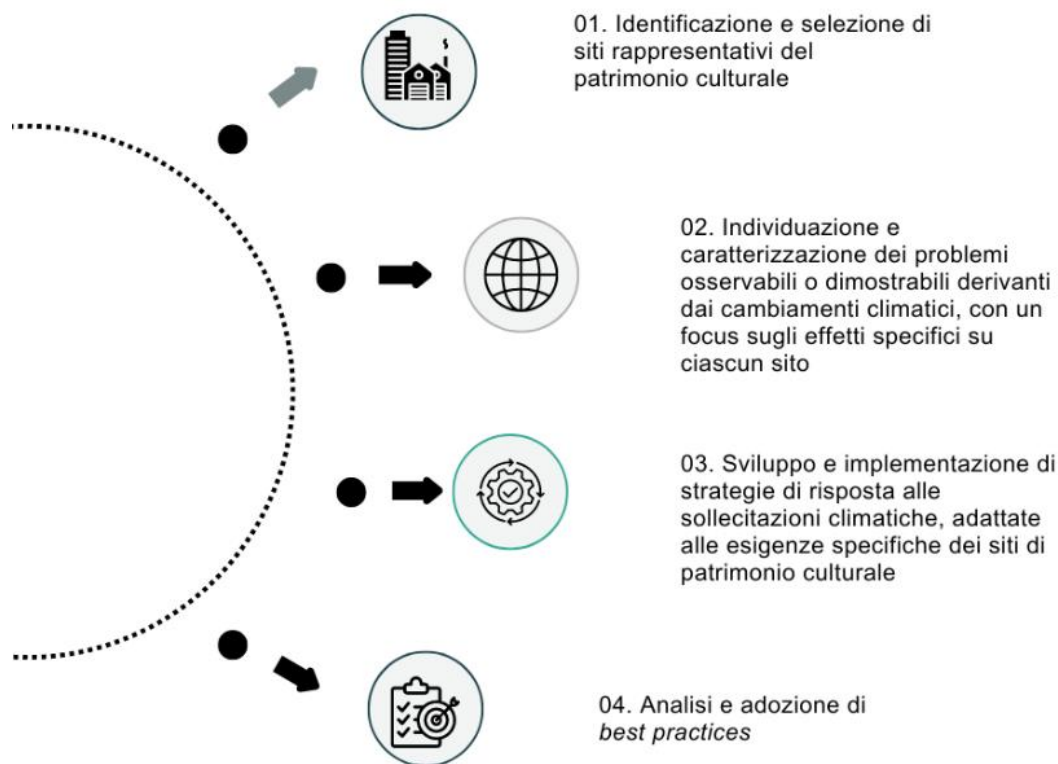


Figura 1: Strategie per la gestione dei cambiamenti climatici e linee guida per la conservazione del patrimonio culturale secondo quanto riportato in World Heritage Reports n°22 - Climate Change and World Heritage.

0.2

Strategie di conservazione dei Sassi di Matera (Basilicata, Italia) e obiettivi specifici della ricerca

La crescente minaccia rappresentata dai cambiamenti climatici e dall'inquinamento atmosferico pone sfide sempre più complesse alla conservazione del patrimonio culturale, in particolare per i materiali lapidei utilizzati in numerosi contesti storici. Tra questi, la calcarenite, ampiamente impiegata per la sua disponibilità e facilità di lavorazione, si rivela particolarmente vulnerabile ai processi di degrado, esacerbati dalla presenza di agenti inquinanti in atmosfera.

Tale vulnerabilità diventa particolarmente critica nel contesto dei *Sassi di Matera* (Basilicata, Italia), sito *UNESCO* dal 1993 [10], dove la calcarenite costituisce il substrato geologico primario del tessuto urbano.

Dopo la cesura del 1952, con la *Legge Speciale per lo sfollamento dei Sassi* e il lungo periodo di abbandono che ne seguì (§ 2.1.2), i *Sassi di Matera* hanno sperimentato un processo di recupero graduale ma mirato, volto a valorizzare il prezioso patrimonio architettonico.

In particolare verso la fine degli anni '90 del Novecento vengono redatti i primi strumenti per la valorizzazione e la gestione delle risorse storico-ambientali della città di Matera: il "*Manuale del Recupero*" (Restucci, 1996) [11] e il "*Codice di Pratica per la Sicurezza e la Conservazione degli Edifici*" (Giuffrè, Carocci, 1997) [12,13]. Nello specifico contesto materano, il Manuale e il Codice di Pratica miravano a integrare l'apparato normativo dei piani biennali di attuazione della *legge 11 novembre 1986, n. 771 per la Conservazione e il recupero dei rioni Sassi di Matera*. La *Legge n. 771* aveva in precedenza delineato gli obiettivi di conservazione e recupero architettonico, urbanistico, ambientale ed economico dei *Sassi di Matera*, nonché la salvaguardia dell'Altopiano Murgico adiacente (§ 2.1.2). La *Normativa Tecnica di attuazione delle Previsioni Generali di Recupero dei Rioni Sassi*, che seguì ad integrazione delle schede tecniche e del repertorio di esempi di cui al Manuale del Recupero al Codice di Pratica di A. Giuffrè e C. Carocci, rappresentò una puntualizzazione esecutiva delle finalità sancite all'art. 1 della *Legge 11 novembre 1986, n. 771*, definendo le modalità e i criteri per gli interventi di restauro.

Gli obiettivi generali esplicitati nella Normativa riguardarono:

- la tutela storico-architettonica ed urbanistico-ambientale del patrimonio immobiliare dei *Rioni Sassi*;
- il perseguimento di interventi di recupero di alta qualità, sia in termini di tutela delle caratteristiche costitutive dei beni, sia in termini di valorizzazione culturale ed economico-funzionale degli stessi
- l'obbligo di garantire l'identificazione, la protezione, la conservazione, la valorizzazione e la trasmissione alle generazioni future dell'intero comprensorio territoriale, in conformità con l'art. 4 della Legge n. 184/77 che ratifica la Carta di Parigi - UNESCO del 1972.
- Nello specifico, l'articolo 16 della suddetta normativa definì interventi di restauro:

- il consolidamento, senza alcuno spostamento, di strutture orizzontali, verticali e di copertura, con parziale sostituzione, ove non sia possibile recuperarli, degli elementi strutturali, nel rispetto della originaria impostazione architettonica e strutturale;
- la conservazione o riproposizione dell'impianto distributivo originario nel rispetto delle caratteristiche architettoniche strutturali e tipologiche;
- la ricostruzione di volumi edificati totalmente degradati alterati o crollati (laddove possibile) in forme scientificamente determinate o in base ai reperti murali superstiti, ricostruendone l'organismo murario originari o anche sotto il profilo strutturale, costruttivo e decorativo.

Tuttavia, alla documentazione più ampia e dettagliata relativa alle operazioni di consolidamento strutturale, si contrappone la scarsità di informazioni disponibili riguardanti i trattamenti e gli interventi di protezione e consolidamento sulle superfici architettoniche materane.

Per quanto concerne il consolidamento coesivo dei materiali lapidei, volto cioè a ripristinare l'integrità microstrutturale di substrati compromessi da processi di degrado, le prime sperimentazioni risalgono al decennio 1970-1980. Paolo Rocchi, nel manuale *"I Sassi di Matera - Tra restauro conservativo e consolidamento"* (1988) [14], documenta l'impiego di trattamenti con prodotti *silossanici oligomerici*, come il *Wacker 290L* e il *Tegosivin HL 100*, utilizzati per proteggere le superfici in calcarenite a vista. Contestualmente, fu introdotto il *Transcote*, un protettivo di natura acrilica, il cui utilizzo, tuttavia, comportava un considerevole investimento economico a causa della scarsa durabilità del materiale.

Nel decennio successivo, l'adozione di formulazioni acriliche per il consolidamento e la protezione delle superfici divenne una pratica consolidata, affiancata dall'impiego continuativo di acqua di calce e silicato d'etile.

L'analisi della letteratura sugli interventi effettuati sul patrimonio costruito di Matera ha messo in luce alcune criticità, tra cui la scarsa documentazione relativa alla sperimentazione sistematica di consolidanti specifici per i materiali lapidei [15–18]. L'assenza di una ricerca continua e di un'evoluzione metodologica coerente rende arduo garantire la coesione e la stabilità dei materiali nel lungo termine. Per affrontare tali problematiche, dunque, è fondamentale adottare un approccio metodologico integrato, che includa un'analisi approfondita dei materiali costitutivi, l'uso di tecniche diagnostiche e analitiche avanzate, oltre alla sperimentazione di soluzioni innovative per il consolidamento.

La ricerca ha affrontato in modo sistematico le criticità legate alla conservazione della calcarenite di Gravina, adottando un approccio scientifico integrato, mirato a garantire la durabilità e l'integrità dei materiali nel contesto storico e ambientale unico di Matera.

Le proiezioni basate sull'equazione di Lipfert [19] (§ 2.1.5.6) hanno indicato un preoccupante incremento dei tassi di erosione di questa pietra. I tassi di recessione calcolati superano sensibilmente il tasso di degradazione tollerabile per materiali a base di carbonato di calcio [20], sottolineando l'urgenza di sviluppare strategie di conservazione efficaci e durature.

Alla luce di tali considerazioni, l'obiettivo specifico della ricerca è stato valutare in modo approfondito l'efficacia, la compatibilità e la durabilità dei trattamenti di consolidamento applicati alla calcarenite di Gravina.

I risultati delle valutazioni preliminari si configurano come guida per la selezione dei trattamenti conservativi più adeguati, oltre a offrire indicazioni utili per prevedere la loro durabilità nel contesto specifico del sito di intervento.

La scelta di focalizzare la sperimentazione sul consolidamento, argomento ampiamente studiato e dibattuto, nasce dalla necessità di approfondire, all'interno di questo macrosettore, il tema più specifico e meno esplorato del consolidamento della calcarenite materana. In particolare, la sperimentazione (§ 2.2.2) ha previsto il confronto di tre consolidanti a base di nanoparticelle (Calosil®, Nanorestore®, Nano Estel®), già utilizzati per il trattamento di substrati carbonatici, con un consolidante tradizionale a base di silicato d'etile, largamente impiegato negli interventi di restauro sul costruito materano [21,22].

La verifica è stata condotta attraverso una campagna multi-analitica presso il *Laboratorio Analisi Materiali Antichi dell'Università IUAV di Venezia*, con particolare attenzione all'uso di tecniche di analisi non distruttive applicabili *in situ*. L'obiettivo era investigare le variazioni di porosità, assorbimento, resistenza meccanica e alterazione cromatica delle superfici trattate, sia prima che dopo l'applicazione dei consolidanti. (§ 2.3).

La scelta di utilizzare nanoparticelle di idrossido di calce è stata motivata dalla compatibilità chimica con i substrati carbonatici, un fattore cruciale per mantenere inalterate le proprietà microstrutturali ed estetiche della pietra originaria. Tuttavia, alla luce dei risultati promettenti emersi dalla letteratura scientifica per le nanoparticelle di silice [23–26], si è deciso di includere tali prodotti nel confronto. In definitiva, la ricerca intende:

- Integrare le previsioni climatiche con strategie di conservazione per garantire una maggiore resilienza del patrimonio culturale agli impatti del cambiamento climatico
- Contribuire a migliorare la comprensione delle prestazioni dei consolidanti a base di *nanocalce* e *nanoparticelle di silice* nel consolidamento della calcarenite materana, definendo una baseline per lo sviluppo di strategie di conservazione proattive e adattive per il sito UNESCO dei 'Sassi di Matera' (Basilicata, Italia). Infine, la ricerca mira a delineare un quadro metodologico applicabile in contesti analoghi, dove la conservazione del patrimonio culturale si confronta con le sfide di un ambiente in rapida evoluzione e di condizioni climatiche sempre più avverse [Fig.2].

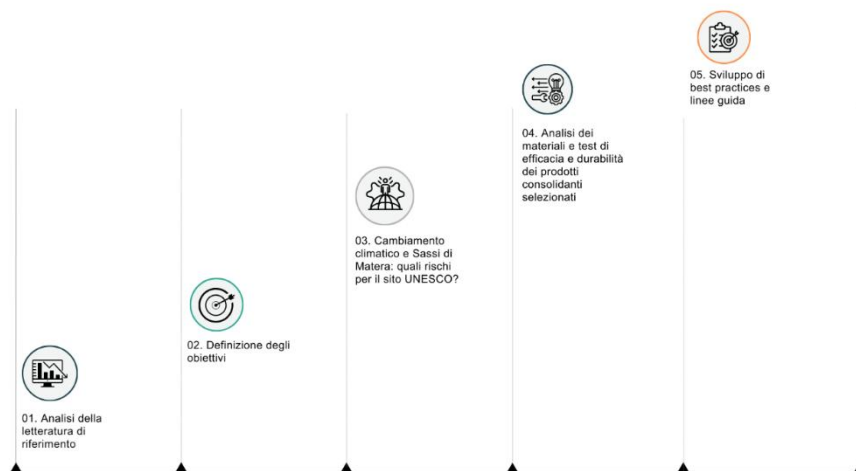


Figura 2: Workflow della ricerca

1. Status Quaestionis

1.1

Introduzione ai processi di degrado di substrati carbonatici

La valutazione della vulnerabilità e dei rischi ai quali il patrimonio architettonico è sottoposto richiede uno studio dettagliato dei materiali utilizzati nelle costruzioni storiche e delle modalità con cui essi subiscono danni. Tale studio, strettamente connesso alla valutazione delle condizioni ambientali, paesaggistiche e dell'impatto antropico, è fondamentale per sviluppare strategie mirate alla conservazione, al controllo e alla prevenzione dei danni, garantendo così la trasmissione alle generazioni future del patrimonio culturale.

Nel corso della storia, il patrimonio storico costruito è stato realizzato impiegando una vasta gamma di materiali lapidei, naturali e artificiali. Ogni materiale, esposto ad un determinato ambiente, tende a raggiungere l'equilibrio con le condizioni circostanti. Tuttavia, variazioni nei parametri ambientali, quali temperatura, umidità o esposizione agli agenti inquinanti, possono destabilizzarne l'equilibrio, richiedendo nuovi adattamenti per raggiungere una nuova condizione di stabilità [27].

Il degrado dei materiali lapidei, influenzato sia da fattori naturali che antropici, è stato oggetto di ampie ricerche negli ultimi decenni. È cruciale sottolineare che le caratteristiche intrinseche dei materiali lapidei, come la composizione mineralogica e chimica, la porosità, la struttura dei pori, e le proprietà fisiche e meccaniche, determinano la capacità di resistere agli agenti esterni. Questi agenti, tra cui fattori ambientali, fisici, chimici e biologici, agiscono in maniera sinergica, accelerando il processo di deterioramento. Le modalità e i tempi di esposizione possono variare significativamente in base alle circostanze specifiche. Un medesimo materiale può reagire in modi differenti a seconda del contesto, aggiungendo un ulteriore livello di complessità all'analisi della sua durabilità nel tempo. In particolare, le rocce carbonatiche sono state da sempre apprezzate per l'ampia disponibilità, le qualità estetiche e la lavorabilità, sebbene la composizione chimica le renda più vulnerabili agli effetti ambientali e maggiormente predisposte al degrado rispetto ad altre tipologie di rocce.

Tra le principali caratteristiche, la porosità e la struttura dei pori, risultato di una combinazione di processi deposizionali e diagenetici, influenzano notevolmente le proprietà fisiche e meccaniche dei materiali da costruzione [28,29]. Il network poroso collega il materiale da costruzione con l'ambiente, permettendo la circolazione dell'acqua e delle specie chimiche in essa disciolte, responsabili di diversi processi di degrado fisico, chimico e biologico [30].

Come evidenziato in letteratura, le rocce carbonatiche presentano una variazione significativa nella porosità e nella distribuzione dei pori.

In letteratura, sono riportate diverse classificazioni basate sulle dimensioni dei pori [31–34]. L'analisi del sistema poroso nelle pietre ornamentali e da costruzione, insieme allo studio della loro composizione e tessitura, è cruciale nel determinare il comportamento dei materiali sotto condizioni di stress e, di conseguenza, per valutarne la durabilità [35].

Tra i fattori esterni, l'acqua, in tutte le sue forme, emerge come il principale agente ambientale, giocando un ruolo cruciale nella maggior parte dei processi che

interessano i substrati carbonatici. In forma liquida, l'acqua può penetrare nei materiali attraverso capillarità dal suolo o per infiltrazione delle acque piovane. La risalita capillare dell'acqua è influenzata dalla tensione superficiale e dal diametro dei pori del materiale. I materiali con porosità caratterizzata da diametri maggiori assorbono l'acqua rapidamente e si asciugano altrettanto velocemente. Al contrario, i materiali con porosità fine assorbono acqua più lentamente, ma possono indurre un maggior risalita capillare all'interno della struttura porosa. In forma di vapore, l'acqua può penetrare nei pori del materiale per diffusione. La quantità di acqua trattenuta dal materiale dipende dalle sue caratteristiche e dall'umidità relativa dell'ambiente. In generale, una maggiore quantità di pori fini è associata a una maggiore ritenzione di umidità, aumentando il rischio di degrado dovuto a fenomeni come il gelo e disgelo o la biocolonizzazione [36]. Durante la fase di congelamento, l'acqua all'interno dei pori subisce un incremento di volume di circa il 9%, generando una pressione interna significativa sulle pareti dei pori. Questa pressione induce la formazione di microfessurazioni all'interno della matrice del materiale, compromettendone progressivamente l'integrità strutturale. La ripetizione ciclica di tali fenomeni, tipica dei climi caratterizzati da frequenti oscillazioni della temperatura intorno al punto di congelamento, accelera il processo di deterioramento, rendendo i materiali sempre più vulnerabili a ulteriori danni [37].

Tra le principali cause di degrado dei substrati porosi si annoverano, inoltre, i sali solubili, i quali compromettono in modo significativo l'integrità strutturale e la durabilità dei materiali lapidei. I sali solubili, quando disciolti in acqua all'interno di una struttura, di per sé, non causano danni fisici diretti, a meno che non siano soggetti a ripetuti cicli di dissoluzione, idratazione e cristallizzazione. Tali cicli possono causare variazioni nel di volume, le quali esercitano pressione contro le pareti dei pori, determinandone il degrado [36,38–41]. Tra i sali maggiormente implicati nei processi di degrado vi sono cloruri, solfati e nitrati. In particolare, il solfato di calcio diidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), il solfato di sodio (Na_2SO_4) e i nitrati di sodio, potassio e ammonio (NaNO_3 , KNO_3 , NH_4NO_3) sono tra i più frequentemente osservati [42].

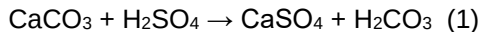
È ormai ampiamente riconosciuto che il degrado dei materiali lapidei è stato notevolmente accelerato dall'aumento della concentrazione di inquinanti atmosferici [43]. L'indagine sull'interazione tra i processi di deterioramento dei manufatti lapidei e l'inquinamento atmosferico rappresenta un campo di ricerca intricato e multi-specialistico che richiede una comprensione dettagliata delle reazioni chimiche coinvolte, al fine di elaborare strategie efficaci per la protezione e la conservazione del patrimonio culturale.

Gli inquinanti interagiscono con i materiali lapidei attraverso meccanismi specifici, inducendo alterazioni sia fisico-chimiche che estetiche, con un effetto particolarmente grave sui substrati carbonatici. Tra gli inquinanti principali si fa menzione di anidride carbonica (CO_2), monossido di carbonio (CO), ossidi di zolfo (SO_x), ammoniaca (NH_3), ozono (O_3) e ossidi di azoto (NO_2).

L'aumento della concentrazione di CO_2 , principalmente attribuibile all'uso intensivo di combustibili fossili, ha provocato un incremento della CO_2 disciolta nell'acqua e un conseguente aumento dell'acidità.

L'ozono, pur non influenzando direttamente gli elementi lapidei, svolge un ruolo cruciale come agente ossidante. Ad esempio, in presenza di acqua, l'ozono contribuisce all'ossidazione dell'anidride solforosa (SO_2) in anidride solforica (SO_3) e in acido solforico (H_2SO_4), inducendo processi di solfatazione che danneggiano le superfici dei materiali lapidei, causandone il successivo dilavamento e la perdita del materiale superficiale.

Il processo di solfatazione nei materiali lapidei coinvolge la reazione tra l'acido solforico e il carbonato di calcio secondo le reazioni:



La precipitazione del solfato di calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, gesso), più solubile del carbonato di calcio, può, inoltre, intrappolare particelle inquinanti come fuliggine e polvere, formando una crosta nera sulla superficie. Questo processo accelera la dissoluzione e il degrado del substrato carbonatico, contribuendo così a un deterioramento più rapido dei materiali. Questo effetto può essere esacerbato dalla presenza di altri tipi di inquinanti (ad esempio, NO_x), sali (ad esempio, NaCl) e biodeteriogeni [44].

La biocolonizzazione è un fenomeno di degrado causato dall'azione di organismi viventi e si verifica prevalentemente in ambienti caratterizzati da elevata umidità relativa, temperature elevate, scarsa ventilazione e intensa esposizione alla luce. La gravità del danno dipende principalmente dal tipo di organismi presenti. Il deterioramento causato dai biodeteriogeni può causare degrado fisico o chimico. La proliferazione degli organismi all'interno dei pori e delle fratture della pietra, infatti, può generare tensioni durante la crescita. Questo è particolarmente evidente nel caso di ife fungine, licheni e soprattutto piante con radici, le cui espansioni possono provocare crepe nel supporto. Anche organismi come i funghi, sebbene possano causare danni meno visibili, contribuiscono all'erosione meccanica della superficie e aumentano la suscettibilità del substrato alla colonizzazione da parte di nuovi batteri o funghi. Dal punto di vista chimico, il metabolismo e le secrezioni degli organismi possono contenere sostanze acide o saline, che interagiscono con i minerali costituenti la roccia, alterandone la composizione chimica e contribuendo così al deterioramento.

Infine, altri fattori esterni come la temperatura, il vento e la presenza di animali, giocano un ruolo cruciale nel degrado dei materiali lapidei.

Le fluttuazioni termiche causano espansione e contrazione, provocando la formazione di fessure e crepe, soprattutto nei materiali con bassa porosità e in quelli contenenti sali solubili, rendendoli particolarmente vulnerabili anche ai cicli di gelo-disgelo.

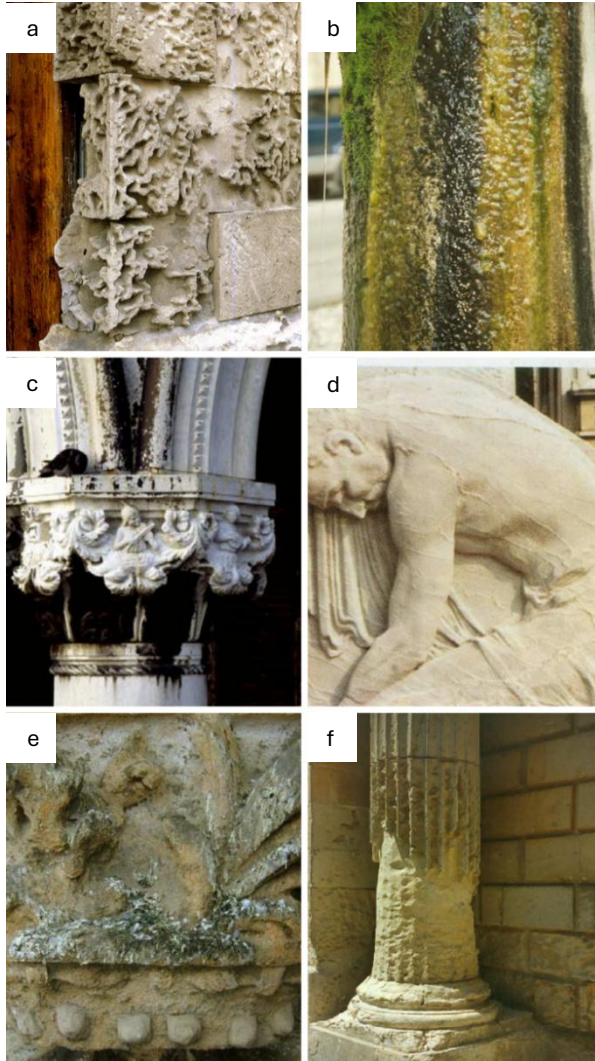
Il vento agisce come agente erosivo, contribuendo al deterioramento attraverso la deposizione di polvere, sali solubili, gas e acqua sulla superficie. Questo fenomeno non solo incrementa l'erosione meccanica, ma può introdurre sostanze che accelerano i processi di degrado [45].

Gli animali, tra cui insetti, uccelli e roditori, possono causare danni fisici diretti ai substrati e, inoltre, la presenza di escrementi può essere particolarmente

corrosiva e contribuire alla formazione di sali solubili, peggiorando ulteriormente lo stato di conservazione dei materiali lapidei.

I processi di degrado dei substrati carbonatici, di cui si sono brevemente sintetizzate le cause, assumono morfologie specifiche che riflettono l'interazione tra i componenti intrinseci della pietra e l'ambiente o i fattori estrinseci. Nonostante forniscono preziose informazioni sui meccanismi di degrado in atto, in situazioni complesse, la sola identificazione dei patterns di degrado potrebbero risultare insufficienti per la valutazione dello stato di conservazione, richiedendo dati complementari per una diagnosi più accurata. Tuttavia, l'analisi dei modelli di degrado è cruciale nelle fasi diagnostiche per descrivere e caratterizzare i meccanismi attivi di degrado e identificarne le cause, nell'ottica di determinare le necessità di conservazione e pianificare le azioni correttive [46].

Strumenti di lavoro come la norma UNI 11182:2006 [Fig.3 a-n], il Glossario ICOMOS (2008) e metodologie di mappatura come quella proposta da Fitzner et al. [47] sono utili al raggiungimento di tali obiettivi.



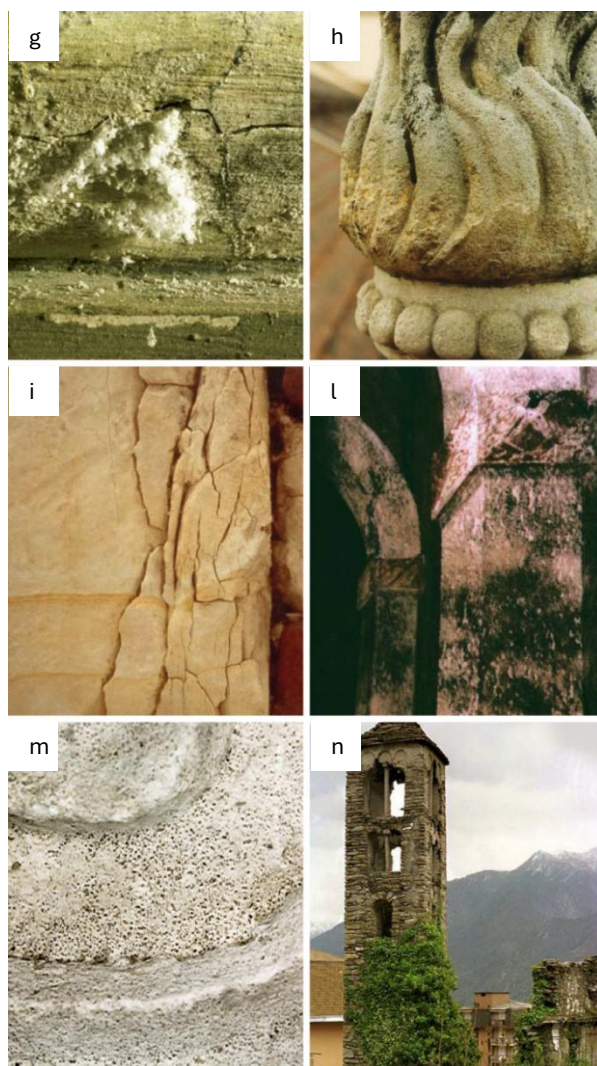


Figura 3: Principali morfologie di alterazione e degrado di substrati carbonatici secondo quanto riportato nella norma UNI 11182:2006. a) alveolizzazione; b) colonizzazione biologica; c) crosta; d) degradazione differenziale; e) deposito superficiale; f) disgregazione; g) efflorescenza; h) erosione; i) fessurazione; l) patina biologica; m) pitting; n) presenza di vegetazione.

1.2

Impatto del Cambiamento Climatico sul Patrimonio Storico Costruito: Tematiche Principali e Approcci alla Conservazione nell'analisi della Letteratura di riferimento

La *Convenzione internazionale per la protezione del patrimonio culturale e naturale mondiale*, sin dal 1972, ha osservato una crescente vulnerabilità del patrimonio culturale e naturale a danni e degrado.

L'attività umana, i cambiamenti climatici e gli eventi climatici estremi costituiscono fonti costanti di pressione sul patrimonio culturale, accentuando le difficoltà e le necessità legate alla sua tutela e mettendone a rischio il valore sociale, culturale, storico e artistico, così come la sicurezza della popolazione e l'equilibrio economico.

Negli ultimi decenni, numerosi studi hanno esaminato gli effetti del cambiamento climatico sui beni del patrimonio culturale, evidenziando come le variazioni climatiche possano compromettere lo stato di conservazione dei manufatti, a causa dell'aggravarsi dei processi di degrado materico.

Un progetto pionieristico in questo campo è stato *Noah's Ark*, finanziato dalla Commissione Europea nel periodo 2004-2007 e coordinato dall'Istituto delle Scienze dell'Atmosfera e del Clima del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-ISAC). Sabbioni et al. (2009) [48] hanno sottolineato l'importanza di affrontare diverse aree chiave per preservare il patrimonio culturale dagli effetti del cambiamento climatico. Tra queste, la comprensione della vulnerabilità dei materiali al clima è essenziale per valutare in modo affidabile l'impatto futuro. Ciò richiede studi dettagliati sulle reazioni dei materiali storici alle diverse condizioni climatiche, oltre al monitoraggio dei cambiamenti su scale temporali per identificare tendenze a lungo termine e valutare gli effetti cumulativi. Inoltre, la modellazione e la proiezione dei cambiamenti climatici con alta risoluzione spaziale e temporale risultano fondamentali per prevedere gli impatti specifici locali sul patrimonio.

Parallelamente, è stata evidenziata dagli autori l'importanza di sviluppare strumenti per gestire il patrimonio culturale in un clima in evoluzione, permettendo interventi tempestivi e mirati e la prevenzione dei danni tramite strategie a lungo termine, incluse misure di conservazione preventive.

Per definire i principali rischi e impatti globali del cambiamento climatico sul patrimonio culturale, Sabbioni et al. (2009) hanno individuato indicatori climatici, fattori di rischio e impatti. Un estratto del lavoro, presentato precedentemente in occasione della 30^a Sessione del Comitato del Patrimonio Mondiale (Vilnius, luglio 2006), è riportato in Tabella 1. La Tabella descrive le principali modalità con cui il cambiamento climatico influisce sulla conservazione delle strutture storiche [48].

Tabella 1: Impatti del cambiamento climatico sul patrimonio costruito. Tabella elaborata a partire dal lavoro di Sabbioni et al. condotto in occasione della 30^a Sessione del Comitato del Patrimonio Mondiale (Vilnius, luglio 2006). Continua alla pagina successiva.

<i>Indicatore climatico</i>	<i>Rischio</i>	<i>Impatti fisici, sociali e culturali sul patrimonio culturale</i>
Cambiamenti nell'umidità atmosferica	Inondazioni (mare, fiume)	Cambiamenti fisici nei materiali da costruzione porosi e nelle finiture dovuti all'umidità crescente
	Piogge intense	Danni causati da sistemi di drenaggio difettosi o inadeguati;
	Cambiamenti nei livelli della falda acquifera	beni storici per la raccolta delle acque piovane non in grado di gestire piogge intense
	Cambiamenti nella chimica del suolo	Cristallizzazione e dissoluzione di sali causate da cicli di bagnatura e asciugatura
	Cambiamenti nelle acque sotterranee	Erosione di materiali inorganici e organici
	Cambiamenti nei cicli di umidità	Instabilità del sottosuolo, sollevamento e cedimenti Cicli di umidità relativa / shock che causano spaccature, crepe e formazione di polvere su materiali e superfici Altri effetti combinati, ad esempio, aumento dell'umidità combinato con l'uso di fertilizzanti e pesticidi
Clima	Eventi diurni, stagionali, estremi (ondate di calore, carico di neve)	Deterioramento delle facciate a causa dello stress termico Danni da gelo-disgelo / ghiaccio
	Cambiamenti nel gelo-disgelo e tempeste di ghiaccio	Danni all'interno di mattoni, pietra, ceramiche Deterioramento biochimico

		Cambiamenti nella <i>idoneità allo scopo</i> di alcune strutture. Ad esempio, il surriscaldamento dell'interno degli edifici può portare a modifiche inappropriate del tessuto storico a causa dell'introduzione di soluzioni ingegneristiche inappropriate per mantenere le strutture in uso
Aumento del livello del mare	Alluvioni costiere Incursione di acqua di mare	Inondazione permanente delle aree a bassa quota
Vento	Pioggia trasportata dal vento Sale trasportati dal vento Sabbia trasportata dal vento Venti, raffiche e cambiamenti nella direzione	Umidità nei materiali porosi Carico statico e dinamico di strutture storiche o archeologiche Danni strutturali e crolli Deterioramento delle superfici a causa dell'erosione
Desertificazione	Siccità Ondate di calore Abbassamento della falda acquifera	Erosione Erosione salina
Azione sinergica di clima e inquinamento	Precipitazioni di pH Cambiamenti nella deposizione degli inquinanti	Recessione della pietra per dissoluzione dei carbonati Annerimento dei materiali Bio-colonizzazione
Effetti climatici e biologici	Proliferazione di specie invasive Diffusione di specie esistenti e nuove di insetti (ad es., termiti) Aumento della crescita di muffe Cambiamenti nelle colonie di licheni sugli edifici	Collasso del legno strutturale e delle finiture in legno Cambiamenti nell'aspetto dei paesaggi Trasformazione delle comunità

In questo contesto, nel corso degli anni sono state effettuate revisioni sistematiche della letteratura sull'argomento al fine di analizzare e descrivere lo stato delle conoscenze e l'impatto globale del cambiamento climatico sul patrimonio culturale e sulle risorse a rischio.

Nel 2017, Fatorić e Seekamp [49] hanno effettuato una revisione sistematica della letteratura sulle ricerche pubblicate fino al 2015 riguardo al cambiamento climatico e al patrimonio culturale. È stato evidenziato che l'interesse accademico per l'argomento è aumentato nel tempo, con una particolare concentrazione di studi in Europa. Gli studi sul tema sono stati condotti in una vasta gamma di discipline, comprese le scienze fisiche, le scienze sociali e umanistiche. Alla luce dei risultati ottenuti, gli autori hanno concluso che la ricerca sull'impatto del cambiamento climatico sul patrimonio culturale dovrebbe includere la documentazione dell'attuazione delle misure di adattamento per il patrimonio, al fine di informare e influenzare le politiche.

Una successiva revisione, condotta da Orr et al. (2021) [50], ha valutato sistematicamente la letteratura sul patrimonio culturale e il cambiamento climatico pubblicata dal 2016 al 2020. Il design di questa revisione mirava specificamente a produrre risultati confrontabili con quelli della revisione condotta da Fatorić e Seekamp (2017) [49]. Orr et al. (2021) [50] concordano con i precedenti studi riguardo alla predominanza della letteratura sul cambiamento climatico e sul patrimonio culturale, principalmente basata su ricerche condotte da studiosi negli Stati Uniti e in Europa. Essi evidenziano che la diversità disciplinare del tema contribuisce alla frammentazione della letteratura, rendendola difficile da reperire e sintetizzare. Tuttavia, in risposta all'appello di Fatorić e Seekamp nel 2017 [49], è stato evidenziato che la ricerca sull'integrazione del patrimonio culturale nelle strategie di adattamento e mitigazione è in aumento. Sebbene Fatorić e Seekamp (2017) [49] e Orr et al. (2021) [50] abbiano eseguito revisioni dettagliate della letteratura, non hanno analizzato in dettaglio gli impatti degli stress climatici, un argomento precedentemente trattato da Daly (2011) [51] ma in relazione ai soli siti archeologici.

Più recentemente, Sesana et al. (2021) [52] hanno esaminato la letteratura sugli impatti del cambiamento climatico sul patrimonio tangibile, concentrandosi sui rischi che inducono cambiamenti nelle proprietà dei materiali. La revisione di Sesana et al. (2021) [52] presenta una sintesi degli studi precedenti sugli impatti dei cambiamenti climatici sul patrimonio culturale in base ai meccanismi di degrado, indicando le variabili climatiche considerate. In conclusione, ri-esamina le interazioni e la complessità di molteplici stress climatici sul patrimonio culturale, gli impatti dei cambiamenti climatici gradualmente sul patrimonio all'aperto e al chiuso, e i rischi derivanti da cambiamenti improvvisi ed eventi estremi nell'ambiente fisico naturale, come mareggiate, inondazioni e frane.

Alla luce delle informazioni emerse e con l'obiettivo di ampliare il periodo temporale considerato nelle revisioni precedenti, è stata condotta una ricerca sistematica della letteratura utilizzando il database *Scopus* per l'analisi citazionale. Seguendo la metodologia proposta da Sesana et al. (2021) [52], la ricerca si è inizialmente focalizzata sulle parole chiave "*climate change*" e

“cultural heritage”. Successivamente, sono stati aggiunti termini come *“impact”* e ulteriori parole chiave correlate ai meccanismi noti di degradazione del patrimonio culturale e agli impatti specifici del cambiamento climatico, come *“freezing and thawing,” “thermoclastism,” “corrosion”* e *“biological degradation.”* La ricerca ha preso in esame articoli pubblicati tra il 2020 e il 2024. La ricerca così condotta ha prodotto 298 risultati, prevalentemente costituiti da articoli scientifici e conference papers. Questo dato indica che l'interesse della comunità scientifica è tuttora in crescita. Tuttavia, si osserva una diminuzione nella pubblicazione dei risultati sul tema nel 2021, probabilmente a causa dell'interruzione delle attività durante l'emergenza COVID-19 nel 2020 [Fig. 4]. La revisione della letteratura condotta esplora in modo approfondito l'impatto dei cambiamenti climatici sui beni culturali. Tra gli studi più recenti e di particolare rilievo emergono i lavori di Coletti (2024) [53], Tringa et al. (2024) [54], Abate et al. (2024) [55], e Giglio et al. (2024) [56].

— Coletti, C. (2024) - *“Climate Change Threats to Stone Cultural Heritage”* [53]

Lo studio di Coletti et al. fornisce una revisione dello stato dell'arte attuale sulle funzioni di danno utilizzate per valutare gli impatti dei cambiamenti climatici sulle superfici del patrimonio in pietra. All'interno di questo quadro, introduce nuovi concetti come (i) la Perdita di Dettagli, in termini di riduzione della leggibilità degli elementi decorativi e, successivamente, (ii) il Valore Culturale Futuro, come la capacità di un patrimonio culturale di trasmettere il suo messaggio culturale nella sua futura apparenza.

— Tringa, E., Kavroudakis, D., Tolika, K. (2024) - *“Microclimate-Monitoring: Examining the Indoor Conditions of Museums”* [54]

Questo studio esamina come i cambiamenti climatici influiscano sulle condizioni interne dei musei, strettamente legate alla conservazione degli artefatti, evidenziando come l'adozione di sistemi di monitoraggio avanzati sia cruciale per mantenere le condizioni ideali e minimizzare gli effetti negativi delle variazioni climatiche sull'integrità degli artefatti.

— Abate, N., Violante, C., Masini, N. (2024) - *“A Semi-Automatic-Based Approach to the Extraction of Data from Coastal and Underwater Archaeological Sites”* [55]

L'articolo esplora i rischi che i siti archeologici costieri e subacquei affrontano a causa del cambiamento climatico, come l'innalzamento del livello del mare e l'erosione costiera. Viene proposto un approccio metodologico integrato utilizzando dati batimetrici a ultra-alta risoluzione (UHR) per aiutare nell'identificazione e interpretazione di contesti archeologici sommersi.

— Giglio, F., Frontera, P., Malara, A., Armocida, F. (2024) – *“Materials and Climate Change: A Set of Indices as the Benchmark for Climate Vulnerability and Risk Assessment for Tangible Cultural Heritage in Europe”* [56]

Giglio et al. (2024) hanno sviluppato un insieme di indici per misurare la vulnerabilità climatica e il rischio per il patrimonio culturale tangibile. Le prime due parti del loro lavoro sistematizzano e interpretano criticamente i dati sui meccanismi di impatto e sugli indici per la valutazione della vulnerabilità climatica

e del rischio; la terza parte, dedicata all'elaborazione dei dati, riporta i risultati ottenuti.

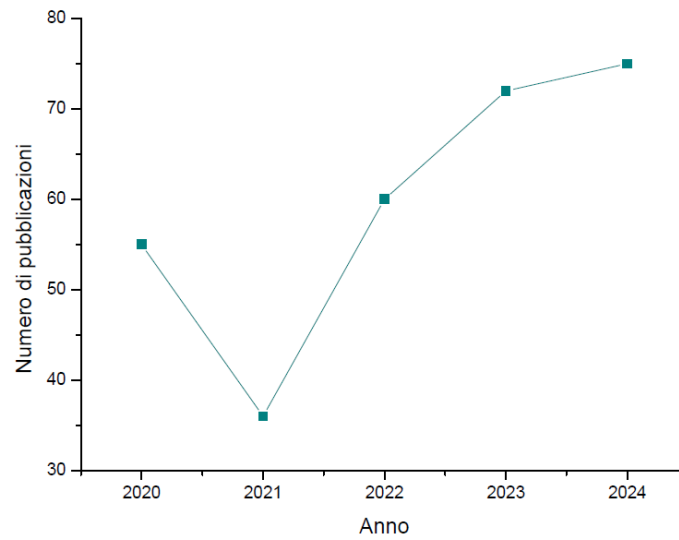


Figura 4: Analisi dei risultati ottenuti dalla ricerca mediante Scopus (TITLE-ABS-KEY ("climate change" AND "cultural heritage" AND "impact" OR "freezing and thawing" OR "thermoclastism" OR "corrosion" OR "biological degradation") AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2025). Numero di risultati prodotti per anno. Aggiornato settembre 2024.

La revisione ha messo in evidenza gli impatti specifici e le implicazioni per la conservazione dei beni culturali trattati negli ultimi anni, con particolare attenzione al degrado dei materiali, all'erosione costiera e all'innalzamento del livello del mare, oltre ai fenomeni meteorologici estremi.

In relazione al degrado dei materiali, i materiali lapidei sono emersi come particolarmente vulnerabile ai processi di cristallizzazione dei Sali a seguito delle fluttuazioni igrometriche. Questo fenomeno può causare la formazione di microfessure e la conseguente disgregazione del materiale litico, con perdita di coesione e il potenziale distacco di porzioni superficiali. Analogamente, le variazioni dell'umidità relativa possono indurre cicli di espansione e contrazione nel legno, portando a deformazioni meccaniche, fessurazioni e un progressivo deterioramento delle proprietà strutturali del materiale lignocellulosico. Per quanto riguarda i metalli, l'esposizione a condizioni di elevata umidità e ad agenti atmosferici aggressivi accelera i processi di ossidazione e corrosione, compromettendo l'integrità strutturale e riducendo la funzionalità operativa degli oggetti metallici.

L'erosione costiera e l'innalzamento del livello del mare rappresentano, inoltre, una minaccia crescente per i siti archeologici e storici situati lungo le coste. L'erosione costiera può portare alla perdita di terreno e di reperti preziosi, mentre l'innalzamento del livello del mare aumenta il rischio di danni strutturali e della distruzione dei beni culturali. Questi fenomeni, strettamente legati al cambiamento climatico, richiedono un'attenzione particolare nella pianificazione e gestione della conservazione dei siti costieri.

Infine, i fenomeni meteorologici estremi, come le inondazioni e le tempeste, sono in grado di causare danni immediati e gravi ai siti e alle strutture storiche. Le inondazioni, in particolare, possono compromettere seriamente l'integrità e la conservazione dei beni culturali, mentre le tempeste, con venti forti e precipitazioni intense, possono danneggiare la struttura fisica dei beni culturali e provocare la perdita di reperti.

Tra gli approcci alla conservazione esaminati nella letteratura dal 2020 al 2024 sono emersi:

— *Monitoraggio e Gestione del Microclima*

L'implementazione di sistemi di monitoraggio del microclima all'interno di musei e siti storici risulta cruciale per mantenere condizioni ambientali stabili e prevenire danni. Gli studi analizzati suggeriscono diverse strategie per mitigare gli effetti negativi del cambiamento climatico sui beni culturali, comprese l'adozione di trattamenti protettivi;

— *Utilizzo di Materiali Protettivi e Trattamenti*

L'applicazione di trattamenti sui materiali vulnerabili è fondamentale per prevenire il degrado accelerato causato dalle variazioni climatiche;

— *Pianificazione e Gestione del Rischio*

Una pianificazione e gestione del rischio adeguata è essenziale per prepararsi agli eventi climatici estremi.

Infine, le prospettive future si concentrano sulla ricerca interdisciplinare, che promuove la collaborazione tra scienziati, conservatori e gestori del patrimonio per sviluppare soluzioni innovative e sostenibili.

L'utilizzo di tecnologie avanzate per il monitoraggio e l'analisi migliora la capacità di risposta alle minacce climatiche, mentre la definizione e l'implementazione di politiche di conservazione mirate rappresentano elementi chiave per garantire la protezione e la sostenibilità a lungo termine dei beni culturali.

1.3

La conservazione del patrimonio costruito nel tempo: cenni teorici e principali tipologie di trattamento

*“Il verbo conservare risponde all’esigenza di preservare, cioè, salvare dal decadimento, dalla rovina e, alla lunga, dalla perdita, le risorse primarie per l’uomo. Questo concetto si identifica con l’impegno di tutelare, rispettare, proteggere, custodire e trasmettere un patrimonio collettivo o personale, di cui si reclama la (pur sempre relativa) permanenza.” (Marco Dezzi Bardeschi, voce Restauro in *Abbecedario minimo. Cento voci per il restauro*, a cura di Chiara Dezzi Bardeschi, Firenze: Altra Linea Edizioni, 2017, p. 37) [57].*

Nel corso dei secoli, la teoria e i metodi riguardanti la conservazione e il restauro sono stati influenzati da numerosi elementi. La teoria ha orientato le azioni pratiche e, al contempo, queste ultime hanno influenzato la teoria stessa, stabilendo un’interazione dinamica per la salvaguardia del patrimonio culturale. Approfondire le influenze delle correnti culturali sulla teoria del restauro dei materiali architettonici richiede uno studio specifico, per il quale si rimanda alla bibliografia specializzata.

D'altra parte, è importante ricordare il concetto di *restauro preventivo*, teorizzato da Cesare Brandi, che comprendeva tutte le azioni volte a evitare o ritardare interventi d'urgenza sulle opere d'arte. In questo contesto, Brandi delineava il restauro preventivo come un insieme di pratiche mirate a mantenere l'integrità delle opere, intervenendo prima che i danni si manifestino (*Cesare Brandi, "Restauro", in Enciclopedia Universale dell'Arte, Volume XI, Istituto Collaborazione Culturale, Venezia/Roma, 1963, pp. 322-332*).

Il restauro preventivo, formalizzato nel XX secolo, rappresenta l'evoluzione delle pratiche di conservazione. Con il crescente riconoscimento dei rischi ambientali e il progresso delle tecniche di conservazione, si è passati da interventi reattivi a strategie proattive e preventive. Questo approccio è stato sostenuto dalle scoperte scientifiche e dalle tecnologie avanzate, le quali tuttora permettono una gestione più efficace dei beni culturali.

Negli anni Novanta, le principali istituzioni internazionali dedicate alla conservazione del patrimonio culturale si concentrarono attivamente nello studio, nella definizione e nell'attuazione di strategie preventive. Il documento *"Resolution adopted by the ICOM-CC membership at the 15th Triennial Conference, New Delhi, 2008"* definisce chiaramente i principi e le pratiche della conservazione nel contesto del patrimonio culturale tangibile [58]. La conservazione viene così descritta come l'insieme di tutte le misure e azioni volte a proteggere tale patrimonio, articolandosi in tre principali categorie: conservazione preventiva, conservazione curativa e restauro.

Dal punto di vista terminologico, il concetto di *conservazione preventiva* è integrato nella definizione di prevenzione fornita dal *Codice dei Beni Culturali italiano. Secondo il Decreto Legislativo 42/2004, articolo 29*, la conservazione è un processo coordinato e programmato che comprende lo studio, la prevenzione, la manutenzione e il restauro del patrimonio culturale [59].

Non si tratta, dunque, solo di interventi singoli, ma di una visione sistemica e dinamica della conservazione, che inizia con una conoscenza approfondita del bene e si estende alla gestione delle sue future trasformazioni.

In questa prospettiva, il primo passo nell'attività di conservazione è necessariamente diagnostico. I dati raccolti in questa fase consentono di progettare l'intervento più appropriato e di effettuare i controlli preventivi necessari per valutare gli effetti positivi e le eventuali controindicazioni.

Grazie alle ricerche effettuate sul campo, si è assistito nel tempo a un uso sempre più diffuso di tecniche d'indagine non distruttive o che risultano poco invasive per il manufatto.

Negli ultimi decenni, i progressi nelle tecnologie e nei materiali innovativi hanno reso cruciale l'istituzione di normative scientifiche che stabiliscano criteri di intervento, assicurando elevati standard di controllo e certificazione. Le *Raccomandazioni NORMAL*, sviluppate negli anni '80 dal *Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)* e dall'*Istituto Centrale per il Restauro di Roma*, hanno rappresentato un passo fondamentale in questo processo. Queste direttive dettagliano tutti gli aspetti conservativi dei manufatti storico-artistici, dalla classificazione dei danni alle metodologie standard per valutare l'efficacia di trattamenti come consolidanti e protettivi. L'obiettivo ultimo è garantire un approccio uniforme e replicabile, basato su prove sperimentali accurate e standardizzate.

Ad oggi, i principali trattamenti conservativi per i materiali lapidei includono interventi di pre-consolidamento, pulitura, protezione, incollaggi-stuccature e consolidamento. Per una trattazione dettagliata e conforme agli standard accettati, si rimanda alla raccomandazione *NORMAL 20/85* [60], documento tecnico che si propone di standardizzare le tecniche di analisi dei materiali lapidei, assicurando risultati comparabili e affidabili, oltre a fornire le definizioni dei principali trattamenti conservativi, menzionati brevemente nei paragrafi seguenti.

1.3.1 Pre- consolidamento

Il preconsolidamento è un intervento finalizzato a conferire stabilità temporanea a superfici decoese che necessitano di ulteriori interventi e trattamenti, in particolare di pulitura, i quali potrebbero risultare incompatibili con la fragilità della superficie stessa, causando perdite o distacchi irreversibili di materiale. Il carattere parziale del preconsolidamento è legato alla necessità di non rendere solidali alla superficie gli strati di sporco e non ostacolare le successive fasi dell'intervento, evitando l'uso di prodotti idrorepellenti che impedirebbero sia la pulitura con solventi ad acqua sia l'uso di adesivi nella fase di consolidamento. Un'applicazione efficace dei prodotti preconsolidanti deve intaccare il meno possibile la superficie architettonica, penetrando all'interno del materiale attraverso le discontinuità fornite dall'azione del tempo, quali superfici di frattura e distacchi.

1.3.2 Pulitura

La pulitura ha l'obiettivo di rimuovere i prodotti di alterazione e i depositi presenti sulla superficie del materiale lapideo, che potrebbero compromettere la sua conservazione a lungo termine. Viene quindi eseguita quando l'aspetto estetico di un monumento è compromesso. Questa operazione è particolarmente delicata poiché comporta la rimozione di materiale superficiale e, se eseguita senza la necessaria consapevolezza, può aumentare la vulnerabilità della pietra agli agenti inquinanti [61].

Il metodo di pulitura deve essere selezionato in base alla natura delle sostanze da asportare, alle caratteristiche del substrato lapideo e all'estensione della superficie da trattare. Senza entrare nei dettagli delle diverse tecniche di pulitura, per i quali si rimanda alla letteratura specializzata, affinché un sistema di pulitura applicato ai manufatti di interesse storico-artistico sia considerato accettabile, è fondamentale che l'azione pulente sia sufficientemente graduale da consentire un controllo preciso degli effetti estetici, che non generi sottoprodotti dannosi e che presenti una reattività minima nei confronti del substrato lapideo.

L'efficacia del metodo prescelto può essere valutata attraverso prove preliminari specifiche, mentre la sua potenziale pericolosità deve essere determinata per ogni tipo di materiale lapideo tramite test di laboratorio, che considerino la composizione chimica dei prodotti utilizzati, nonché le modalità e i tempi di applicazione.

1.3.3 Protezione

I trattamenti di protezione superficiale per materiali lapidei sono praticati sin dall'antichità. Con la consapevolezza del ruolo cruciale dell'acqua nei processi di degrado, venivano applicate sulle superfici lapidee sostanze idrorepellenti, come cere e oli, per ridurre l'effetto dannoso dell'acqua. Anche oggi, la protezione superficiale è principalmente finalizzata a limitare la penetrazione dell'acqua all'interno della struttura porosa, riducendo così l'insorgere di fenomeni alterativi quali il trasporto e la cristallizzazione dei sali, nonché i cicli di gelo e disgelo all'interno del manufatto. Inoltre, la protezione mira a prevenire l'interazione chimica tra i costituenti del materiale lapideo e sostanze nocive, come gli inquinanti atmosferici.

La scelta del tipo di protezione da adottare dipende dalla natura chimica del materiale lapideo e dalle condizioni ambientali circostanti. È fondamentale che il film protettivo non alteri gli equilibri chimico-fisici che regolano i processi superficiali dei materiali porosi, evitando la formazione di una barriera occludente che potrebbe compromettere la traspirabilità del materiale.

In sintesi, un buon protettivo superficiale deve possedere le seguenti caratteristiche: non alterare l'aspetto estetico del materiale (ad esempio, evitare alterazioni cromatiche o la formazione di un effetto lucido), mantenere una buona permeabilità al vapore acqueo, offrire una bassa permeabilità all'acqua liquida, resistere alla fotodegradazione e non generare sottoprodotti dannosi, anche a lungo termine dopo l'applicazione.

1.3.4 Incollaggi-stuccature

Gli interventi di incollaggio e stuccatura hanno l'obiettivo di colmare le discontinuità macroscopiche presenti nel materiale lapideo e di riconsolidare frammenti parzialmente o completamente distaccati. Questi processi mirano a ripristinare una superficie omogenea e meno permeabile all'acqua, agli agenti chimici e alle particelle atmosferiche, prevenendo così la perdita di parti o frammenti del materiale scolpito.

L'incollaggio di parti completamente distaccate richiede l'impiego di adesivi e, ove necessario, l'uso di perni di rinforzo. Gli adesivi devono soddisfare una serie di requisiti tecnici essenziali per garantire un fissaggio efficace e duraturo. Tra questi, è fondamentale che l'adesivo presenti un'elevata adesività per assicurare una solida adesione al substrato, durabilità per resistere nel tempo senza degradarsi, basso ritiro per evitare deformazioni post-incollaggio, oltre a un'adeguata elasticità e rigidità che siano compatibili con le specifiche esigenze del materiale trattato. Inoltre, le proprietà meccaniche dell'adesivo devono essere quanto più possibile simili a quelle del materiale originale per garantire un comportamento omogeneo sotto sollecitazione.

I perni, utilizzati come supporto strutturale, devono avere una stabilità chimica elevata e un coefficiente di dilatazione termica lineare il più possibile simile a quello del materiale lapideo per evitare stress meccanici differenziali. La scelta del tipo e della forma dei perni deve essere attentamente progettata per assicurare una solida adesione, senza compromettere la possibilità di una futura rimozione, se necessaria. Le stuccature vengono utilizzate per riempire fessure, fratture e altre discontinuità presenti sulla superficie del materiale dopo l'inserimento dei perni. È cruciale che questo intervento non si limiti esclusivamente alle lacune più grandi, ma consideri anche le fessure di dimensioni minori, poiché queste possono costituire vie preferenziali per l'ingresso dell'acqua e altri agenti di degrado. La selezione della malta di stuccatura deve tenere conto della compatibilità con il materiale lapideo, in particolare in termini di porosità, capacità di assorbire acqua, resistenza meccanica, stabilità alla luce, coefficiente di dilatazione termica e proprietà ottiche. Inoltre, è imperativo che i componenti della malta non rilascino sostanze nocive, come sali solubili, che potrebbero compromettere l'integrità del materiale lapideo.

1.3.5 Consolidamento

Il trattamento di consolidamento ha come obiettivo primario il miglioramento delle caratteristiche di coesione e adesione tra i componenti del materiale lapideo, intervenendo direttamente sulla sua porosità.

Come riportato da Marisa Laurenzi Tabasso [62], nella letteratura scientifica della fine del XIX secolo, i prodotti utilizzati per questi scopi erano comunemente denominati *indurenti*. Questi prodotti avevano l'obiettivo principale di incrementare la durabilità della pietra. Solo a partire dagli anni '20 del XX secolo, il termine *consolidamento* iniziò a essere utilizzato con maggiore precisione. Nel

1926, A.R. Warnes, nel suo libro *"Building Stones, Their Properties, Decay and Preservation"*, pubblicato a Londra, differenziò chiaramente il trattamento di consolidamento da quello volto a rendere le superfici idrorepellenti.

Verso la fine degli anni '60, si osservò un significativo cambiamento nell'approccio alla conservazione della pietra, determinato dall'aumento degli inquinanti atmosferici, in particolare quelli derivanti dalla combustione di oli minerali e benzine nei veicoli. Nei contesti urbani, i monumenti mostravano superfici fortemente annerite e compromesse da croste nere instabili, che si staccavano spontaneamente, evidenziando una perdita di coesione nel materiale sottostante. In risposta a questa emergenza, furono avviate campagne di monitoraggio specifico per esplorare la correlazione tra il degrado dei materiali, specialmente quelli carbonatici, e la presenza di inquinanti atmosferici come il biossido di zolfo e le particelle sospese.

Nel decennio successivo (1970-1980), la sperimentazione di varie tecniche di consolidamento contribuì significativamente alla comprensione dei meccanismi d'azione delle diverse categorie di prodotti consolidanti. Da questi studi, emersero criteri fondamentali per la definizione dei requisiti prestazionali dei prodotti utilizzati nel consolidamento di manufatti di rilevanza artistica e storica. Tali requisiti includono: efficacia consolidante, profondità di penetrazione, compatibilità chimico-fisica con il materiale lapideo, impatto sulla permeabilità e sul trasferimento dell'umidità, influenza sull'aspetto estetico e durabilità nel tempo.

Nonostante i progressi tecnologici, la valutazione di questi aspetti rimane complessa. Anche in tempi relativamente recenti, la scarsa attenzione dedicata alla selezione dei materiali impiegati nel restauro dei monumenti in pietra ha portato spesso a lacune significative nella documentazione.

Trovare prodotti che soddisfino tutti i requisiti a un livello accettabile rappresenta una sfida complessa. Nella letteratura scientifica degli ultimi trent'anni, sono documentate numerose ricerche e sperimentazioni incentrate sullo sviluppo di nuove tecniche di esecuzione e sulla ricerca di materiali sempre più avanzati. Tuttavia, è fondamentale sottolineare che non esiste un metodo o un prodotto universalmente efficace per tutti i tipi di materiali lapidei, a causa delle diverse caratteristiche mineralogiche e petrografiche dei materiali stessi.

Nel campo della conservazione dei materiali lapidei, si utilizzano diverse tipologie di trattamenti e prodotti, la cui efficacia dipende da una serie di fattori complessi e interrelati.

I criteri che un prodotto consolidante deve soddisfare riguardano [63]:

— *Compatibilità con il substrato*

Con il termine compatibilità si indicano «[...] le cose che possono stare insieme, che possono coesistere, che possono accordare a qualcos'altro. Nel caso specifico dell'architettura, la parola c. non si limita a descrivere semplicemente un'attitudine ma esprime un giudizio di valore sia sulla "qualità di relazione" che gli interventi stabiliscono con l'architettura, sia sulle caratteristiche intrinseche [...] degli interventi. [...]» [57].

Per garantire un intervento di consolidamento efficace e duraturo, è fondamentale che il consolidante utilizzato sia pienamente compatibile con il substrato sia dal punto di vista chimico che fisico. Chimicamente, il consolidante deve interagire con il substrato formando legami stabili senza alterare la struttura cristallina del materiale. Questo è cruciale per preservare l'integrità mineralogica del substrato e assicurare che le nuove formazioni si integrino in modo omogeneo con il materiale preesistente, mantenendo inalterate le sue proprietà chimiche essenziali [43].

Dal punto di vista fisico, il consolidante deve conferire al substrato trattato proprietà fisico-meccaniche che siano compatibili con quelle del materiale originale non trattato.

In particolare, la resistenza meccanica, la porosità e il coefficiente di dilatazione termica del materiale consolidato devono essere congruenti con quelli del substrato originario. Questa compatibilità fisica è fondamentale per prevenire la formazione di tensioni interne che potrebbero causare fenomeni di degrado nel tempo [64].

— *Efficacia del trattamento*

Per valutare l'efficacia di un trattamento di consolidamento, è fondamentale considerare diversi parametri chiave, tra cui la profondità di penetrazione, l'aumento della resistenza meccanica, la modifica della porosità e la riduzione della capacità di assorbimento d'acqua capillare. Questi parametri possono essere analizzati mediante tecniche specifiche e confronti dettagliati tra campioni di materiale trattato e non trattato.

— *Profondità di penetrazione*

La profondità di penetrazione è un parametro critico per determinare l'efficacia di un consolidante, poiché indica la capacità del prodotto di integrarsi nel materiale originale. Un consolidante efficace deve penetrare uniformemente nelle aree deteriorate o non trattate, rafforzando la struttura complessiva del substrato. La penetrazione del prodotto è influenzata da fattori quali le caratteristiche microstrutturali del substrato (come la porosità aperta e la distribuzione delle dimensioni dei pori), le proprietà del consolidante (concentrazione, tensione superficiale, viscosità) e le condizioni ambientali durante l'applicazione [65,66]. La profondità di penetrazione del consolidante può essere studiata utilizzando strumenti avanzati come il Drilling Resistance Measurement System (DRMS) e la Microscopia Elettronica a Scansione (SEM).

— *Aumento della resistenza meccanica*

Il consolidamento deve mirare a ripristinare o aumentare la resistenza meccanica del substrato trattato. È cruciale che il consolidante migliori la resistenza meccanica del materiale in modo omogeneo. Questa resistenza può essere quantificata mediante test standardizzati, come la resistenza alla flessione (UNI-EN 12390-5:2009) [67], la velocità di propagazione degli ultrasuoni (EN 14579:2005) [68] o la durezza superficiale (Scotch Tape Test, ASTM D3359-02)[69].

— *Modifica della struttura dei pori*

La struttura dei pori del substrato è strettamente correlata alla sua resistenza meccanica, alla resistenza alla cristallizzazione dei sali e ai cicli di gelo-disgelo,

nonché alla capacità di assorbire e far circolare l'acqua. Un trattamento di consolidamento efficace dovrebbe ridurre la porosità sulla superficie trattata, aumentando al contempo la resistenza meccanica, senza introdurre bruschi cambiamenti tra l'area trattata e l'area non trattata. Tali discontinuità nella porosità possono, infatti, portare a distacchi dovuti a fenomeni come la cristallizzazione dei sali o il degrado indotto dai cicli di gelo-disgelo. Inoltre, il trattamento non dovrebbe aumentare significativamente il numero di micro-pori, poiché ciò potrebbe aumentare la ritenzione all'interno del substrato, aumentando il rischio di crescita biologica e di reazioni dannose con inquinanti atmosferici [36].

La misurazione della porosità può essere effettuata mediante Porosimetria ad Intrusione di Mercurio (MIP), che fornisce una distribuzione dettagliata della dimensione dei pori e il volume totale di porosità.

— *Riduzione della capacità di assorbimento d'acqua*

Poiché l'acqua è coinvolta nella maggior parte dei processi di degrado dei materiali lapidei, è essenziale valutare come il trattamento di consolidamento influisca sulla circolazione dell'acqua all'interno del substrato. Il trattamento deve ridurre i pori. Tuttavia, il substrato deve rimanere permeabile al vapore acqueo per prevenire la condensazione dell'acqua e l'accumulo di sostanze dannose, come sali solubili, all'interno della struttura, che potrebbero portare a fenomeni di dissoluzione, crescita biologica, crepe e altri tipi di degrado.

L'assorbimento di acqua possono essere valutati attraverso curve di assorbimento capillare e il coefficiente di assorbimento dell'acqua (UNI EN 13755:2008) o mediante spugna di contatto (UNI 11432:2011) [70]. La permeabilità al vapore acqueo può essere misurata secondo la norma UNI EN 1015-19:2008 [71].

— *Reversibilità*

«[...] nasce immediatamente nella cultura del restauro inteso nel senso moderno del termine come operazione finalizzata alla permanenza del documento storico e al suo recupero, comunque esso sia stato concepito [...]» [57].

Ogni intervento di restauro dovrebbe idealmente essere reversibile, ovvero potenzialmente rimovibile senza compromettere o sacrificare la materia originale del manufatto. Tuttavia, nella pratica, si è constatato che ben pochi trattamenti conservativi sono completamente reversibili. Questo è particolarmente vero nel caso dei beni realizzati con materiali lapidei naturali, dove la reversibilità si rivela essere più un ideale teorico che una realtà pratica. Anche i trattamenti più solubili e teoricamente rimovibili possono risultare difficili da eliminare completamente dal substrato lapideo. Di conseguenza, il raggiungimento di una reversibilità totale è praticamente impossibile, portando così all'integrazione di questo concetto con il principio di compatibilità. Questo principio assicura che, anche se un intervento non è completamente reversibile, esso deve comunque essere compatibile con il materiale originale, minimizzando qualsiasi rischio di danno a lungo termine.

— *Proprietà estetiche*

I trattamenti di consolidamento dovrebbero migliorare le proprietà fisico-meccaniche del materiale trattato senza alterarne l'aspetto estetico. Tuttavia, un

possibile effetto collaterale di tali trattamenti, come l'uso della *nanocalce*, è la variazione cromatica della superficie trattata. Queste variazioni cromatiche, che possono influire sull'integrità estetica del materiale, rappresentano una sfida significativa nel campo della conservazione. La valutazione delle variazioni cromatiche può essere effettuata utilizzando la spettrofotometria, un metodo analitico standardizzato secondo la norma UNI EN 15886:2010, che consente di quantificare con precisione le differenze di colore pre e post-trattamento, garantendo un controllo rigoroso dell'impatto estetico del consolidamento [72,73].

— *Durabilità*

«[...] capacità di resistere agli effetti del tempo [...]. La durabilità è stata definita come la capacità di conservare le caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali nel tempo, in modo da garantire il mantenimento dei necessari livelli di sicurezza durante l'intera vita dell'opera, con la scelta dei materiali appropriati [...]» [57].

La durabilità di un intervento di consolidamento non dipende esclusivamente dalla stabilità intrinseca dei materiali consolidanti utilizzati, ma anche dalla capacità del materiale trattato di resistere alle sollecitazioni esterne a cui è esposto. L'obiettivo del trattamento consolidante è infatti migliorare la resistenza del materiale agli agenti di degrado, prolungandone la vita utile.

Valutare l'efficacia a lungo termine di un consolidante è cruciale per garantire la sostenibilità dell'intervento. Gli approcci principali per valutare le prestazioni a lungo termine dei consolidanti includono:

- *Test di laboratorio per accelerare il degrado*

Questi test simulano condizioni di degrado accelerato, esponendo i campioni trattati a cicli di radiazione ultravioletta e di umidità. L'obiettivo è valutare la resistenza del materiale consolidato alla degradazione chimica, fotochimica, fisica e biologica nel tempo. Questi test permettono di prevedere come il consolidante si comporterà in condizioni ambientali reali nel lungo periodo.

- *Test di laboratorio incentrati sul comportamento fisico-meccanico*

Questi test misurano la resistenza del materiale trattato a specifiche sollecitazioni fisiche. Tra i più rilevanti vi sono la resistenza alla cristallizzazione dei sali, valutata secondo la norma UNI EN 12370:2020 [74], e la resistenza ai cicli di gelo-disgelo, misurata secondo la norma UNI EN 14617-5:2012 [75]. Queste prove sono fondamentali per assicurare che il consolidante non solo migliori la resistenza meccanica del materiale, ma lo protegga anche dalle condizioni ambientali avverse che potrebbero comprometterne l'integrità strutturale nel tempo.

1.4

Introduzione ai prodotti consolidanti per il trattamento di materiali lapidei

Nel corso dell'ultimo secolo, una vasta gamma di prodotti consolidanti è stata ampiamente utilizzata a scopo conservativo per il trattamento dei materiali lapidei. Questi prodotti possono essere classificati, in base alla loro composizione chimica, in tre principali categorie: prodotti inorganici, prodotti organici e prodotti intermedi a base di silicio [63]. Ogni categoria presenta caratteristiche specifiche che influenzano la loro applicabilità ed efficacia nella conservazione del patrimonio lapideo, di cui si riportano alcuni cenni.

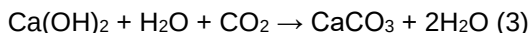
Per una trattazione approfondita, si rimanda alla letteratura specializzata.

1.4.1 Consolidanti inorganici

I consolidanti inorganici sono caratterizzati da un'elevata affinità con i materiali lapidei, in particolare per quanto riguarda le caratteristiche strutturali e proprietà fisico-meccaniche. Un tratto distintivo di tali consolidanti è la capacità di generare precipitati insolubili all'interno della matrice porosa del substrato trattato. In seguito all'applicazione, il consolidante penetra nei pori e nei capillari del materiale sotto forma di soluzione o sospensione, per poi precipitare come nuovo composto solido, contribuendo al rafforzamento della struttura.

Tuttavia, l'utilizzo di consolidanti inorganici presenta alcune limitazioni. Tra queste, si annoverano una ridotta resistenza agli stress meccanici, un'efficacia limitata in presenza di decoesioni estese e una capacità di penetrazione spesso insufficiente per trattamenti profondi. Inoltre, la precipitazione troppo rapida del consolidante può portare all'ostruzione dei pori superficiali, impedendo una penetrazione più profonda e riducendo così l'efficacia del trattamento.

L'idrossido di calcio è uno dei consolidanti inorganici maggiormente compatibili con le pietre carbonatiche. Quando applicato sotto forma di acqua di calce, latte di calce o grassello di calce, l'idrossido di calcio reagisce con l'acqua e l'anidride carbonica, formando precipitati di carbonato di calcio all'interno delle porosità del materiale lapideo, secondo la reazione:



L'efficacia dell'acqua di calce è stata ampiamente discussa in letteratura. Il principale vantaggio di questo trattamento risiede nella sua elevata compatibilità con il substrato, poiché il consolidamento avviene attraverso la formazione di carbonato di calcio nei pori del materiale, in seguito alla reazione dell'idrossido di calcio con l'anidride carbonica atmosferica (CO_2). Tuttavia, uno dei limiti più significativi di questa tecnica è una limitata penetrazione del consolidante nel substrato lapideo [76].

Price et al., negli anni '80, [77] conclusero che, utilizzando acqua di calce, la maggior parte delle particelle si deposita entro 2 mm dalla superficie, rendendo il consolidamento inefficace in molti casi. Questo ha portato molti conservatori a essere scettici riguardo all'uso di questa tecnica. Tuttavia, Brajer e Kalsbeek

(1999) [78] dimostrarono che un'applicazione prolungata e continua può produrre un effetto consolidante significativo.

Studi successivi hanno introdotto nuove prospettive pratiche, come l'uso di impacchi di calce e l'aumento del numero di applicazioni di acqua di calce, che hanno portato a risultati più soddisfacenti [79].

Nonostante i potenziali benefici, l'applicazione dell'acqua di calce può comportare effetti indesiderati. Tra questi, lo sbiancamento della superficie trattata, dovuto alla scarsa penetrazione delle particelle nei pori e l'uso di grandi quantità di acqua, che può aumentare il rischio di mobilitazione dei sali, colonizzazione biologica o danni da gelo-disgelo.

Accanto ai prodotti a base di idrossido di calcio, nel corso degli anni sono state sperimentate soluzioni a base di idrossido di bario ($\text{Ba}(\text{OH})_2$), noto anche come metodo Ferroni-Dini. Questo consolidante inorganico è stato ampiamente utilizzato nella conservazione di dipinti murali contaminati da solfati. Il metodo Ferroni-Dini si articola in due fasi principali. Inizialmente, il carbonato d'ammonio viene impiegato per trasformare il gesso in solfato d'ammonio, un sale solubile che viene poi assorbito e rimosso dalla superficie mediante impacchi. Successivamente, l'idrossido di bario converte il solfato d'ammonio in solfato di bario, un composto insolubile, prevenendo così i danni associati alla cristallizzazione salina [80].

Oltre a questa funzione, l'idrossido di bario reagisce anche con il carbonato di calcio presente nel substrato, formando carbonato di bario e ulteriore carbonato di calcio. Questo processo non solo consolida la superficie calcarea, ma mitiga i danni provocati dai sali di solfato [43,79].

1.4.2 Consolidanti organici

I consolidanti di natura organica sono costituiti principalmente da polimeri di sintesi allo stato di soluzione o di dispersione. A differenza dei consolidanti inorganici, che offrono un'ottima compatibilità con i materiali lapidei, i polimeri sintetici si distinguono per la loro maggiore elasticità, che consente di superare i problemi legati ai differenti coefficienti di espansione termica tra il materiale originale e il consolidante. Questi prodotti generano all'interno delle porosità del substrato film coerenti e continui o reticoli tridimensionali, consolidando e migliorando le proprietà meccaniche del materiale.

I consolidanti organici offrono buone caratteristiche di adesività, resistenza meccanica e spesso idrorepellenza, combinando così un'azione consolidante con una funzione protettiva. Uno dei vantaggi è la solubilità in solventi organici specifici anche dopo la formazione del film, il che li rende, in teoria, reversibili e conformi al principio di reversibilità.

Tuttavia, presentano anche alcune criticità, come l'incompatibilità chimico-fisica con i substrati lapidei e il degrado della struttura polimerica a causa dell'invecchiamento, dell'aggressione ambientale e, soprattutto, delle radiazioni solari. Quest'ultimo fenomeno porta a reazioni foto-ossidative nelle molecole polimeriche, con conseguente ingiallimento, diminuzione del potere adesivo e infragilimento del sistema [81].

Tra i consolidanti organici, i polimeri acrilici e metacrilici sono tra i più utilizzati. Si tratta di polimeri termoplastici con una struttura prevalentemente amorfa, noti per la loro capacità di formare film compatti attraverso l'evaporazione del solvente.

I polimeri vinilici, prodotti in emulsione acquosa, tendono a presentare proprietà inferiori rispetto alle emulsioni acriliche, soprattutto in termini di potere legante e resistenza, ma offrono un'opzione più economica. Tuttavia, i polimeri vinilici, una volta degradati nel tempo, possono ingiallire rapidamente e rilasciare acido acetico, che può reagire negativamente con il materiale trattato.

Un'altra classe di polimeri organici utilizzata nei consolidanti è costituita dai polimeri fluorurati, i fluoroelastomeri e le resine acriliche fluorurate. Questi polimeri sono noti per l'elevata stabilità chimica, la buona stabilità alla luce e la marcata idrorepellenza. Tuttavia, presentano un basso potere penetrante.

Infine, le resine epossidiche, una classe di sostanze plastiche termoindurenti, sono più comunemente utilizzate come adesivi strutturali o leganti per malte di riempimento di cavità piuttosto che come consolidanti, a causa delle loro proprietà meccaniche e adesive superiori. Questi materiali, sebbene molto efficaci in contesti specifici, devono essere scelti con attenzione per evitare effetti negativi a lungo termine sul materiale lapideo trattato [27].

1.4.3 Consolidanti a base di silicio

I composti a base di silicio costituiscono la classe più ampia di prodotti utilizzati nel consolidamento dei materiali lapidei, comprendendo sia composti inorganici che organici, nonché formulazioni con caratteristiche intermedie.

Questi prodotti sfruttano la capacità dei silicati di formare silice idrata all'interno delle porosità del substrato lapideo, in presenza di acqua. Il meccanismo di reazione che guida questo processo è tipicamente di tipo *sol-gel*. Il processo *sol-gel* prevede l'uso di una soluzione colloidale di silice come precursore per la successiva formazione di un gel, mediante reazioni di idrolisi e condensazione [82]. Questo meccanismo migliora l'adesione e la coesione all'interno delle porosità del materiale, ottimizzando la stabilità e la resistenza del consolidante.

Tra i consolidanti inorganici basati su silicio, i silicati alcalini, come il silicato di sodio (Na_2SiO_3), di potassio (K_2SiO_3) e di magnesio (Mg_2SiO_3), sono i più utilizzati, insieme ai fluosilicati, che sono sali derivati dall'acido idrofluosilicico (H_2SiF_6), e agli alchil-alcossi-silani e alchil-aril polisilossani [82].

Gli alcossisilani, tra i quali il tetraetossisilano o silicato di etile (TEOS) è il più diffuso, sono particolarmente efficaci nel consolidamento dei materiali lapidei naturali o artificiali.

Marisa Laurenzi Tabasso [62] ricorda che nel 1861 il *Royal Institute of British Architects* discusse i risultati delle prove condotte su vari prodotti utilizzati per il trattamento del paramento lapideo delle nuove *Houses of Parliament* di Londra. In quell'occasione, il Prof. August W. Hoffman, un rinomato chimico, presentò i risultati positivi ottenuti con i silicati alcalini e introdusse una sostanza promettente chiamata *etere silicico*, oggi conosciuta come silicato di etile. Hoffman, sorpreso dal fatto che questa sostanza non fosse stata ancora utilizzata nel trattamento della pietra, ne riconobbe il potenziale, sebbene ci sia voluto più

di un secolo affinché il silicato di etile diventasse uno dei consolidanti più ampiamente utilizzati nel restauro dei monumenti.

Dalla fine del XIX secolo, il silicato di etile è stato proposto come consolidante principale per i materiali lapidei, grazie alla sua capacità di penetrare profondamente nelle porosità del materiale, superando i limiti dei consolidanti inorganici come l'idrossido di calcio.

Il TEOS, attraverso il processo *sol-gel*, idrolizza e condensa in presenza di acqua, formando una rete tridimensionale di silice che consolida il materiale.

Il silicato di etile presenta numerosi vantaggi, tra cui l'assenza di sottoprodotti dannosi durante la reazione di condensazione, poiché i prodotti volatili come l'alcol etilico e l'acqua si eliminano facilmente senza lasciare residui. La sua elevata diffusione è dovuta alla compatibilità chimica con i substrati lapidei, soprattutto quelli di natura silicatica, benché sia utilizzato anche su materiali carbonatici. Inoltre, il TEOS è apprezzato per la sua capacità di penetrazione, facilitata dalla bassa viscosità e dal basso peso molecolare durante la fase *sol*. Successivamente, la polimerizzazione in situ, catalizzata dall'umidità, forma un gel di silice stabile che funge da nuova matrice cementante.

Tuttavia, in applicazioni su substrati calcarei, pur essendo efficace a breve e medio termine, la sua compatibilità limitata con il minerale carbonatico e la scarsa durabilità a lungo termine possono portare al degrado del trattamento [64].

Negli ultimi anni, lo sviluppo della nanotecnologia ha aperto nuove possibilità nel campo della conservazione del patrimonio culturale. Prodotti innovativi offrono prestazioni che possono superare significativamente quelle dei trattamenti tradizionali, presentando una nuova frontiera per il consolidamento e la protezione dei materiali lapidei.

1.4.4 Nanoparticelle di idrossido di calcio

La nanotecnologia è riconosciuta come una delle tecnologie più promettenti del XXI secolo. Essa rappresenta la capacità di tradurre le teorie della nanoscienza in applicazioni pratiche tramite l'osservazione, la misurazione, la manipolazione, l'assemblaggio, il controllo e la produzione di materia su scala nanometrica.

La *National Nanotechnology Initiative (NNI)* degli Stati Uniti definisce la nanotecnologia come "*una scienza, ingegneria e tecnologia operante a scala nanometrica (da 1 a 100 nm), dove fenomeni unici consentono applicazioni innovative in una vasta gamma di discipline, dalla chimica, fisica e biologia, alla medicina, ingegneria ed elettronica*".

Questa definizione implica due condizioni essenziali. La prima riguarda la scala: la nanotecnologia si occupa della manipolazione di strutture, controllandone forma e dimensioni a livello nanometrico. La seconda riguarda l'innovazione tecnologica: la nanotecnologia sfrutta le proprietà uniche dei materiali a livello nanometrico per ottenere nuove funzionalità.

Una delle caratteristiche distintive dei nanomateriali è l'aumento significativo della superficie specifica rispetto allo stesso materiale a scala macroscopica. Questa maggiore superficie specifica comporta un'area di interazione più ampia con l'ambiente circostante, influenzando profondamente le proprietà chimiche e

fisiche del materiale. Le altre proprietà specifiche dei nanomateriali dipendono dalla composizione chimica e possono variare in modo significativo rispetto alle proprietà del materiale in forma massiva.

L'uso dei nanomateriali nei processi di conservazione dei materiali lapidei rappresenta uno dei contributi più significativi della nanotecnologia negli ultimi decenni. Le proprietà che i materiali acquisiscono a scala nanometrica consentono lo sviluppo di trattamenti compatibili con il substrato su cui vengono applicati e adatti alla funzione che devono svolgere. Ad esempio, l'impiego di nanoparticelle metalliche e ossidi metallici, o la combinazione di alcuni di essi nella progettazione di nanocompositi, ha portato alla creazione di nuovi trattamenti consolidanti, idrorepellenti e biocidi. Un esempio concreto è l'uso di nanoparticelle di biossido di titanio per la protezione dei monumenti in pietra contro la degradazione causata da agenti inquinanti [83].

Negli ultimi 20 anni, l'interesse per progettare e valutare l'efficacia dei trattamenti basati su nanoparticelle per la conservazione dei materiali lapidei è cresciuto notevolmente. La diffusione e l'impatto dei risultati in questo campo, specialmente nella conservazione del patrimonio architettonico, sono stati valutati quantitativamente attraverso una ricerca bibliografica nel database *Scopus*, che misura il numero di pubblicazioni e citazioni nel settore [Fig. 5].

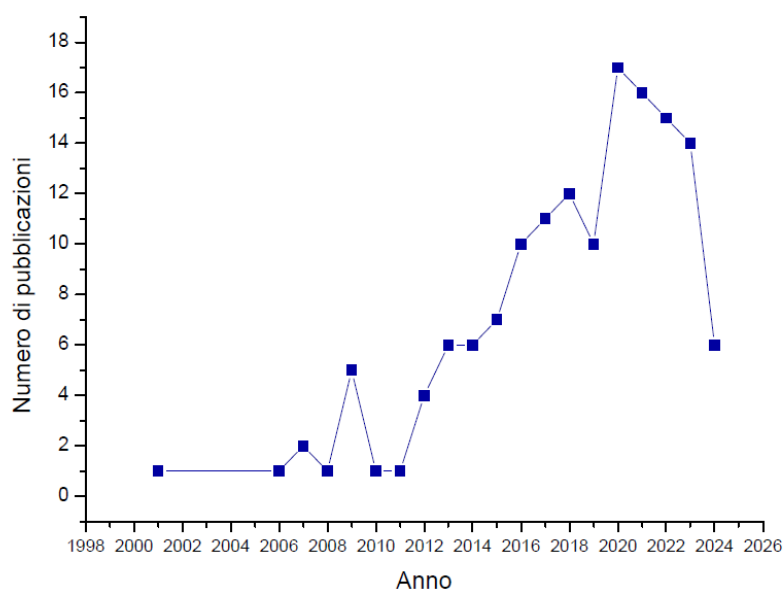


Figura 5: Analisi dei risultati ottenuti dalla ricerca mediante Scopus (TITLE-ABS-KEY (nanoparticles AND stone AND heritage)). Aggiornato ad agosto 2024.

Il grafico evidenzia una crescita marcata delle pubblicazioni, con un aumento particolarmente rilevante nel periodo compreso tra il 2008 e il 2020.

Tra i primi contributi, la ricerca condotta da Giorgi et al. (2000), riportata nello studio intitolato "*New Method for Consolidating Wall Paintings Based on Dispersions of Lime in Alcohol*" [84], ha rappresentato un avanzamento cruciale nello sviluppo della *nanocalce* come metodo di consolidamento.

Lo studio ha esplorato l'uso di dispersioni di idrossido di calcio (Ca(OH)_2) in alcoli alifatici a catena corta come tecniche di pre-consolidamento e consolidamento per le pitture murali. Utilizzando la dispersione di Ca(OH)_2 in propan-1-olo, i ricercatori hanno ottenuto dispersioni altamente stabili, con una concentrazione di Ca(OH)_2 tre volte superiore a quella delle soluzioni acquose sature di calce.

Sebbene queste dispersioni alcoliche non possano essere strettamente classificate come *nanocalci*, studi successivi hanno documentato la sintesi, caratterizzazione e applicazione di dispersioni di Ca(OH)_2 in alcol con particelle di dimensioni inferiori ai 500 nm per la conservazione dei materiali lapidei, con particolare riferimento al consolidamento delle pitture murali [85].

Ambrosi et al. (2001) [86] hanno esplorato la stabilità cinetica delle dispersioni di particelle di Ca(OH)_2 di dimensioni comprese tra 1 e 2 μm in alcoli alifatici a catena corta, confermando conclusioni simili alle precedenti di Giorgi et al. (2000) [84].

Negli ultimi anni, le sospensioni di nanoparticelle di idrossido di calcio si sono affermate come una promettente alternativa alle tradizionali soluzioni di acqua e latte di calce utilizzate nella conservazione dei materiali storici [87,88]. Questa innovazione è dovuta alla capacità delle nanoparticelle di superare i limiti delle tecniche convenzionali, offrendo significativi vantaggi in termini di efficacia, durabilità, compatibilità con i materiali lapidei e conservazione dei valori estetici. In particolare, grazie alla compatibilità chimica con substrati di tipo carbonatico, le nanoparticelle di Ca(OH)_2 sono state studiate per il consolidamento di affreschi, malte e pietre da costruzione per oltre un decennio.

Oltre all'efficacia consolidante a seguito del processo di carbonatazione (3), le nanoparticelle di Ca(OH)_2 , con dimensioni comprese tra 50 e 600 nm, offrono ulteriori vantaggi tecnici. Questi includono una maggiore capacità di penetrazione del trattamento [80], un incremento della reattività e una più elevata concentrazione applicabile di Ca(OH)_2 [89]. Inoltre, l'utilizzo di sospensioni di queste nanoparticelle in alcoli a catena corta, come il 1-propanolo, riduce i rischi associati all'impiego di acqua, quali la dissoluzione o la ricristallizzazione di composti [22].

Nonostante la commercializzazione di nanoparticelle di Ca(OH)_2 come CaloSil® (IBZ-Salzchemie GmbH, Halsbruecke, Germania) e, successivamente, Nanorestore® (Consorzio CSGI-Università degli Studi di Firenze) nel 2008 [21,22], sono ancora oggetto di studio [90].

I numerosi vantaggi delle *nanocalci*, come l'alta stabilità, il rapido tasso di carbonatazione e la buona compatibilità chimica e fisica si contrappongono alla profondità di penetrazione spesso inferiore a quella ottenuta con consolidanti a base di TEOS (etil silicato), il che può limitare l'efficacia del consolidamento [89].

Gli studi presenti in letteratura attribuiscono tale limitazione alla migrazione delle nanoparticelle verso la superficie del materiale trattato durante il processo di evaporazione del solvente [91,92].

Per migliorare il consolidamento in profondità, è essenziale considerare la porosità del materiale lapideo insieme alla stabilità cinetica della soluzione di nanoparticelle applicata. In letteratura si raccomanda di ottimizzare il metodo di applicazione, la selezione del solvente e la concentrazione delle nanoparticelle, al fine di massimizzare l'efficacia del trattamento e minimizzare gli effetti indesiderati. [93].

Il ruolo del solvente nella profondità di consolidamento è stato recentemente studiato [94]. È emerso che i solventi con punti di ebollizione elevati favoriscono una maggiore penetrazione delle *nanocalci* in pietre ad alta porosità, mentre i solventi con punti di ebollizione più bassi risultano più efficaci in materiali con pori più fini, riducendo la migrazione delle nanoparticelle verso la superficie durante l'asciugatura del solvente [94].

È noto che la procedura di applicazione può influenzare significativamente l'efficacia del consolidamento; tuttavia, la ricerca ha dimostrato che questo aspetto è stato esplorato solo marginalmente fino ad oggi. Le differenze tra le metodologie di applicazione utilizzate in laboratorio e quelle impiegate sul campo complicano la traduzione diretta dei risultati sperimentali alle condizioni reali [95,96]. Sebbene l'assorbimento capillare sia considerato il metodo standard per la sua affidabilità e ripetibilità in laboratorio, in situ si preferiscono spesso tecniche come la nebulizzazione o l'applicazione per impacchi, che risultano più adatte alle condizioni ambientali e alle esigenze pratiche degli interventi[97].

Lo studio condotto da Borsoi sui metodi di applicazione di consolidanti a base di particelle di idrossido di calcio [93,98] ha confrontato dettagliatamente diversi approcci, con l'obiettivo di collegare efficacemente i risultati di laboratorio alla pratica di conservazione, tenendo conto delle esigenze di restauratori e professionisti del settore. Tra i metodi esaminati, oltre all'assorbimento capillare fino a completa saturazione, è stata valutata l'applicazione mediante nebulizzazione sulla superficie superiore dei campioni. Sono state eseguite fino a cinque applicazioni consecutive con questo approccio, sebbene sia stata riscontrata una significativa perdita di prodotto dovuta alla nebulizzazione e all'evaporazione.

Nonostante la nebulizzazione si sia rivelata una metodologia praticabile ed efficace per l'applicazione del nanocalce, Otero et al. (2021) [99] hanno segnalato alternative valide, come l'applicazione con pennello. In uno studio, i campioni trattati con pennello, sottoposti a 10 cicli di trattamento, hanno mostrato una buona efficacia di consolidamento, con un aumento della coesione superficiale, una riduzione del coefficiente di assorbimento dell'acqua e un minor sbiancamento rispetto all'applicazione per assorbimento capillare.

In tal senso, Badreddine et al. (2020) [100] e Taglieri et al. (2018) [92] hanno trattato materiali lapidei con porosità aperta variabile tra il 19% e il 26%, utilizzando tre applicazioni consecutive. Slížková et al. (2023) [21], lavorando su pietre altamente porose come la pietra di Maastricht (con una porosità media del

50%), hanno osservato che dopo le prime tre applicazioni l'assorbimento d'acqua è rallentato, indicando una saturazione parziale dello spazio poroso.

Nell'articolo di Taglieri et al. (2015) [101], è stata studiata l'influenza delle applicazioni ripetute e della concentrazione delle nanoparticelle di Ca(OH)_2 . I risultati mostrano che una concentrazione ottimale delle sospensioni di nanocalci, combinata con applicazioni multiple, può migliorare significativamente l'efficacia del consolidamento, specialmente su substrati ad alta porosità.

L'aumento del numero di applicazioni e l'adeguamento della concentrazione delle nanoparticelle favoriscono una penetrazione più profonda e un processo di carbonatazione più efficace, riducendo al contempo la formazione di film superficiali, un problema comune nei trattamenti tradizionali.

Le sospensioni di *nanocalci* a concentrazioni più elevate tendono, inoltre, a migliorare la stabilità del trattamento, limitando la migrazione delle nanoparticelle verso la superficie. Tuttavia, l'ottimizzazione della concentrazione e del numero di applicazioni deve essere attentamente calibrata in base alle specifiche caratteristiche del substrato trattato, al fine di evitare la deposizione superficiale e garantire un'efficacia duratura del consolidamento.

Infine, l'umidità relativa, la temperatura e il tempo di esposizione influenzano in modo significativo la cinetica della carbonatazione e la precipitazione dei polimorfi di CaCO_3 . È stato dimostrato che la nucleazione dei polimorfi varia in funzione dell'umidità relativa e del tempo. È noto che il tasso di carbonatazione del Ca(OH)_2 è ottimizzato in condizioni di alta umidità relativa, generalmente tra il 75% e il 90% RH. In queste condizioni, la carbonatazione è facilitata, e una carbonatazione completa può essere raggiunta in circa 9-10 giorni a temperatura ambiente, con concentrazione ambientale di CO_2 e un'umidità relativa elevata (intorno al 75%) [22,102–105].

All'interno di questa trattazione, è fondamentale considerare brevemente i potenziali rischi per la salute, la sicurezza e l'ambiente associati all'uso di nanoparticelle di Ca(OH)_2 disperse in alcol, rinviando per un'analisi dettagliata alla letteratura specializzata. Gomez-Villalba et al. (2023), nel lavoro "*Application of Inorganic Nanomaterials in Cultural Heritage Conservation, Risk of Toxicity, and Preventive Measures*" [106], sottolineano che l'idrossido di calcio nanostrutturato, pur essendo altamente efficace, presenta una tossicità leggermente superiore rispetto alle forme macro strutturate del composto.

L'esposizione a queste nanoparticelle può provocare reazioni cutanee come dermatiti e ustioni, oltre a lesioni oculari e irritazioni delle vie respiratorie. Il rischio aumenta in caso di inalazione o ingestione accidentale. Inoltre, l'esposizione prolungata e la dispersione ambientale delle nanoparticelle possono comportare un rischio significativo, contribuendo allo sviluppo di patologie polmonari, specialmente in ambiti lavorativi dove la manipolazione di tali materiali è frequente.

Questi risultati evidenziano l'importanza di adottare misure preventive rigorose e protocolli di sicurezza durante l'uso di nanoparticelle di idrossido di calcio per ridurre al minimo i rischi per la salute umana e l'ambiente.

L'uso di alcoli come solventi rappresenta un ulteriore potenziale svantaggio, in particolare alla luce delle normative di sicurezza e ambientali sempre più

stringenti. Etanolo, propan-1-olo e propan-2-olo, essendo infiammabili, richiedono l'adozione di precauzioni adeguate durante l'applicazione e la fase di evaporazione. Questi alcoli sono classificati come composti organici volatili (VOC) a bassa tossicità secondo le normative dell'UE e degli Stati Uniti, risultando significativamente meno pericolosi rispetto ad altri VOC comunemente utilizzati, come i derivati del petrolio (ad esempio, il white spirit). Nonostante ciò, è essenziale monitorare attentamente il contatto con la pelle, l'inalazione e l'emissione nell'ambiente durante il loro utilizzo.

1.4.5 Nanoparticelle di biossido di silicio

Analisi approfondite hanno confermato l'efficacia consolidante dei prodotti a base di silicio, i quali agiscono tramite un meccanismo di reazione *sol-gel* per penetrare in profondità e polimerizzare all'interno delle strutture porose dei substrati lapidei (§ 2.4.3). Tuttavia, l'uso di questi consolidanti ha talvolta evidenziato effetti collaterali indesiderati, tra cui alterazioni cromatiche, formazione di gel fragili e fenomeni di biodegrado. Questi effetti si verificano in specifiche condizioni di applicazione e possono compromettere l'efficacia a lungo termine del trattamento [107–109].

Negli ultimi decenni, è stato sviluppato un ampio numero di prodotti innovativi basati su nanoparticelle, con l'obiettivo di migliorare le prestazioni dei consolidanti nei substrati inorganici. Tra questi, emergono i consolidanti formulati come silice colloidale nanostrutturata, che presenta particelle di dimensioni comprese tra 10 e 20 nm disperse in soluzione acquosa.

Tra i consolidanti a base di *nanosilice*, Nano Estel® è una dispersione colloidale acquosa di biossido di silicio con particelle di dimensioni comprese tra 10 e 20 nm [110]. Questo prodotto ha trovato ampio impiego per il consolidamento di materiali lapidei, grazie alla riduzione del tempo di reazione per la formazione del gel di silice e all'assenza di solventi tossici.

Le nanoparticelle di silice sono progettate per garantire una maggiore profondità di penetrazione, promuovere l'idrorepellenza e prevenire la colonizzazione biologica, contribuendo così alla conservazione del substrato nel tempo. Tuttavia, la loro efficacia è stata oggetto di critiche, in particolare riguardo alla distribuzione non uniforme delle nanoparticelle nella matrice legante, all'introduzione di acqua durante il trattamento e alla scarsa idrorepellenza conferita dopo l'applicazione. Questi aspetti indicano la necessità di ulteriori ricerche per migliorare la formulazione e le tecniche di applicazione [111–114].

In particolare, il lavoro di Lucolano et al. (2019) [110] ha analizzato l'efficacia di un consolidante a base di nanoparticelle di silice applicato al tufo, ampiamente utilizzato nell'architettura storica della Campania. Il consolidante, applicato mediante immersione, induce la formazione di un film di gel di silice all'interno dei pori superficiali della matrice lapidea, riducendo significativamente l'assorbimento d'acqua e apportando un miglioramento moderato alle proprietà meccaniche del materiale. I test sperimentali evidenziano che il trattamento non provoca alterazioni cromatiche rilevanti e incrementa la resistenza del tufo ai cicli

di gelo-disgelo, confermando l'idoneità del prodotto per interventi di conservazione su edifici storici.

Nonostante i risultati positivi, lo studio ha evidenziato alcuni limiti tecnici del consolidante a base di nanoparticelle di silice. Uno dei principali limiti riscontrati riguarda la capacità di penetrazione non ottimale del consolidante all'interno della matrice porosa del tufo. Sebbene il prodotto presenti una viscosità relativamente bassa, la profondità di penetrazione è risultata limitata a circa 2 mm, concentrandosi prevalentemente nelle cavità macro-porose. Questo limite di penetrazione può influenzare l'efficacia del trattamento nel migliorare la coesione interna della pietra, specialmente nelle zone più profonde del materiale. Inoltre, è stato osservato un accumulo eccessivo di gel di silice sulla superficie del tufo dopo cicli multipli di trattamento, con conseguente formazione di microfessurazioni visibili, un fenomeno indesiderato che potrebbe compromettere la durabilità a lungo termine del substrato trattato. Infine, sono state rilevate lievi variazioni cromatiche, in particolare dopo il secondo ciclo di trattamento, che, pur rientrando nei limiti accettabili secondo gli standard di conservazione, risultano percepibili a livello visivo.

Recentemente, i lavori di Stucchi et al. (2020) [114] e Stucchi et al. (2022) [115] hanno investigato l'efficacia e le caratteristiche dei consolidanti a base di nanosilice nel trattamento di pietre silicee degradate.

Nel primo studio, Stucchi et al. (2020) hanno sintetizzato e caratterizzato prodotti a base di nanosilice mirati al consolidamento di tre tipologie di pietre: il granito Bianco Sardo, la Pietra di Firenzuola e la Pietra di Muggia. La *nanosilice* è stata ottenuta mediante il metodo di Stöber [116,117], generando nanoparticelle di silice con dimensioni comprese tra 50 e 150 nm, disperse in soluzione acquosa ed etanolo. Le analisi morfologiche e fisiche, incluse osservazioni al microscopio, analisi colorimetriche, test di velocità ultrasonica e porosimetria a intrusione di mercurio, hanno rivelato risultati promettenti, dimostrando una buona capacità di consolidamento e un miglioramento della resistenza dei materiali trattati. Tuttavia, lo studio ha evidenziato alcune criticità, come la tendenza delle nanoparticelle di silice ad aggregarsi in presenza di umidità, limitando la profondità di penetrazione del consolidante e riducendone l'efficacia complessiva.

Nel secondo studio, Stucchi et al. (2022) hanno proseguito l'analisi concentrandosi su due prodotti a base di *nanosilice* con dimensioni delle particelle di 50 nm e 120 nm, applicati nuovamente su granito Bianco Sardo e le stesse tipologie di pietre arenarie. Anche in questo caso, la nanosilice è stata sintetizzata utilizzando il metodo di Stöber e dispersa in una soluzione di acqua ed etanolo. I risultati hanno confermato la capacità dei prodotti di penetrare nei pori delle pietre, riducendo l'assorbimento d'acqua e migliorando le proprietà meccaniche dei campioni trattati. Tuttavia, sono emerse problematiche analoghe a quelle del lavoro precedente, tra cui difficoltà nella penetrazione uniforme del consolidante e la formazione di aggregati di silice, che potrebbero compromettere la durabilità a lungo termine del trattamento.

In questo contesto, diverse ricerche hanno esplorato l'applicazione della *nanosilice* per il consolidamento di substrati carbonatici.

I lavori di Calia et al. (2012) [25] e Licchelli et al. (2014) [103] hanno investigato l'applicazione avanzata della *nanosilice* per il consolidamento di pietre porose, con un particolare focus sui substrati carbonatici, un tema cruciale nella conservazione del patrimonio culturale. Questi studi hanno evidenziato il potenziale della *nanosilice* nel migliorare le proprietà meccaniche delle pietre e nel mitigare i processi di degrado, con un'attenzione specifica agli aspetti di efficacia, durabilità e compatibilità dei trattamenti conservativi con i substrati carbonatici.

Nel primo studio, Calia et al. (2012) hanno valutato le prestazioni di un prodotto a base di *nanosilice*, applicato per il consolidamento di una calcarenite estremamente porosa, rappresentativa del patrimonio architettonico pugliese. La *nanosilice* è stata impiegata per migliorare la coesione delle superfici lapidee e ridurre l'assorbimento capillare dell'acqua. Le analisi morfologiche tramite microscopia elettronica a scansione (SEM) e le misurazioni della penetrazione mediante spettroscopia a dispersione di energia (EDS) hanno dimostrato una penetrazione efficace del consolidante fino a 8 mm. Tuttavia, è stato osservato che l'accumulo superficiale di *nanosilice* potrebbe alterare le caratteristiche cromatiche originali della pietra, evidenziando la necessità di ottimizzare la quantità di prodotto applicato per preservare l'aspetto estetico del materiale trattato.

Licchelli et al. (2014) hanno approfondito l'uso di rivestimenti fotocatalitici a base di TiO_2 su substrati lapidei carbonatici, analizzando il ruolo della *nanosilice* nella formulazione per migliorare le proprietà autopulenti e la resistenza all'invecchiamento della pietra. I risultati ottenuti hanno confermato che la *nanosilice* non solo ha contribuito al consolidamento meccanico, ma anche alla riduzione dell'assorbimento d'acqua e alla protezione contro contaminanti atmosferici, mantenendo al contempo la traspirabilità del substrato. Questo ha indicato una buona compatibilità chimico-fisica della *nanosilice* con i substrati carbonatici.

Entrambi gli studi hanno sottolineato l'importanza di calibrare con precisione i trattamenti a base di *nanosilice* in funzione delle specifiche caratteristiche petro-fisiche dei materiali lapidei, in particolare per i substrati carbonatici, al fine di garantire interventi di conservazione efficaci e sostenibili nel lungo termine.

È importante citare che l'uso delle nanoparticelle di silice amorfa presenta rischi tossicologici significativi. Gomez-Villalba et al. (2023) [106] hanno evidenziato che le nanoparticelle di silice possono causare citotossicità e alterazioni genetiche o epigenetiche, in particolare per l'interazione con i sistemi biologici. Le nanoparticelle di dimensioni intorno ai 10 nm possono essere inalate e causare infiammazioni nelle cellule sottomucose dei polmoni. La tossicità delle nanoparticelle di silice amorfa è influenzata principalmente dalla loro superficie specifica, piuttosto che dal grado di aggregazione.

Queste considerazioni sottolineano l'importanza di una gestione oculata e di una valutazione accurata dei rischi associati all'uso di nanomateriali nella conservazione del patrimonio culturale.

2. ***Sperimentazione***

2.1 Introduzione

2.1.1 Excursus storico della città dei Sassi

La ricostruzione storica dell'organizzazione urbana di un insediamento è un compito intrinsecamente complesso, un'operazione che richiede un'analisi attenta delle fonti disponibili. Questa complessità aumenta significativamente quando si tratta di un contesto unico come quello di Matera, dove la peculiarità dell'habitat urbano richiede un approccio ancora più dettagliato.

L'habitat unico della città, caratterizzato dalla sua struttura scavata nella roccia, costituisce una sfida senza pari nel contesto della ricostruzione storica, resa altresì ardua dalla limitatezza delle fonti disponibili, le quali non permettono di tracciare una successione esaustiva delle scelte urbanistiche e delle modifiche apportate che hanno caratterizzato lo sviluppo delle specifiche aree urbane.

La traccia storica dell'insediamento che ha dato vita a Matera e ai *Sassi di Matera* come oggi appaiono, è il risultato di un lento e graduale processo di transizione dalle forme di vita esclusivamente rurali a forme semi-rurali e, in seguito, urbane [118].

Le ricerche archeologiche hanno evidenziato come la distribuzione topografica delle comunità umane si sia ampliata privilegiando, in primo luogo, siti di altura, dotati di difese naturali e la possibilità di sorvegliare visivamente il territorio circostante. Sin dall'inizio, emerge chiaramente l'interazione tra l'ambiente fisico e le scelte insediative dell'uomo, sottolineando l'importanza cruciale del contesto geografico e geomorfologico nella storia urbana di Matera. Questa interazione diventa ancora più evidente man mano che esaminiamo l'evoluzione degli insediamenti nel corso delle epoche, a partire dalle prime comunità preistoriche che occuparono le alture della regione.

Durante l'età neolitica, del Bronzo e del Ferro l'abbondanza di vegetazione e la conformazione rocciosa del luogo devono aver fornito vantaggi fondamentali per l'insediamento e l'economia di sussistenza.

La comprensione delle fasi preistoriche di Matera e del suo territorio è stata notevolmente limitata dalla mancanza di una sequenza stratigrafica chiara. La carenza di dati precisi rende, così, arduo delineare con precisione l'evoluzione temporale degli insediamenti. Tuttavia, sono stati rinvenuti reperti risalenti al Paleolitico inferiore-medio lungo le sponde della Gravina, suggerendo una presenza umana molto antica nella regione.

Con l'avvento del Neolitico, a partire dal V millennio, la Murgia materana divenne un fulcro di attività umane, come testimoniato dai numerosi villaggi trincerati scoperti e documentati dall'archeologo Domenico Ridola. Questo periodo di sviluppo segnò l'inizio di un processo di evoluzione che continuò durante l'età del Bronzo, quando le prime forme di urbanizzazione iniziarono a prendere forma, gettando le basi per la futura struttura urbana di Matera.

Particolarmente significativo è il complesso della Civita-Cattedrale, dove, durante i lavori per la costruzione del nuovo seminario, il Ridola individuò una serie stratigrafica con frammenti dell'età del Bronzo rinvenuti nel livello inferiore [119]. Riguardo all'età del Ferro, nonostante le evidenze archeologiche non siano numerose, si ritiene possibile la presenza umana sui luoghi di altura di Matera,

nei luoghi che in tempi storici successivi avrebbero assunto i nomi di San Giovanni Battista, la Civita, piazza S. Francesco d'Assisi, Madonna de Idris e S. Lucia alle Malve.

Il sito di S. Nicola dei Greci ha restituito una notevole quantità di manufatti ceramici risalenti all'VIII-VII e VI secolo a.C., indicando la presenza di un insediamento significativo. L'analisi dei reperti indica che la presenza umana in questo sito, stabile per un lungo periodo, è diminuita gradualmente dall'VIII al VI secolo a.C., supportando l'idea del progressivo abbandono dei siti interni elevati durante l'era classica e dell'aumento della popolazione lungo la costa, probabilmente in relazione ai contatti con il mondo egeo.

Quando si esamina l'occupazione del centro urbano di Matera, emerge una situazione in cui i pochi reperti risalenti alla fase preclassica non forniscono sufficienti prove né di una presenza stabile nell'area né dell'esistenza di un insediamento ben definito. Analogamente, per quanto riguarda l'età classica, nonostante la scoperta di tombe e oggetti funerari, si suppone una distribuzione insediativa relativamente limitata. Questo non implica che Matera sia priva di coerenza demografica o marginale dal punto di vista territoriale, ma piuttosto evidenzia che non ci sono ancora tutti gli elementi essenziali per classificarla compiutamente come una polis, suggerendo, per il periodo considerato, una certa flessibilità nella scelta dei siti di insediamento, probabilmente in risposta alle esigenze economiche e strategiche del periodo in cui i centri dell'entroterra si orientavano verso le coste.

Nonostante il V secolo a.C. sia generalmente caratterizzato da una scarsa documentazione, suggerendo una contrazione degli insediamenti nell'entroterra collinare e nei centri rupestri, il successivo IV secolo a.C. offre un quadro ben diverso. Durante questo periodo, la documentazione archeologica si arricchisce notevolmente, con numerosi reperti che testimoniano una rinnovata attività insediativa, in particolare nei siti di S. Nicola dei Greci e S. Pietro Caveoso. La diffusa presenza di questi reperti nel Sasso Caveoso suggerisce un modello insediativo decentralizzato rispetto alla Civita.

Il III secolo a.C. è documentato da esigui frammenti ceramici rinvenuti principalmente a S. Nicola dei Greci, piazza San Francesco e nella Civita. Tuttavia, a partire dall'età tardo-repubblicana (II-I secolo a.C.), si nota un aumento significativo della presenza abitativa nella Civita. Nonostante siano limitati i reperti risalenti all'età romana imperiale, essi attestano la presenza continua e l'occupazione del sito fino a periodi successivi, compresi il III e il IV secolo d.C.

Con il declino dell'Impero Romano d'Occidente, la città di Matera iniziò a subire un processo di emarginazione che si manifestò con il ritiro della popolazione verso le aree più elevate della Civita. Questo fenomeno segnò il passaggio dalla fase classica a quella medievale, durante la quale Matera, sotto l'influenza di nuove dominazioni, cominciò a sviluppare l'identità che avrebbe caratterizzato i secoli successivi.

Il periodo medievale di Matera è segnato da un susseguirsi di dominazioni e cambiamenti che ne hanno plasmato l'identità e il paesaggio urbano.

Matera entra nella fase medievale della sua storia non prima dell'VIII-IX secolo, senza alcuna traccia della sua fase paleocristiana o tardoantica. La regressione demografica, la depressione economica e la crisi sociale intervenute tra il Tardoantico e l'Alto Medioevo confermano che non si può parlare appropriatamente di una storia urbana di Matera prima dell'insediamento longobardo e della sua inclusione nell'organizzazione politico-amministrativa del Ducato beneventano [120].

Tra il IX e il X secolo, il centro urbano di Matera assume contorni più precisi, focalizzando l'attenzione sul sito della Civita, che diventerà la parte principale dell'insediamento prima dell'espansione verso il Sasso Barisano e, successivamente, verso il Sasso Caveoso. Tuttavia, è con l'XI secolo che la struttura urbana di Matera può essere considerata completamente delineata, evidenziando un'interazione sempre più stretta tra la Civita e i Sassi.

Molte delle chiese rupestri presenti nei Sassi evidenziano, dal punto di vista degli apparati decorativi e degli elementi pittorici ed architettonici, caratteristiche che possono essere cronologicamente ricondotte all'XI-XII secolo [121]. Tuttavia, è necessario procedere con la dovuta cautela riguardo alla datazione di tali testimonianze, data la grande variabilità del metodo comparativo e la natura stessa degli affreschi, i quali sembrano trascendere il tempo, come è comune nelle espressioni legate alla devozione popolare [Fig.6].



Figura 6: Affresco di Cristo Pantocratore (XII sec.), chiesa rupestre di Santa Maria di Idris e cripta di San Giovanni in Monterrone (Matera)

Nel XII secolo, Matera si delineava come una città divisa tra due poli urbani distinti ma complementari: da un lato la Civita, dominata dalla maestosa presenza della Cattedrale e dall'altro i Sassi [Fig. 7 a-b], caratterizzati da abitazioni scavate nella roccia, pozzi e complessi sistemi di canalizzazione.

Nel corso del XIII secolo, la città di Matera attraversò un periodo di riqualificazione degli spazi nella Civita, mentre i Sassi sperimentavano un notevole incremento demografico e una vivace crescita urbana. Questo sviluppo fu accompagnato dalla costruzione di nuove strutture religiose, destinate a plasmare il futuro della città. Le grotte dei Sassi, in particolare, acquisirono un valore sociale ed economico significativo, come testimoniano i carteggi dell'epoca, che documentano un'intensa attività di compravendita di spazi come cripte e cisterne, soprattutto da parte di istituzioni religiose.

Alla fine del XIV secolo, l'aspetto urbano di Matera si stabilizzò definitivamente: la Civita si distingue per i suoi monumenti di spicco, protetti da una cinta muraria munita di porte, mentre i Sassi si organizzano in quartieri e nuclei abitativi. È dunque lecito affermare che la storia urbana di Matera affonda le sue radici nel Medioevo, specialmente nei secoli centrali di questo periodo, quando la struttura urbana iniziò a delinarsi in modo sempre più definito, riflettendo la tradizione cittadina. Le dinamiche tra la Civita e i Sassi emergono come un'interazione armoniosa, almeno fino al XVI secolo, con una chiara consapevolezza della diversità dei ruoli: la Civita fungeva da fulcro sacro e amministrativo, mentre i Sassi e le zone circostanti rappresentavano il cuore della vita comunitaria.

Tra il XIV e il XV secolo, Matera rimase sostanzialmente immutata nella sua struttura urbana medievale, ma si manifestò una nuova consapevolezza della città. Questo periodo fu segnato da cambiamenti politici, culturali e scientifici che influenzarono la pianificazione urbana dei secoli successivi. Verso la fine del XV secolo, il nucleo principale della città era ancora concentrato nella Civita, caratterizzata dalla presenza della cattedrale del Duecento e dal castello normanno, quest'ultimo demolito nel 1448 poiché ritenuto ormai superfluo ai fini difensivi e sostituito da dimore private. Con la Civita ormai quasi completamente urbanizzata, molte famiglie facoltose, tra cui i Malvezzi, i Firrao e i Santoro, scelsero di erigere le proprie dimore in quest'area prestigiosa.

A partire dal Quattrocento, l'area dei Sassi, che fino al XIV secolo non aveva evidenziato segni significativi di crescita demografica, iniziò a svilupparsi con una struttura complessa che avrebbe caratterizzato la zona nei secoli successivi. Fu proprio nel XV secolo che Matera conobbe un periodo di crescita economica e demografica più intenso, grazie a diversi fattori come il miglioramento dell'accesso ai mercati e la crescita delle industrie della seta e del ferro lavorato. Questo sviluppo portò a una riorganizzazione urbana dei Sassi, con un notevole aumento delle abitazioni che si adattavano al territorio seguendone i dislivelli. In questo contesto, i *vicinati* iniziarono a giocare un ruolo chiave nel tessuto urbano dei Sassi e nella vita sociale dei loro abitanti, divenendo un elemento caratteristico della struttura urbana di Matera.

Un momento cruciale della riqualificazione urbana del Cinquecento fu la creazione della piazza Maggiore, conosciuta come piazza del Sedile. Originariamente sede di attività economiche, produttive e religiose consolidate, a

partire dal XVI secolo la piazza assunse un ruolo centrale nel contesto politico, amministrativo e giudiziario della città. Adiacente a piazza del Sedile, si trovava l'asse rappresentato da via delle Beccherie, dove si sviluppò un significativo nucleo abitativo a partire dalla metà del XVI secolo. Via delle Beccherie rappresentava uno dei primi collegamenti con il Piano, quel tessuto urbano in via di sviluppo al di là della Civita, mentre i Sassi, un tempo considerati semplici borghi periferici, iniziavano a fondersi organicamente con la città [Fig. 8 a-b].

Durante il XVI secolo, Matera, come gran parte del Mezzogiorno, sperimentò un significativo aumento demografico. Le valli scoscese dei Sassi divennero densamente popolate e il sistema viario, essenziale per la transitabilità, fu sostanzialmente definito. La stretta interazione tra le necessità umane e le caratteristiche del territorio si risolveva nella costruzione di vicoli e rampe che si adattavano alla morfologia del sito, accompagnando il progressivo ampliamento delle abitazioni locali. Il *vicinato* emerse come un paradigma interessante non solo dal punto di vista topografico e spaziale, ma anche socio-antropologico, fungendo da diaframma tra la sfera privata e quella comunitaria. L'impianto urbano appariva singolare: strade, case, grotte, archi, terrazze e recinti si intersecavano in una complessa articolazione, senza un piano urbano preordinato che armonizzasse i volumi interni ed esterni, sia scavati sia costruiti. Il passaggio dalla seconda metà del Cinquecento alla prima metà del Seicento fu caratterizzato da una continuità nei processi economici, politici e sociali, segnando una lunga fase di recessione e crisi. Anche dal punto di vista urbanistico, non emersero nuove impostazioni progettuali; piuttosto, si ripropose lo schema urbano ereditato, con lievi variazioni per adattarsi al naturale sviluppo della città, senza introdurre elementi realmente innovativi.

Fino al XVII secolo, Matera mantenne la sua identità storica. Tuttavia, è proprio nel Seicento che si iniziarono a delineare i primi segnali di una nuova evoluzione urbana, proiettata oltre i confini dei Sassi. Un momento cruciale in questa trasformazione fu la costruzione del seminario, commissionato dall'arcivescovo Vincenzo Lanfranchi e inaugurato tra il 1668 e il 1672. Mentre nella città alta si sviluppavano interventi edilizi e urbanistici significativi, riflettenti il clima e lo stile dell'epoca, come il Palazzo Lanfranchi [Fig.9 a], destinato inizialmente a seminario e poi a liceo, si eresse contemporaneamente una barriera architettonica che separava visivamente i Sassi dalla città alta.



Figura 7: a) La Cattedrale con alcuni elementi della cinta difensiva. Sasso Barisano immediatamente a ridosso. b) Il Sasso Caveoso e la Civita. Da Fonseca et al. (2003) [122].

Nel corso del Settecento, Matera sperimentò un'imponente espansione edilizia, senza precedenti nella sua storia urbana [Fig.9 b]; tuttavia, questo sviluppo non si tradusse in un miglioramento diffuso delle condizioni sociali. Circa due terzi del patrimonio urbano erano di proprietà degli enti ecclesiastici, mentre il resto apparteneva principalmente alla nobiltà e alla nascente borghesia. Nonostante la crescita edilizia, le disuguaglianze sociali persistevano, poiché l'espansione urbana beneficiava soprattutto le classi più agiate.

Con l'ascesa della borghesia nella seconda metà del XVII secolo, la struttura sociale e l'aspetto urbanistico della città subirono profonde trasformazioni, accentuando la distanza fisica ed economica tra le diverse fasce sociali. Questo cambiamento portò a un progressivo degrado dei Sassi, che divennero sempre più marginalizzati sia fisicamente che socialmente. Le valli dei Sassi, per la loro conformazione morfologica, si trovarono relegate ai margini della vita cittadina, mentre i loro abitanti venivano esclusi dalle dinamiche sociali e politiche centrali. Vivere in grotta, inizialmente una scelta insediativa dettata da esigenze immediate e concrete, divenne progressivamente uno status symbol per i ceti meno abbienti, segnando una chiara differenziazione rispetto ai quartieri più prosperi della città.

Nei primi anni del XIX secolo, Matera attraversò una fase tumultuosa, fortemente influenzata dalla rivoluzione partenopea del 1799. Eventi come il trasferimento della Regia Udienza a Potenza nel 1806 e la soppressione degli ordini religiosi nel 1807 ebbero un impatto considerevole sul tessuto urbano di Matera, causando un rallentamento nella sua crescita e accentuando il suo isolamento geografico ed economico. In questo contesto, la città si concentrava principalmente sull'agricoltura e la pastorizia, rimanendo in una condizione di immobilità stagnante.

Durante la prima metà dell'Ottocento, si intravide una lieve rinascita, ma senza un chiaro progetto per una nuova città laica e borghese, le nuove realizzazioni si sovrapposero all'edilizia preesistente, senza una chiara direzione per lo sviluppo urbano. Il Piano, che un tempo ospitava chiese e monasteri, vide molte di queste strutture riadattate per scopi terziari e amministrativi. Questo riutilizzo degli edifici monastici consolidò ulteriormente la predominanza del Piano rispetto ai Sassi, che venivano sempre più degradati e deliberatamente esclusi dalla nuova forma urbana.

Questo assetto urbanistico sancì in modo definitivo la polarità tra due realtà urbane contigue ma antitetiche, una dicotomia che avrebbe caratterizzato Matera per molto tempo [122].



Figura 8: a) Piazza del Sedile e b) Via delle Beccherie. Da Fonseca et al. (2003) [122].



Figura 9: a) Palazzo Lanfranchi in una immagine degli anni '30. Tratta da Fonseca et al. (2003) [122]. b) Veduta della città ne Il Regno di Napoli in prospettiva, 1703, di Giovan Battista Pacichelli.

2.1.2 La definizione della città contemporanea e l'emergenza Sassi

La gravità della condizione socioeconomica segna l'inizio del XX secolo a Matera: nel corso del Novecento, i Sassi, soffocati e deteriorati nel loro tessuto abitativo, assistono al progressivo peggioramento delle loro condizioni [Fig.10].

Esaminare gli anni più recenti della storia di Matera tramite le principali disposizioni legislative riguardanti i Sassi consente di approfondire la doppia dimensione del problema: quella urbanistica e quella amministrativa e gestionale. La visita del presidente del Consiglio, Giuseppe Zanardelli, nel settembre 1902, sembrò portare speranze di cambiamento, avendo sollevato in parlamento l'urgenza di indagare sulle condizioni estreme che affliggevano la regione.

L'evento fu seguito dalla promulgazione della legge n. 140 del 1904 che, tuttavia, non trovò attuazioni concrete se non trascorsi venti anni quando, tra il 1923 e il 1926, l'amministrazione comunale propose un piano di risanamento per i Sassi, prevedendo la costruzione di case popolari e villaggi rurali.

Mentre il Piano cercava di integrarsi come parte vitale della città, i Sassi rimanevano sempre più isolati. Negli anni '30, furono compiuti progressi, come l'installazione di servizi igienici, la costruzione di fognature, il miglioramento delle strade (come via Madonna delle Virtù) e la creazione di una strada panoramica (1932) che attraversava l'intera città vecchia. Tuttavia, questi interventi non riuscirono a risolvere le profonde contraddizioni politiche ed economiche del sistema.

La visita di Mussolini a Matera nel 1936 e l'inchiesta demografica condotta dall'ufficiale sanitario Luca Crispino portarono l'attenzione su condizioni di vita estremamente precarie. Tuttavia, solo dopo la Seconda Guerra Mondiale, con la pubblicazione di *Cristo si è fermato a Eboli* di Carlo Levi, il problema dei Sassi ottenne rilevanza nazionale [123].

Nel 1948, l'avvio di azioni concrete vide la luce sotto l'impulso del ministro dei lavori pubblici Umberto Tupini, il quale incaricò il Genio Civile di redigere un progetto mirato a fronteggiare l'emergenza abitativa nei Sassi di Matera.

La visita nel 1950 di Alcide De Gasperi e la promulgazione della legge n. 619 del 1952 aprirono per la città una nuova fase di rinascita urbanistica, culturale e sociale. Urbanisti e sociologi, al centro di un vivace dibattito, riuscirono a intrecciare politica e cultura in modo fino ad allora inedito.

In questo contesto, figure di spicco come Adriano Olivetti e il sociologo tedesco Friedman concepirono un modello di comunità democratica autogestita, con particolare attenzione al rapporto tra città e campagna. Tuttavia, nonostante le intenzioni encomiabili, la legge n. 619, che prevedeva il trasferimento degli abitanti dei Sassi inabitabili e la costruzione di nuovi borghi rurali, portò paradossalmente all'abbandono delle storiche abitazioni.

Il Piano Regolatore Generale del gennaio 1956, elaborato da Luigi Piccinato, sancì il destino dei Sassi, negando loro un ruolo urbanistico e funzionale. Il piano decretò lo svuotamento degli antichi rioni e il trasferimento degli abitanti nei nuovi quartieri e borgate rurali. I nuovi quartieri, dislocati lungo le direttrici di espansione della città (come Villa Longo, Serra venerdi, La Nera), delineavano così il volto

della Matera moderna, proiettandola come un'estensione della città sette-ottocentesca.

Negli anni Sessanta, con una crescente consapevolezza delle ricchezze naturali e storico-artistiche, e una maggiore attenzione verso i centri storici e il loro valore, si aprì un dibattito sempre più vivace sullo sviluppo urbano.

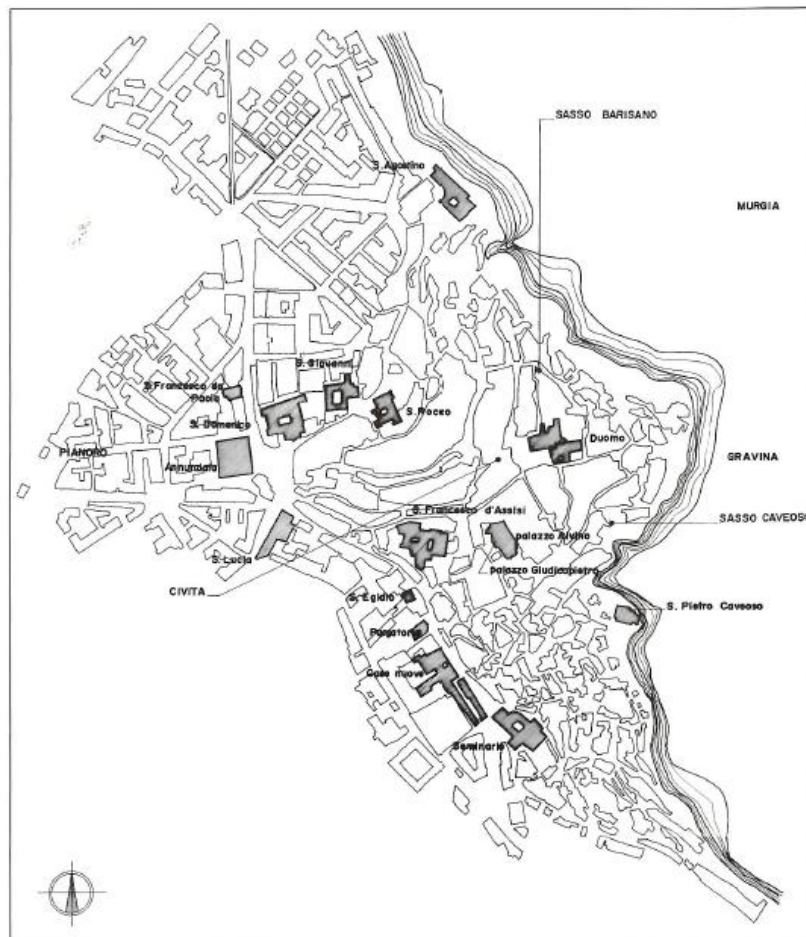


Figura 10: La città durante la prima espansione Novecentesca. Tratta da Rocchi (1988) [14].

La Carta di Venezia del 1964, con il suo articolo 1, ampliò il concetto di monumento includendo non solo singole creazioni architettoniche, ma anche contesti urbani e rurali che testimoniano civiltà particolari, evoluzioni significative o eventi storici.

Verso la fine degli anni Settanta, l'espansione urbana di Matera, precedentemente spinta dalla costruzione di nuovi quartieri per gli ex-abitanti dei Sassi, subì un'inesorabile frenata. Pur essendo la nuova area cittadina meno afflitta dalla precarietà igienico-sociale che caratterizzava i Sassi, non mancavano comunque numerosi problemi non risolti.

L'abbandono e il progressivo degrado delle case disabitate accelerarono il deterioramento fisico e strutturale degli antichi rioni, tanto che già nel 1965 si registrarono crolli significativi. La vigorosa reazione dell'opinione pubblica spinse verso il recupero dei Sassi e del centro storico settecentesco del Piano.

Questo movimento di sensibilizzazione condusse alla promulgazione della legge n.126 del 28 febbraio 1967 e della legge n. 1043 del 1971, avviando così il processo di riconoscimento dei Sassi come patrimonio culturale e nazionale da conservare.

In questo nuovo contesto, l'importanza dell'aspetto artistico, storico e paesaggistico dei Sassi fu equiparata a quella sociale, igienica e urbanistica, contribuendo significativamente a riaffermare l'identità culturale della città di Matera. Tra il 1974 e il 1977 si svolse un concorso per la redazione di un progetto mirato al restauro del rione Sassi di Matera e del prospiciente altopiano, entrambi riconosciuti come zone di eccezionale interesse storico, archeologico, artistico, paesaggistico ed etnografico.

La notevole risonanza culturale generata dalle leggi del 1967 e del 1971 permise a diverse fazioni politiche di abbracciare con vigore la causa della conservazione e della valorizzazione dei Sassi. Questo impegno culminò nel 1984 con la presentazione di quattro proposte di legge alla Camera dei deputati, e l'approvazione finale della legge n. 771/86, volta al recupero e alla conservazione dei Sassi di Matera. L'introduzione della legge n. 771 segnò l'inizio di una nuova fase, incentrata sull'integrazione dei Sassi nella vita cittadina e sulla loro funzionalità per lo sviluppo urbano, attraverso un approccio orientato al recupero non solo architettonico, urbanistico ed ambientale, ma anche economico.

Il restauro funzionale dei quartieri antichi non si limitò ad interventi tecnici, fu anche il risultato di un'analisi storico-antropologica che, rispettando la cultura materiale, permise ai Sassi di manifestare appieno il loro autentico significato e la loro identità storica [13,14,122,124].

I Sassi e il Parco delle Chiese Rupestri di Matera furono iscritti nella Lista del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO nel 1993 e designati come Capitale Europea della Cultura nel 2019, confermando il loro straordinario valore e la loro importanza a livello internazionale [10,125].

2.1.3 Caratteri morfologici del paesaggio

L'evoluzione di un paesaggio può essere tracciata in modo accurato attraverso l'analisi geologica e naturalistica, integrando le evidenze dell'intervento umano nel corso del tempo. I materiali lapidei, come la calcarenite, hanno rivestito un ruolo fondamentale fin dalle epoche più antiche della storia umana. Questo tipo di roccia, ampiamente impiegato in tutto il bacino del Mediterraneo, ha svolto una doppia funzione: da un lato ha favorito l'insediamento delle civiltà rupestri, che abitavano grotte naturali o scavate dall'uomo; dall'altro, una volta estratta e lavorata, è stata utilizzata per la costruzione di edifici.

Le rocce affioranti nella Murgia Materana, come la calcarenite di Gravina, sono state tradizionalmente scelte come materiale da costruzione per la loro facilità di lavorazione e la vasta disponibilità. Questa roccia, spesso impropriamente chiamata *tufo calcareo*, è di grande rilevanza sia geologica che storica [126].

A Matera, la calcarenite ha permesso la creazione di un habitat rupestre unico, caratterizzato da grotte e cavità scavate nella roccia, utilizzate per scopi abitativi e religiosi. Questa stretta interazione tra l'ambiente naturale e l'attività antropica è un fenomeno di grande rilevanza che si manifesta vividamente in questo contesto: i *Sassi di Matera* rappresentano un esempio paradigmatico di come l'architettura si sia sinergicamente integrata con le caratteristiche geologiche del luogo, dando vita a un modello insediativo distintivo che ha mantenuto nel corso dei secoli una marcata identità culturale.

Nel corso dei millenni, il paesaggio di Matera ha subito un processo di evoluzione adattiva, modellandosi per soddisfare le mutevoli esigenze dell'insediamento umano.

La città è fortemente influenzata dalle caratteristiche morfologiche, strutturali, litologiche, idrogeologiche e geomeccaniche del territorio, che hanno favorito un'occupazione quasi permanente del luogo. La struttura stessa della città e le sue dinamiche non possono essere apprezzate appieno senza un'analisi dettagliata di queste peculiarità naturali, che hanno plasmato e continuano a influenzare il suo sviluppo urbano [118].

Un aspetto fondamentale che ha modellato e continua a modellare la morfologia dell'area di Matera è la presenza della Gravina [Fig.11], una profonda valle carsica formatasi nel corso del tempo attraverso processi erosivi. La configurazione attuale della valle del torrente Gravina e dell'intera area urbana circostante è il risultato di una complessa interazione di vari fattori morfogenetici. Tra questi, si annoverano le fluttuazioni del livello del mare, l'impatto dell'azione umana e l'influenza degli agenti idrometeorici, tutti determinanti principali nella modellazione del paesaggio e nella creazione delle condizioni ambientali che caratterizzano Matera.

La presenza della Gravina offre un'opportunità unica per esaminare la stratigrafia delle rocce che raccontano la storia geologica dell'area. Dalla base della Gravina verso l'alto, si possono distinguere diverse formazioni geologiche: calcari cretacei del Calcare di Altamura, calcareniti e argille grigio-azzurre del Quaternario [127]. Queste formazioni offrono una finestra sulla complessa storia geologica della zona.

In particolare, le Calcareniti di Gravina, associate al Pleistocene inferiore, poggiano in discordanza sui calcari dolomitici del Cretaceo [128]. Al di sopra della formazione calcarenitica si trovano le Argille Subappennine, limi argillosi e argille marnose grigio-azzurrognole, localmente note come argille di Gravina, caratterizzate da una notevole durezza e coesione grazie all'elevata concentrazione di carbonati.

Dal punto di vista geotecnico, l'ambiente originario dove è sorta Matera è stato profondamente alterato dai numerosi interventi fisici e antropici praticati sullo strato roccioso calcarenitico. Questo processo ha trasformato non solo il paesaggio fisico, ma anche la dinamica urbana e sociale della città, integrando la geologia e l'architettura in un dialogo continuo che ha definito l'identità di Matera attraverso i secoli.



Figura 11: Veduta sulla Gravina

2.1.4 Calcarenite di Gravina

2.1.4.1 Caratteri distintivi della roccia

La Calcarenite di Gravina è stata descritta in dettaglio da Iannone A. & Pieri P. (1979) [129] come depositi carbonatici del primo Pleistocene, noti anche come *Tufi delle Murge o Tufo di Gravina*. Gli studi litostratigrafici e sedimentologici hanno permesso di identificare diverse *litofacies*, giustificate dalla complessa fisiografia dell'area.

Tali osservazioni sono state ulteriormente corroborate da Baccelle Scudeler et al. in uno studio sulla provenienza della pietra del tempio di Hera a Metaponto, che ha incluso il campionamento delle cave antiche della Basilicata orientale e della Puglia meridionale [128].

Recentemente, Bonomo et al. (2019-2020) [130,131] hanno descritto in dettaglio la calcarenite affiorante nelle cave di La Vaglia, Parco Scultura - Paradiso, La Palomba e Petragallo, identificandola come una calcarenite sedimentaria di origine organogena, costituita da frammenti e gusci calcarei fossili o microfossili. Le analisi mediante diffrazione a raggi X (XRD) hanno rivelato una composizione mineralogica dominata dalla calcite (CaCO_3), con tracce di quarzo, feldspati e fillosilicati [13,14].

Una delle caratteristiche distintive di questa formazione geologica è la notevole variabilità granulometrica e nel grado di diagenesi. Si osserva una transizione da una granulometria medio-grossolana a medio-fine, accompagnata da una variazione nella consistenza del materiale, che passa da una struttura rocciosa ben consolidata a una massa simile a sabbia debolmente cementata [132,133]. Questa variabilità implica una vasta gamma di proprietà, tra cui densità apparente compresa tra 1,40 g/cm³ e 1,99 g/cm³, porosità totale tra il 26,69% e il 48,48%, e assorbimento d'acqua a pressione ambientale tra l'11,02% e il 29,24% in peso [130].

La formazione e i suoi due principali membri, quello inferiore litoclastico e quello superiore bioclastico, presentano caratteristiche petrografiche peculiari che hanno consentito la suddivisione in sei ulteriori *litofacies*, basate su osservazioni sul campo, composizione, porosità, resistenza meccanica e assorbimento dell'acqua, con una suddivisione basata su analisi dei cluster [Fig. 12].

Si riportano di seguito le sei *litofacies* riconosciute, correlate delle principali caratteristiche, utilizzando il lessico delle pubblicazioni di riferimento per garantire uniformità [130]:

- BBC - Basal bioclastic Calcarenite (red algae packstone)
- LMC - Lithoclastic microconglomerate-calcirudite (lithoclastic rudstone-grainstone to packstone)
- LC - Lithoclastic Calcarenite (lithoclastic grainstone)
- LBC - Large bivalve bioclastic Calcarenite (mollusk shell grainstone, raramente rudstone)
- RBC - Rhodolith bioclastic Calcarenite (red algae rudstone to floatstone)
- FBC - Fine bioclastic Calcarenite (planktic foraminifera grainstone to packstone).

Lo studio condotto da Bonomo et al. (2020) ha, inoltre, individuato le tipologie di pietre da costruzione maggiormente impiegate nel centro storico dei Sassi di Matera. Gli autori hanno osservato che gli edifici dei Sassi sono stati prevalentemente costruiti utilizzando calcarenite litoclastica (LC), calcarenite a bivalvi (LBC) e calcarenite bioclastica a grana fine (FBC). La calcarenite bioclastica a grana fine (FBC), considerata la migliore in termini di lavorabilità, presenta caratteristiche peculiari legate all'estrema variabilità nella porosità e nel grado di cementazione. Tuttavia, questa *litofacies* mostra anche ampie variazioni nella densità e nell'assorbimento d'acqua, rendendola più vulnerabile al degrado. L'eterogeneità individuata è stata attribuita all'intensa bioturbazione, che influisce notevolmente sulle proprietà petrofisiche.

Le restanti litofacies individuate sono state raramente impiegate come materiali da costruzione, evidenziando così l'attenta selezione dei materiali utilizzati in edilizia.

Storicamente, il materiale impiegato per fondazioni, architravi e gradini di scalinate esterne era il cosiddetto mazzaro, una varietà di tufo particolarmente duro e compatto, estratto dalle *tufare* de La Vaglia o da La Palomba.

Sin dal XV secolo, i *mastri muratori* hanno sfruttato abilmente la versatilità di questo materiale, combinando tecnica e arte per creare motivi ornamentali complessi e soluzioni tecniche sofisticate, rispondendo alle sfide costruttive specifiche dell'ambiente unico dei Sassi [14].

Le proprietà fisico-meccaniche delle calcareniti sono state oggetto di approfonditi studi nel tempo. Andriani e Walsh [132,134–136] hanno fornito una dettagliata caratterizzazione delle principali proprietà fisiche e meccaniche delle calcareniti utilizzate come materiali da costruzione nel Sud Italia. È emerso che il comportamento meccanico delle calcareniti è essenzialmente modellato dai processi deposizionali e diagenetici, che definiscono i rapporti tra struttura, matrice e cemento del materiale roccioso. Ciò porta a significative variazioni nelle proprietà tecniche, inclusa la resistenza alla compressione, la permeabilità e le manifestazioni patologiche tipiche della roccia.

La durabilità della roccia è messa alla prova dai molteplici processi di degrado, influenzati sia dalle caratteristiche intrinseche che dall'aggravarsi dell'impatto degli agenti ambientali.

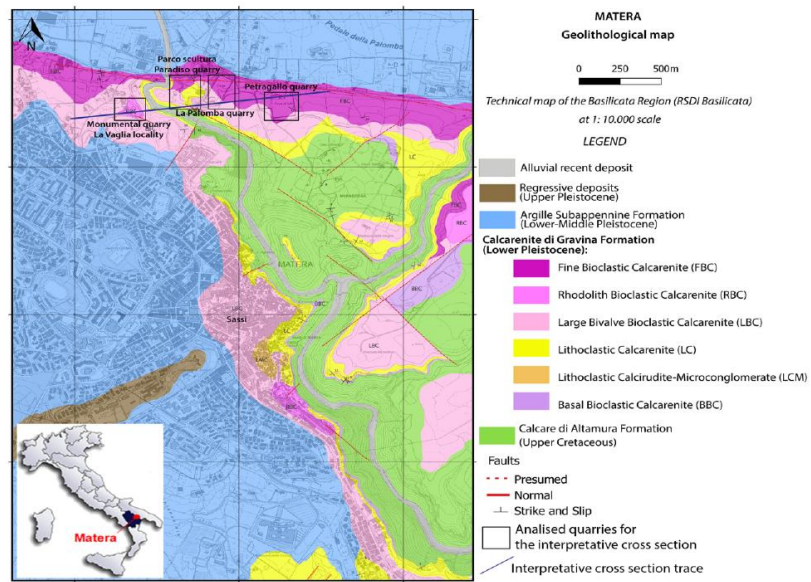


Figura 12: Carta Geolitologica tratta da Bonomo et al. (2020) [130]

2.1.4.2 Principali morfologie di degrado

L'accurata comprensione dello stato di conservazione dei centri storici è di primaria importanza per delineare strategie di intervento preventive e mirate, specialmente per siti di inestimabile valore storico e culturale come i Sassi di Matera. In questo contesto, la standardizzazione delle metodologie di analisi dei fenomeni di degrado è stata promossa attraverso l'istituzione di commissioni internazionali e nazionali, quali il *Consiglio Internazionale dei Monumenti e dei Siti (ICOMOS)*, organismo consultivo dell'UNESCO. Questi enti hanno l'obiettivo di sviluppare teorie, metodologie e tecnologie avanzate per la conservazione, protezione e valorizzazione dei monumenti e dei siti di interesse culturale.

Parallelamente, la ricerca scientifica ha contribuito alla definizione di classificazioni tipologiche dei fenomeni di degrado, formalizzate attraverso normative come le raccomandazioni *NORMAL 1/88* e *UNI 11182:2006* [46,137]. Tali standard sono fondamentali per l'armonizzazione dei criteri diagnostici e delle procedure operative nell'ambito della conservazione dei materiali lapidei.

Nel corso degli anni, diversi studi hanno integrato l'osservazione qualitativa con analisi quantitative, utilizzando indici di degrado per quantificare l'intensità e l'estensione delle alterazioni morfologiche osservate [138,139]. Questo approccio quantitativo, volto all'ottimizzazione della diagnosi dei danni nei materiali lapidei, contribuisce a migliorare le strategie di conservazione e manutenzione a lungo termine. I contributi di Fitzner e Heinrichs, Fitzner et al. [28,47], si sono rivelati particolarmente significativi per lo sviluppo di un metodo diagnostico oggettivo e riproducibile, basato su un *decay index* che considera sia l'intensità che la distribuzione spaziale delle forme di degrado [Fig.13 a-d].

Nel contesto materano, Gizzi et al. (2016) [140] hanno introdotto indici di danno lineare e progressivo, basati sull'intensità e sulla distribuzione spaziale delle alterazioni morfologiche rilevate sulla Calcarenite di Gravina, con particolare attenzione all'influenza degli agenti atmosferici [141–147]. Lo studio si è concentrato sull'analisi dello stato di conservazione dei Sassi di Matera, esaminando l'influenza dei fattori ambientali macroclimatici, quali il microclima, l'insolazione e la velocità del vento, che contribuiscono al degrado delle superfici esposte. Attraverso l'integrazione di rilievi sul campo e analisi spaziali condotte tramite sistemi informativi geografici (GIS), lo studio ha evidenziato come le superfici esposte a nord siano maggiormente soggette all'azione erosiva del vento e della pioggia, mentre quelle esposte a sud siano principalmente danneggiate dall'insolazione diretta.

Lo studio condotto da Gizzi et al. (2016) fornisce, dunque, un quadro delle dinamiche di degrado che interessano i Sassi di Matera, considerando le interazioni tra le variabili climatiche, l'erosione, l'inquinamento atmosferico e altre forzanti ambientali sulla stabilità e sull'integrità strutturale dei manufatti lapidei.

Lo studio successivo di Bonomo et al. (2017) ha approfondito le specifiche modalità di degrado della calcarenite di Gravina, analizzando un campione di 100 facciate situate all'interno dei Sassi.

Nella classificazione qualitativa proposta da Bonomo et al. [148,149], conforme alle normative italiane [137] e alla classificazione internazionale ICOMOS-ISCS

[150], le morfologie di degrado sono state esaminate per valutare l'entità e la distribuzione spaziale dei pattern di degrado sulle due varietà principali di calcarenite (bioclastica e litoclastica). Nonostante l'apparenza armoniosa di un paesaggio scolpito nella roccia, i Sassi celano una significativa degradazione dei materiali lapidei, attribuibile sia a dissesti differenziali che all'azione combinata degli agenti atmosferici e antropici. Le analisi condotte hanno rivelato che l'alveolizzazione è diffusa in entrambe le tipologie di Calcarenite, con una prevalenza osservata sull'80% delle facciate esaminate. Questo fenomeno di degrado è accompagnato da altre forme di alterazione, quali il distacco, che è risultato più marcato nella calcarenite litoclastica, e il peeling, fenomeno spesso associato a interventi di restauro non appropriati, particolarmente evidente nella calcarenite bioclastica. Le fratture si manifestano con maggiore frequenza nella calcarenite litoclastica, mentre i depositi superficiali si riscontrano in entrambe le varietà litologiche. Le attività antropiche sono responsabili della perdita di materiale e della decolorazione, mentre le azioni biotiche, in particolare quelle animali, contribuiscono alla perforazione e alla deposizione di materiali organici. Nonostante queste problematiche, l'ambiente urbano di Matera presenta livelli di inquinamento ambientale inferiori alle soglie di legge, e non si registrano segni rilevanti di solfatazione superficiale sui manufatti lapidei.

In conclusione, la diagnosi accurata del degrado nei Sassi di Matera, supportata da metodologie standardizzate e da indagini scientifiche approfondite, risulta cruciale per la preservazione di questo patrimonio unico. Gli studi condotti da Gizzi et al. (2016) e da Bonomo et al. (2017) evidenziano la necessità di un'analisi dettagliata e multidimensionale del degrado dei materiali lapidei per guidare le strategie di conservazione.

Mentre Gizzi et al. (2016) si focalizzano sui fattori macro-ambientali, utilizzando analisi spaziali e dati climatici, Bonomo et al. (2017) forniscono un'analisi a livello micro delle proprietà fisiche della pietra e dei pattern specifici di degrado. Insieme, questi studi forniscono preziose indicazioni per la salvaguardia dei Sassi di Matera, promuovendo un approccio multidisciplinare che integri le variabili ambientali con le specificità dei materiali.

La complessità delle interazioni tra fattori naturali e antropici richiede interventi mirati e continuativi per garantire la conservazione a lungo termine dei monumenti e delle strutture storiche della città.





C





*Figura 13: Morfologie di degrado osservate sul costruito materano.
a-b)alveolizzazione, c)patina ©Vito Porcari, d)patina biologica ©Vito Porcari*

2.1.5 Cambiamento climatico e Sassi di Matera: quali rischi per il sito UNESCO?

2.1.5.1 Introduzione

Il degrado dei materiali lapidei è un processo complesso determinato sia da eventi estremi che da fenomeni di deterioramento continuo, di origine naturale o antropogenica.

Gli eventi estremi, come inondazioni e tempeste, sono difficili da prevedere e sono spesso descritti in termini stocastici, con una probabilità di accadimento che aumenta in risposta al cambiamento climatico. Al contrario, i processi di degrado che agiscono continuamente sulle pietre possono essere identificati e descritti quantitativamente, permettendo una valutazione più precisa del loro impatto nel tempo: manufatti umani e formazioni naturali possono essere soggetti a fenomeni di alterazione ed erosione, che si manifestano attraverso cambiamenti nella topografia superficiale, perdita di materiale o recessione delle superfici.

L'effetto dei parametri ambientali, come la concentrazione di inquinanti atmosferici, le precipitazioni e le variazioni di temperatura, viene spesso descritto tramite funzioni di danno, utilizzando tecniche di regressione lineare o multipla, e confrontato con le misurazioni delle perdite erosive. Secondo Strlič et al. (2013) [151], le funzioni di danno sono definite come funzioni che rappresentano cambiamenti inaccettabili nel patrimonio culturale, in relazione agli agenti di cambiamento. Di conseguenza, le espressioni matematiche utilizzate possono essere considerate strumenti per modellare le modifiche dei materiali, consentendo di valutare i danni sia passati che futuri.

Numerosi studi hanno cercato di quantificare il contributo dei vari processi al degrado complessivo della pietra, o di stimare il tasso medio di alterazione nel tempo. Le ricerche più ampie riguardano il marmo e il calcare, materiali che, essendo costituiti quasi interamente da carbonati di calcio (e talvolta di calcio e magnesio), presentano una relativa omogeneità chimica, rendendoli modelli ideali per studiare l'interazione con l'atmosfera [27,142]. Tuttavia, queste pietre mostrano una notevole variabilità nelle proprietà fisiche e nella tessitura, passando da marmi a bassa porosità o a calcari ad alta porosità, il che comporta differenze significative nella risposta ai parametri atmosferici e nei tassi di deterioramento [152,153].

Quando una roccia carbonatica entra in contatto con acqua piovana, ad esempio, possono verificarsi diverse reazioni chimiche [154,155]: la dissoluzione in pioggia pulita, conosciuta anche come *effetto carsico*, avviene quando la pietra carbonatica reagisce con l'acido carbonico derivato dalla CO_2 atmosferica disciolta. Il pH dell'acqua in equilibrio con la CO_2 atmosferica è di 5,65 [152,156–158]. L'effetto della pioggia acida, invece, dovuto principalmente agli acidi di origine antropogenica come H_2SO_4 e HNO_3 derivanti dalla combustione di combustibili fossili, accelera i processi di dissoluzione della pietra. Questo fenomeno provoca una maggiore perdita di ioni Ca^{2+} dal materiale lapideo. Inoltre, composti acidi come SO_2 e NO_x possono depositarsi sulla superficie della pietra tramite deposizione secca, formando Sali solubili. Quando l'umidità relativa

supera il limite di deliquescenza di questi Sali, essi vengono dissolti e rimossi dalla superficie, contribuendo ulteriormente al degrado della pietra [159].

Diversi modelli e funzioni di danno sono stati sviluppati per riprodurre i processi di alterazione che possono colpire un materiale carbonatico esposto a particolari condizioni ambientali. Tra questi, l'equazione di Lipfert (1989) [152] è la più comunemente utilizzata per stimare il tasso medio annuo di recessione superficiale basato sui valori medi dei parametri ambientali durante il periodo di interesse. Tale funzione di danno è valida per precipitazioni con un pH compreso tra 3 e 5 e include variabili critiche come le velocità di deposizione gassosa (VdS e VdN), che possono essere ottenute tramite test di esposizione in camera di simulazione e in campo. È importante notare che la funzione di Lipfert sia stata formulata per la calcite in generale, mentre molti altri modelli sono stati derivati dall'osservazione di calcare esposto. Nonostante l'equazione di Lipfert attribuisca un ruolo predominante all'effetto carsico, sottovalutando gli effetti degli inquinanti, essa rappresenta comunque una descrizione ragionevole del danno per un'ampia gamma di pietre da costruzione a bassa e media porosità in ambienti rurali. Alcuni autori hanno esteso l'applicazione di questa equazione per prevedere la recessione del calcare su lunghi periodi di tempo, in diversi scenari di cambiamento climatico secondo le proiezioni IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), utilizzandola per stimare i tassi di erosione in aree urbane e regioni estese [153,154,160].

Nell'attuale contesto di riduzione degli inquinanti acidi, il cambiamento climatico potrebbe giocare un ruolo sempre più significativo nel degrado dei monumenti e degli edifici storici. Tuttavia, nelle aree urbane dove persistono inquinanti atmosferici, le valutazioni della recessione potrebbero essere sottostimate. Nonostante una maggiore comprensione degli scenari climatici futuri, molte domande rimangono aperte riguardo alle tendenze future dei singoli processi di degrado.

Per affrontare i danni futuri, è possibile implementare una *manutenzione predittiva* basata su proiezioni climatiche, utilizzando modelli numerici del sistema climatico. Applicando questi modelli alle funzioni dose-risposta, si possono rappresentare e prevedere i diversi tipi di danni materiali in scenari climatici futuri.

2.1.5.2 Classificazione del clima materano

Secondo la classificazione climatica di Köppen-Geiger, ulteriormente validata per la seconda metà del XX secolo da Kottek et al. (2006) [161], il clima di Matera è identificato con il codice Csa. Tale codice identifica e descrive un clima mediterraneo caratterizzato da estati calde e secche e inverni miti e umidi.

Nel dettaglio, la prima lettera (C) identifica un clima temperato caldo, dove la temperatura media del mese più freddo (T_{min}) varia tra -3°C e $+18^{\circ}\text{C}$. La seconda lettera (s) indica una stagione estiva con precipitazioni scarse o nulle, mentre la terza lettera (a) denota estati con temperature massime medie (T_{max}) pari o superiori a $+22^{\circ}\text{C}$.

Una mappa semplificata della classificazione Köppen-Geiger per l'Europa, rivista da Kottek (2006), è illustrata nella Figura 14. Questa rappresentazione cartografica offre un quadro d'insieme delle principali zone climatiche, facilitando l'interpretazione delle risposte ambientali del patrimonio culturale alle condizioni climatiche specifiche.

Brimblecombe (2010) [162] ha condotto studi sui processi di alterazione meccanica e chimica nelle diverse regioni climatiche, utilizzando tale classificazione come base per correlare gli effetti sulle strutture costruite. Questi studi hanno evidenziato come differenti condizioni climatiche possano influenzare il degrado dei materiali costruttivi in modo variabile a seconda della zona climatica di appartenenza [Tab. 2].

È importante sottolineare che la classificazione di Köppen-Geiger è essenzialmente una classificazione termo-igrometrica, in quanto considera esclusivamente variabili come la temperatura e le precipitazioni. Di conseguenza, alcuni parametri climatici rilevanti, come l'umidità relativa (ad eccezione della sua manifestazione come precipitazione) e la velocità del vento, non sono inclusi nel sistema di classificazione.

Inoltre, un limite significativo del sistema è la mancata considerazione dell'inquinamento atmosferico, un fattore che ha avuto un impatto devastante sulle aree urbane durante il XX secolo. L'inquinamento atmosferico rappresenta una variabile cruciale che influisce sulla mappatura dei danni strutturali. Altri fattori trascurati includono la riduzione della deposizione salina con l'aumentare della distanza dalla costa. Va inoltre considerato che la climatologia si occupa principalmente di condizioni medie e non fornisce un'analisi dettagliata degli eventi estremi, i quali possono causare danni catastrofici alle strutture storiche. Nonostante ciò, le pressioni climatiche possono essere tradotte in un potenziale di danno attraverso funzioni dose-risposta o modelli di danno. Tuttavia, questi modelli non sono definiti con la stessa precisione per il clima come lo sono per l'inquinamento atmosferico. La mappatura del potenziale di danno risulta comunque utile per fornire informazioni strategiche ai fini della conservazione e gestione del patrimonio culturale.

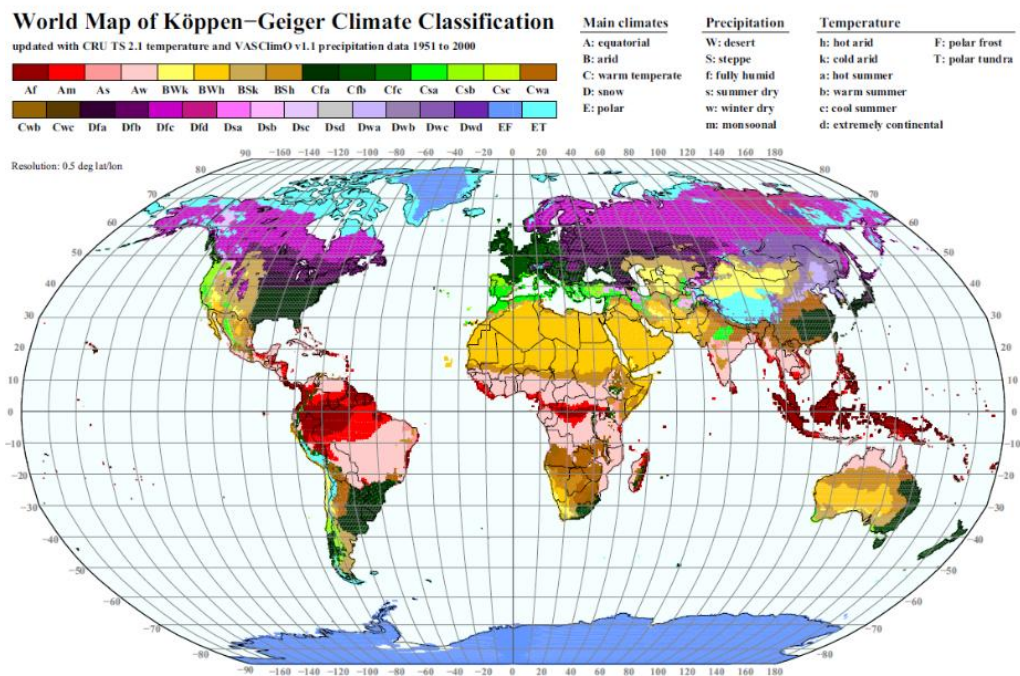


Figura 14: Mappa semplificata della classificazione Köppen-Geiger per l'Europa, rivista da Kottek (2006) [161].

Tabella 2. Principali effetti climatici osservati sul patrimonio basati sulle aree climatiche della classificazione Köppen-Geiger (Brimblecombe, 2010) [162].

Classificazione Köppen-Geiger	Clima	Effetti sul patrimonio
Bwh	Clima arido caldo	Terreno asciutto, poca vegetazione, possibilità di sabbia trasportata dal vento, stress termico estremo. Gli edifici in terra cruda sono frequenti in questo clima e i loro materiali sono friabili e ulteriormente sensibili alle rare ma intense piogge.
Csa	Clima caldo con estate calda	Stress termico sui materiali esposti a forte insolazione. Le condizioni asciutte in estate possono ridurre gli attacchi fungini.
Csbc	Clima caldo temperato con estati asciutte e calde	Condizioni più asciutte e minore variazione dell'umidità riducono i danni da sali, con qualche potenziale per l'alterazione da gelo. Potenziale stress termico sui materiali esposti a forte insolazione.
Cfab	Clima caldo completamente umido con estati calde	Condizioni umide e variazione dell'umidità causano danni da sali, eventi di congelamento occasionali presentano il potenziale per l'alterazione da gelo. Condizioni calde e umide possono portare ad attacchi fungini.
Dfb	Clima umido con estati calde	Minore variazione dell'umidità riduce i danni da sali, ma potenziale alterazione da gelo.
Dfc	Clima umido con estati fresche	Minore variazione dell'umidità riduce i danni da sali, ma le condizioni fredde invernali significano un alto potenziale per l'alterazione da gelo in primavera e autunno.
E	Clima polare o montano	Condizioni così fredde che il terreno può rimanere congelato. Questo è un potenziale problema se la temperatura aumenta causando il sollevamento del ghiaccio, poiché potrebbe disturbare i suoli e i siti archeologici.

2.1.5.3 Il dataset CHIRPS per la valutazione dell'andamento delle Precipitazioni a Matera

Per la valutazione dell'andamento pluviometrico e il suo impatto sul degrado dei materiali lapidei esposti nel sito UNESCO dei *Sassi di Matera*, è stato impiegato il dataset CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data). Tale dataset è stato selezionato per la capacità di integrare dati satellitari con rilevazioni provenienti da stazioni meteorologiche a terra e modelli climatici avanzati, fornendo stime delle precipitazioni con elevata precisione e coerenza. L'uso di sensori satellitari offre un vantaggio significativo, soprattutto in aree remote o difficilmente accessibili, dove la copertura delle stazioni meteorologiche è scarsa o assente. Tuttavia, questo approccio presenta alcune limitazioni: i sensori infrarossi, infatti, possono essere influenzati da variabili atmosferiche che non sempre riflettono la quantità di precipitazione effettiva. Inoltre, in condizioni meteorologiche estreme, come durante temporali molto forti, i sensori possono sottostimare o sovrastimare le precipitazioni a causa della saturazione del segnale o della complessità delle dinamiche atmosferiche. Al fine di migliorare l'accuratezza delle stime satellitari, quindi, CHIRPS integra i dati rilevati con osservazioni pluviometriche provenienti da stazioni meteorologiche a terra. Questo processo di calibrazione è essenziale per correggere i *bias* intrinseci nelle stime satellitari e per garantire che i dati riflettano con maggiore precisione le precipitazioni reali. Questa integrazione permette di ottenere stime di precipitazione più accurate e affidabili, combinando la copertura spaziale globale dei dati satellitari con la precisione locale delle osservazioni terrestri. Ne consegue che la qualità delle stime di CHIRPS dipende fortemente dalla densità e dall'accuratezza delle stazioni pluviometriche disponibili per la calibrazione.

I dati CHIRPS per l'area di Matera sono stati estratti con una risoluzione giornaliera, consentendo un'analisi dettagliata su scala temporale fine. Questa risoluzione è essenziale per identificare tendenze a breve termine e per analizzare la variabilità intra-stagionale delle precipitazioni.

I dati CHIRPS sono stati raggiunti tramite la piattaforma Google Earth Engine (GEE), che offre accesso gratuito a grandi dataset attraverso un'interfaccia front-end basata su JavaScript e sfruttando motori di calcolo di Google [163–167]. Per questo studio, sono stati considerati i dati relativi al periodo compreso tra il 1° gennaio 1981 e il 1° gennaio 2024 per l'area della città di Matera. I dati così acquisiti sono stati successivamente analizzati con i seguenti obiettivi:

1. Comprendere l'evoluzione temporale delle tendenze e dei fenomeni nel lungo periodo (1981–2024), valutando le variazioni interannuali e le tendenze delle medie stagionali.
2. Identificare eventi “anomali”, definiti come quelli superiori al 99° percentile.

L'evoluzione temporale delle precipitazioni nell'area di studio è stata analizzata tramite una funzione *Seasonal and Trend Decomposition using Loess* (STL). Questo algoritmo, particolarmente robusto per la scomposizione delle serie temporali, consente di separare i dati in tre componenti principali: tendenza, stagionalità e residui. Tale approccio è ideale per studiare serie temporali

caratterizzate da schemi stagionali e tendenze di lungo periodo, offrendo una visione dettagliata di ciascun elemento [168–171]. Nello specifico:

- La tendenza isola e descrive il cambiamento a lungo termine nella serie temporale, evidenziando direzione e velocità delle variazioni oltre le fluttuazioni stagionali o irregolari.
- La stagionalità individua variazioni regolari e prevedibili che si manifestano a intervalli specifici, come giornalieri, mensili o annuali.
- Il componente residuo comprende fluttuazioni non spiegabili né dalla tendenza né dalla stagionalità, fornendo informazioni su anomalie o eventi imprevedibili.

Per l'analisi delle variazioni stagionali delle precipitazioni, i dati sono stati suddivisi in base alle stagioni meteorologiche, come segue: Inverno (Dicembre, Gennaio, Febbraio), Primavera (Marzo, Aprile, Maggio), Estate (Giugno, Luglio, Agosto) e Autunno (Settembre, Ottobre, Novembre). Questa segmentazione stagionale è stata cruciale per comprendere come le precipitazioni variano nel corso dell'anno e per identificare eventuali cambiamenti nei pattern stagionali che potrebbero indicare un'evoluzione climatica nel corso degli anni. L'analisi stagionale ha permesso di isolare i periodi di maggiore e minore attività pluviometrica, evidenziando picchi stagionali e periodi di siccità, che sono particolarmente rilevanti per la gestione delle risorse idriche e per la pianificazione agricola.

Dai dati CHIRPS sono stati inoltre estratti gli eventi estremi, definiti come quelli con un valore superiore al 99° percentile (P_k). Il calcolo di tali eventi è stato effettuato seguendo l'equazione (5) [172]:

$$P_k = X_{(n+1) * k/100} \quad (4)$$

Dove:

- P_k rappresenta il k-esimo percentile da determinare.
- X è l'insieme dei dati ordinati dal più piccolo al più grande.
- n è il numero totale di osservazioni.
- k indica il percentile desiderato (ad esempio, 90, 95, 99).

Tali eventi sono spesso associati a rischi idrogeologici elevati, come frane, inondazioni ed erosione del suolo, e richiedono un'attenzione particolare in termini di pianificazione territoriale e misure di mitigazione.

I risultati dell'analisi sono stati visualizzati attraverso una serie di grafici descrittivi che rappresentano:

- L'andamento delle precipitazioni giornaliere: il grafico fornisce una panoramica delle variazioni quotidiane delle precipitazioni su un periodo esteso, permettendo di identificare trend a breve termine e la frequenza di giorni piovosi rispetto a quelli secchi.
- Le tendenze stagionali: i grafici stagionali mostrano come le precipitazioni si distribuiscono nel corso dell'anno, evidenziando picchi stagionali, come quelli tipici dei mesi invernali e autunnali, e periodi di siccità, tipicamente concentrati nei mesi estivi. Questa

analisi è fondamentale per comprendere il ciclo annuale delle precipitazioni e per rilevare eventuali anomalie stagionali.

- Gli eventi estremi: Rappresentano visivamente i giorni in cui le precipitazioni hanno superato il 99° percentile, identificando i periodi di maggiore intensità pluviometrica. Questi grafici sono particolarmente utili per la valutazione del rischio associato agli eventi estremi, fornendo una base solida per la pianificazione di interventi di emergenza e per la gestione delle risorse in scenari di eventi meteorologici intensi

Successivamente, i dati climatici ottenuti sono stati impiegati per guidare simulazioni predittive finalizzate alla valutazione delle condizioni future di degrado superficiale dei materiali lapidei.

2.1.5.4 La funzione di Lipfert per la stima della recessione superficiale

In questo studio è stato adottato un approccio metodologico basato su un modello consolidato e ampiamente riconosciuto nella letteratura scientifica per stimare la recessione superficiale della calcarenite di Gravina, esposta a specifiche condizioni atmosferiche locali.

La metodologia si è basata sull'impiego della funzione di Lipfert (5) per quantificare la perdita di materiale superficiale su scala micrometrica, con l'obiettivo di analizzare sia il degrado storico sia le proiezioni future in relazione all'andamento pluviometrico e alle variazioni delle concentrazioni di CO₂ atmosferica.

La scelta della funzione di Lipfert (5) è stata motivata dalla sua comprovata efficacia nel descrivere il processo di dissoluzione della calcite, un componente principale delle rocce carbonatiche, attraverso relazioni teoriche che tengono conto della solubilità del carbonato di calcio (CaCO₃) in equilibrio con diverse concentrazioni di anidride carbonica (CO₂) atmosferica. La validità di questo modello è stata ulteriormente confermata da numerosi studi sperimentali. Come riportato da Bonazza et al. (2009) [154], inoltre, l' *effetto carsico* è stato identificato come responsabile di una significativa perdita di materiale nelle rocce carbonatiche (50%-90%), a seconda delle condizioni atmosferiche specifiche.

La funzione di Lipfert adottata ai fini di questo studio è espressa dalla seguente equazione:

$$L=K_{1,2} \times R \quad (5)$$

dove:

- L rappresenta la recessione superficiale annuale (µm/anno),
- R è la quantità annuale di precipitazioni (m/anno),
- K è un coefficiente empirico che varia in funzione della concentrazione di CO₂ atmosferica.

Per stimare la recessione superficiale, sono stati considerati due scenari distinti, ciascuno caratterizzato da un diverso valore del coefficiente K, come riportato in Ciantelli et al. (2018) [19].

In particolare, sono stati utilizzati:

- $K_1=18,8 \mu\text{m/m}$, corrispondente a una concentrazione di CO_2 di 330 ppm, utilizzato per rappresentare le condizioni storiche,
- $K_2=21,8 \mu\text{m/m}$, relativo a una concentrazione di CO_2 di 750 ppm, generalmente utilizzato per le proiezioni future, supponendo un aumento della concentrazione di CO_2 in atmosfera.

In questo studio, K_1 è stato impiegato per stimare la recessione superficiale in passato e per delineare scenari futuri, mentre K_2 è stato utilizzato per fornire una previsione della recessione superficiale al 2040. L'obiettivo è stato, dunque, analizzare sia il degrado passato sia le tendenze future in relazione ai modelli di precipitazione, considerando due scenari caratterizzati da differenti concentrazioni atmosferiche di CO_2 , fornendo così una gamma di proiezioni che indicano gradi variabili di gravità.

Per stimare la recessione superficiale fino al 2040, è stato sviluppato un modello di regressione lineare (6) basato sull'analisi dei dati storici osservati.

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (6)$$

Dove:

- y è la variabile dipendente che si vuole prevedere o spiegare.
- x è la variabile indipendente utilizzata per prevedere y .
- β_0 è l'intercetta, ossia il valore di y quando x è pari a zero.
- β_1 è il coefficiente della variabile indipendente x e rappresenta la pendenza della retta di regressione. Questo coefficiente indica quanto varia y , in media, per ogni unità di incremento di x .
- ϵ è il termine di errore, che cattura tutte le influenze su y non spiegate da x .

I valori annuali di L sono stati sommati per calcolare la recessione superficiale cumulativa, rappresentando la quantità totale di materiale perso nel tempo. Questo processo è stato fondamentale per fornire una stima a lungo termine dell'impatto erosivo complessivo, evidenziando i potenziali danni strutturali ed estetici a monumenti e strutture architettoniche esposte a condizioni atmosferiche avverse.

2.1.5.5 Analisi dell'Andamento Pluviometrico a Matera: risultati

L'analisi delle precipitazioni giornaliere a Matera dal 1981 al 2023, condotta utilizzando il dataset CHIRPS, fornisce una comprensione delle dinamiche pluviometriche di questa area. L'andamento delle precipitazioni annuali tra il 1981 e il 2023 evidenzia una significativa variabilità interannuale [Fig. 15]. Nello specifico:

- Inizio degli anni '80: le precipitazioni annuali si attestano su valori moderati, oscillando tra 500 e 700 mm.
- Anni '90 e primi 2000: in questi decenni, si osserva una fluttuazione delle precipitazioni con alternanza di anni particolarmente piovosi e anni con precipitazioni ridotte, senza un trend evidente di crescita o decrescita.
- Anni recenti: Negli ultimi anni, si nota una lieve riduzione della media delle precipitazioni annuali, pur continuando a registrarsi variazioni significative da un anno all'altro.

Questa analisi indica che le precipitazioni a Matera sono caratterizzate da oscillazioni irregolari e cicli pluviometrici intermittenti.

La media delle precipitazioni giornaliere è stata calcolata in circa 1,74 mm/giorno, ma emerge una notevole dispersione dei dati intorno a questa media, con una deviazione standard di 4,98 mm/giorno. Questo valore indica una forte variabilità giornaliera, evidenziata anche dal fatto che il 50% dei giorni presenta precipitazioni pari a 0 mm, sottolineando la prevalenza di giornate asciutte. Tuttavia, eventi di precipitazione intensa, definiti come quelli che superano il 99° percentile (oltre 23,88 mm/giorno), sono stati registrati in 157 giorni durante il periodo di studio, dimostrando la frequente occorrenza di fenomeni pluviometrici estremi. Alcuni degli eventi più significativi includono:

- 8 ottobre 1989: 67,06 mm
- 26 gennaio 1996: 67,04 mm
- 2 ottobre 2000: 78,25 mm
- 13 ottobre 2010: 66,76 mm
- 26 settembre 2006: 63,78 mm

La decomposizione della serie temporale delle precipitazioni ha permesso di suddividere i dati in quattro componenti principali: l'osservato, il trend, la stagionalità e i residui [Fig. 16].

La componente osservata riflette l'andamento variabile delle precipitazioni.

Il trend a lungo termine, che rappresenta la direzione generale delle precipitazioni nel tempo, mostra fluttuazioni significative: fino agli anni 2000, si osserva una tendenza all'aumento delle precipitazioni, potenzialmente collegata a un incremento dell'umidità atmosferica o a cambiamenti nei modelli di circolazione globale. Successivamente, si rileva una fase di decrescita delle precipitazioni fino al 2015, seguita da un lieve incremento negli anni recenti.

L'analisi delle variazioni annuali conferma queste osservazioni: il 2009 emerge come l'anno con il massimo delle precipitazioni, con 906,88 mm, mentre il 2017 segna il minimo, con 469,56 mm.

La componente stagionale della serie temporale rivela un pattern ciclico ben definito, riflettendo la marcata stagionalità delle precipitazioni a Matera [Fig. 17]. Questo ciclo annuale è prevedibile, con picchi che ricorrono in determinati periodi dell'anno, tipicamente in autunno e primavera, stagioni caratterizzate da abbondanti precipitazioni. In particolare, l'autunno emerge come la stagione più piovosa, una caratteristica comune alle regioni del Mediterraneo, dove l'interazione tra sistemi ciclonici e l'umidità atmosferica genera piogge abbondanti.

I residui della decomposizione, che rappresentano la variabilità non spiegata dal *trend* o dalla stagionalità, indicano la presenza di fattori stocastici o eventi anomali non catturati dalle altre componenti del modello. Questi residui possono essere influenzati da variabili locali, come fenomeni atmosferici transitori, suggerendo la necessità di considerare ulteriori fattori o modelli più complessi per comprendere appieno le dinamiche pluviometriche.

L'identificazione degli eventi estremi, definiti come giorni con precipitazioni giornaliere superiori al 99° percentile, ha permesso di isolare i giorni con le piogge più intense, fornendo indicazioni preziose sulla potenziale esposizione del territorio a rischi idrogeologici.

La distribuzione di questi eventi non è uniforme, ma presenta concentrazioni in determinati anni, suggerendo possibili correlazioni con episodi climatici anomali o altri eventi meteorologici di eccezionale intensità [Fig.18]. L'aumento della frequenza e dell'intensità di tali eventi potrebbe essere un indicatore dei cambiamenti climatici in atto, con implicazioni dirette per la gestione del rischio e la pianificazione territoriale.

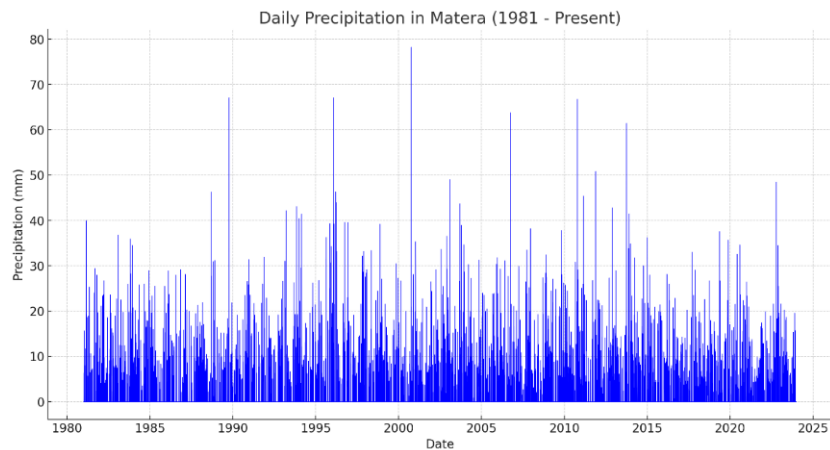


Figura 15: Andamento delle precipitazioni annuali tra il 1981 e il 2023

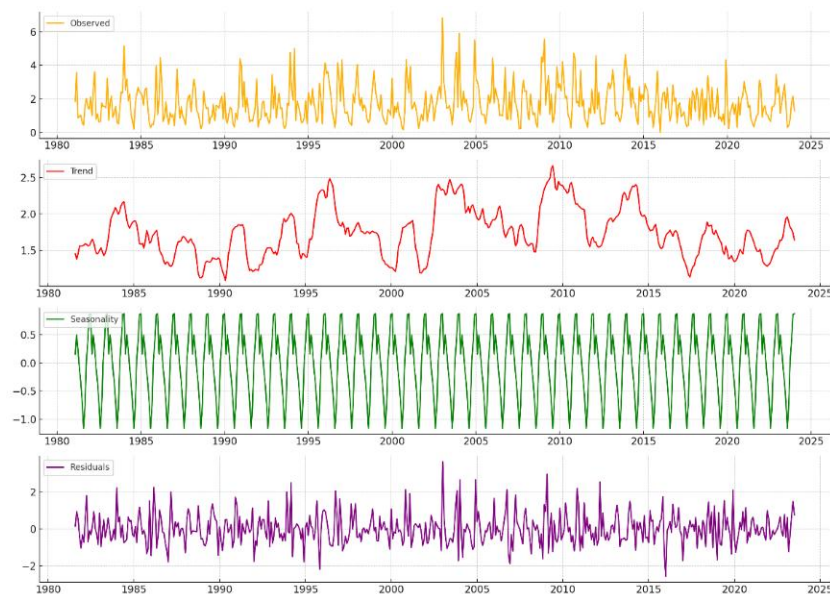


Figura 16: Decomposizione della serie temporale delle precipitazioni in quattro componenti principali: l'osservato, il trend, la stagionalità e i residui.

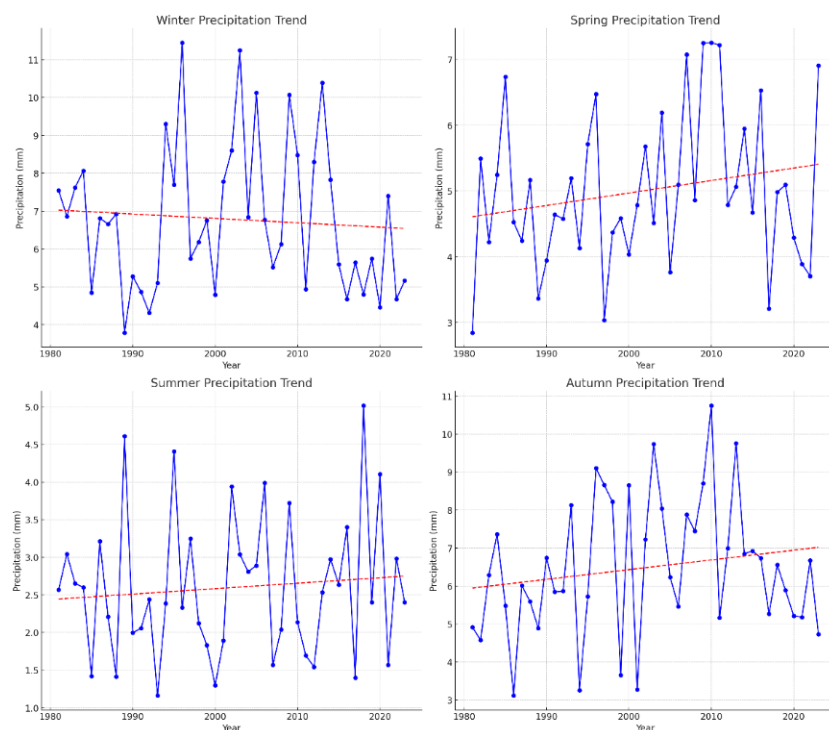


Figura 17: Analisi delle tendenze stagionali.

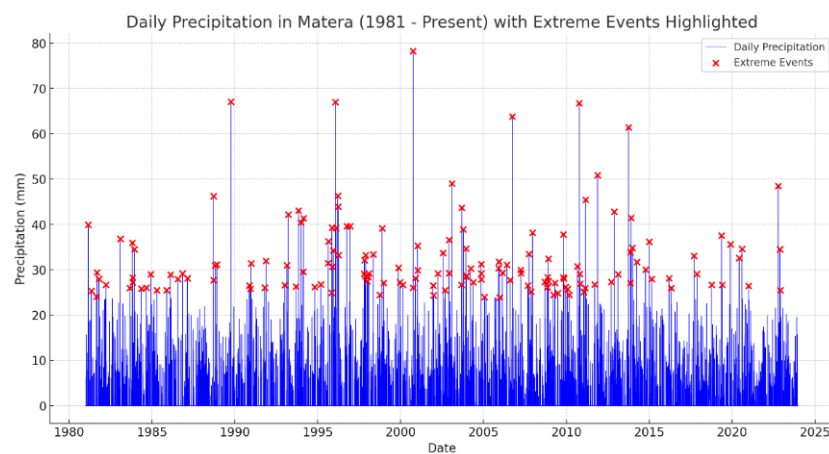


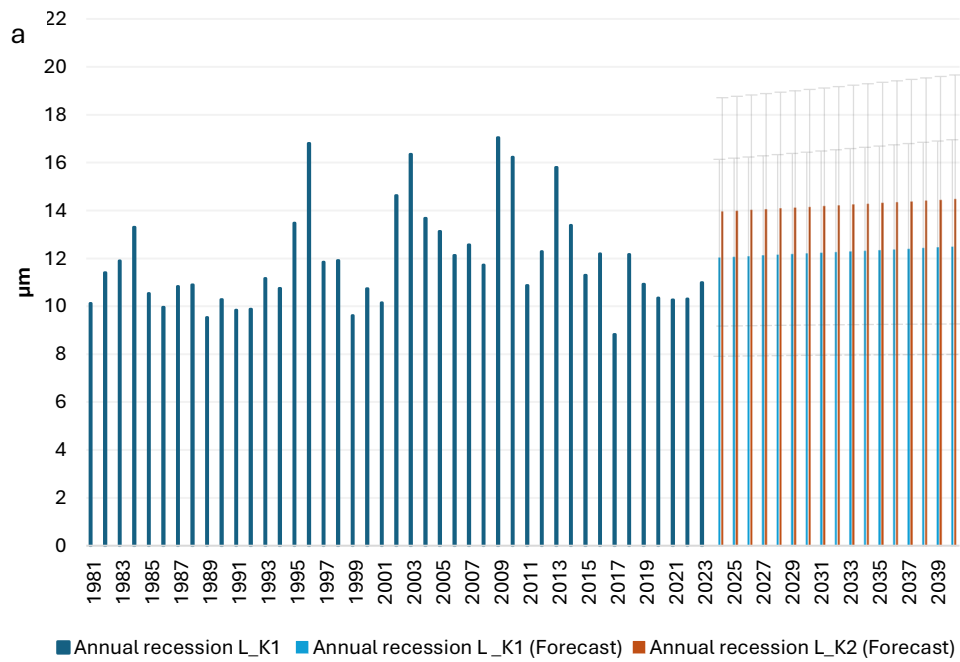
Figura 18: Identificazione degli eventi estremi, definiti come giorni con precipitazioni giornaliere superiori al 99° percentile.

2.1.5.6 Stima della recessione superficiale e proiezioni future: risultati

In relazione alle precipitazioni osservate, la recessione superficiale dei substrati carbonatici, calcolata utilizzando l'equazione di Lipfert (5) per la valutazione dell'effetto carsico, è stata valutata per due distinti scenari di concentrazione di CO₂: K₁ (330 ppm) e K₂ (750 ppm), coprendo un arco temporale dal 1981 al 2040. L'analisi ha permesso di quantificare il tasso medio annuale di recessione osservato e stimare la recessione futura.

- Scenario K₁: caratterizzato da una concentrazione relativamente bassa di CO₂, il tasso medio annuale di recessione osservato tra il 1981 e il 2023 è risultato pari a $11,91 \pm 2,1$ µm/anno. Questo valore mostra una tendenza all'aumento, con una previsione di $12,25 \pm 0,14$ µm/anno per il periodo 2024-2040. La proiezione dei dati indica che la recessione superficiale cumulativa dovrebbe raggiungere circa 0,72 mm entro il 2040. Questi risultati sottolineano un incremento graduale ma significativo nella perdita di materiale.
- Scenario K₂: caratterizzato da una concentrazione significativamente elevata di CO₂ (750 ppm), prevede un'ulteriore accelerazione del tasso di recessione superficiale fino a $14,20 \pm 0,16$ µm/anno durante il periodo 2024-2040. In questo scenario, la recessione cumulativa superficiale stimata per il 2040 è di circa 0,84 mm.

Le previsioni fino al 2040, accompagnate da un intervallo di confidenza del 95%, offrono una visione affidabile, pur riconoscendo l'incertezza insita nelle proiezioni a lungo termine. I dati relativi alle precipitazioni registrate nel periodo 1981-2023 indicano chiaramente un aumento della recessione superficiale in entrambi gli scenari. In particolare, nel caso di livelli più elevati di CO₂, come osservato nello scenario K₂, il tasso di recessione aumenta significativamente, evidenziando un forte effetto erosivo sui substrati carbonatici.



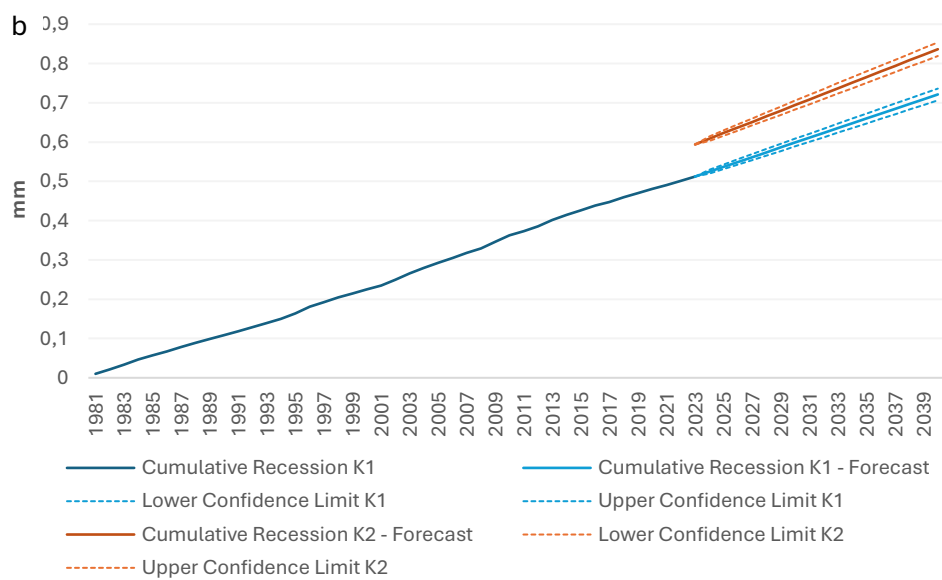


Figure 19: Recessione superficiale annuale (a) e cumulativa (b).
CO₂ K1 (330 ppm – storico e previsto) e K2 (750 ppm – previsto).

2.1.5.7 Conclusioni

Le analisi condotte sulla recessione superficiale dei substrati carbonatici mediante l'equazione di Lipfert (5) hanno fornito una valutazione quantitativa dell'impatto esercitato dalle elevate concentrazioni atmosferiche di CO₂ sull'erosione dei materiali lapidei. In particolare, le proiezioni indicano un incremento significativo del tasso di recessione superficiale nei contesti caratterizzati da elevate concentrazioni di CO₂, come evidenziato dal confronto tra lo scenario K₁, con 330 ppm di CO₂, e lo scenario K₂, con 750 ppm di CO₂.

I tassi di recessione calcolati nel periodo 1981-2023 sono $11,91 \pm 2,1$ µm/anno per K₁, superando sensibilmente il *valore tollerabile* stabilito da de la Fuente et al. (2011) [173] per materiali in carbonato di calcio. Il concetto di *valore tollerabile* applicato ai materiali costituenti i beni culturali rappresenta una soglia critica di degrado oltre la quale è necessario intervenire con operazioni di restauro per preservare l'integrità del manufatto. Questo parametro è stato determinato attraverso l'analisi empirica dei tassi di corrosione osservati in situazioni reali, correlati alle condizioni ambientali specifiche in cui i materiali sono esposti. Per i materiali metallici, come il bronzo fuso, il valore tollerabile di corrosione è stato calcolato in 0.6 µm/anno. Analogamente, per i materiali carbonatici, il valore tollerabile di erosione è stato stabilito in 8.0 µm/anno. Questo dato è particolarmente rilevante per la gestione dei beni culturali esposti a condizioni atmosferiche avverse, poiché consente di prevedere l'usura nel tempo e di pianificare interventi preventivi di conservazione.

Le proiezioni per il periodo 2024-2040 indicano un ulteriore incremento di questi tassi, prevedendo rispettivamente $12,25 \pm 0,14$ µm/anno per K₁ e $14,20 \pm 0,16$ µm/anno per K₂. Questi risultati sollevano serie preoccupazioni riguardo alla conservazione a lungo termine delle strutture storiche, suggerendo che, in assenza di misure di mitigazione adeguate, il degrado dei materiali potrebbe eccedere i limiti considerati accettabili per la loro conservazione.

D'altro canto, va tenuto presente che l'analisi dei dati pluviometrici, condotta utilizzando il dataset CHIRPS, introduce ulteriori incertezze che devono essere valutate con attenzione nella modellizzazione dei processi erosivi. La risoluzione spaziale e temporale di circa 5 km e la frequenza giornaliera del dataset, sebbene siano caratteristiche avanzate per le analisi pluviometriche, potrebbero non essere sufficienti per catturare con precisione le variazioni climatiche locali, in particolare in aree caratterizzate da complessità topografiche. Questa limitazione può introdurre *bias* significativi nelle stime delle precipitazioni, influenzando negativamente l'accuratezza nella valutazione dell'erosione dei substrati carbonatici. In contesti con variazioni topografiche rilevanti o microclimi locali, l'incapacità di rappresentare accuratamente gli eventi pluviometrici può compromettere la validità delle previsioni di erosione basate su questi dati.

Nonostante la robustezza quantitativa della funzione di Lipfert, è fondamentale riconoscere le sue limitazioni. La semplificazione della composizione chimica dell'acqua piovana, che non tiene conto della variabilità nella concentrazione di sostanze inquinanti, e la sottovalutazione di fattori critici come l'inquinamento

urbano e il deposito di aerosol, possono compromettere la precisione delle stime. L'assunzione di linearità nei trend ambientali futuri, su cui si basa il modello, potrebbe, inoltre, non essere adeguata a rappresentare le dinamiche complesse e non lineari tipiche dei cambiamenti climatici. Questa semplificazione rischia di sottovalutare l'impatto potenziale di fattori come l'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi climatici estremi, nonché delle modifiche nella chimica atmosferica, sulla velocità di degrado dei materiali.

Gli eventi climatici estremi rappresentano un ulteriore fattore di criticità che può accelerare il processo di erosione in modi che non sono adeguatamente catturati dai modelli lineari basati su medie annuali. Le precipitazioni intense, ad esempio, possono aumentare significativamente la quantità di acqua acida che interagisce con la superficie dei materiali, accelerando la dissoluzione dei carbonati e causando un'erosione rapida in brevi periodi. Le oscillazioni termiche estreme, come le ondate di calore seguite da raffreddamenti intensi, possono indurre stress termici che favoriscono la formazione di microfratture, aumentando la suscettibilità dei materiali alla recessione superficiale. Eventi come tempeste di polvere o incendi boschivi possono temporaneamente alterare la composizione chimica dell'atmosfera, aumentando la concentrazione di particelle e inquinanti acidi che intensificano la corrosione chimica delle superfici lapidee. I cicli di siccità e inondazioni, infine, possono creare condizioni cicliche di asciugatura e bagnatura che accelerano l'erosione, soprattutto nelle superfici già compromesse da fratture o crepe.

Alla luce di queste considerazioni, diventa imperativo sviluppare e implementare strategie di conservazione proattive e adattative che non solo integrino le proiezioni climatiche future, ma che considerino anche scenari di eventi estremi e la variabilità climatica.

L'efficacia di tali strategie sarà determinante per la conservazione del patrimonio culturale e architettonico in un contesto di cambiamenti climatici globali sempre più rapidi e intensi.

In conclusione, la recessione superficiale dei materiali lapidei, come proiettata dai modelli lineari basati su dati storici, fornisce una stima del degrado a lungo termine sotto condizioni climatiche medie. Tuttavia, la crescente frequenza e intensità degli eventi climatici estremi può alterare significativamente queste previsioni, introducendo una variabilità che non può essere completamente catturata dai modelli esistenti. Pertanto, per una gestione efficace della conservazione dei materiali, è essenziale sviluppare e implementare strategie di adattamento che riducano l'impatto potenziale di tali eventi. Questi sforzi non solo rafforzeranno la resilienza delle strutture storiche agli effetti erosivi del cambiamento climatico, ma garantiranno anche la conservazione a lungo termine del nostro patrimonio culturale in un contesto ambientale sempre più sfidante.

2.2 Materiali

2.2.1 Litotipi oggetto dello studio

La Calcarenite rappresenta il substrato geologico fondamentale su cui si erge la città di Matera, costituendo il materiale principale utilizzato per la costruzione dei quartieri storici.

Grazie alla sua facilità di lavorazione, questo materiale ha permesso la creazione di un ambiente abitativo unico, dove elementi costruiti e scavati si alternano in un paesaggio che è strettamente legato alla roccia [174].

Nei secoli XVII e XVIII, l'espansione urbana rese predominante l'attività estrattiva lungo l'antica Via Appia, dove si sviluppò l'area mineraria di La Vaglia, estesa per circa 2 km a nord-est della città. Con l'inizio del XX secolo, l'aumento della domanda di materiali da costruzione portò a uno sfruttamento intensivo delle cave fino alla fine del secolo [Fig. 20 a-c] [175].

Attualmente, in località La Vaglia, è attiva una sola cava.

Ai fini di questo studio, la caratterizzazione minero-petrografica e l'analisi delle proprietà fisico-meccaniche sono state condotte su campioni di calcarenite bioclastica a grana fine (FBC), prelevati dall'ex cava Petragallo, ora cava Loiudice, ancora attiva nella zona a nord-est di Matera.

Per garantire una rappresentatività adeguata della formazione geologica locale, sono stati prelevati campioni cubici da due cantieri distinti nel centro storico: via Casalnuovo nel Sasso Caveoso (SC) e via Civita nel Sasso Barisano (SB).

Inoltre, campioni della Formazione di Monte Castiglione [176], estratti nella zona di Montescaglioso (FM), sono stati analizzati per un confronto con la calcarenite locale [Fig. 21].

I test sull'efficacia, la compatibilità e la durabilità dei prodotti consolidanti destinati alla conservazione del patrimonio architettonico di Matera sono stati condotti su campioni di calcarenite provenienti dalla Cava Loiudice. Questi campioni, identificati come *Fine Bioclastic Calcarenite* (FBC), sono riconosciuti in letteratura come la *litofacies* maggiormente impiegata nel costruito storico materano [130]. L'elenco dei campioni oggetto dello studio è riportato in Appendice A, con indicazione delle analisi condotte per ciascuna fase dello studio (t_0 =time zero, t_1 =post applicazione, t_2 =post invecchiamento).

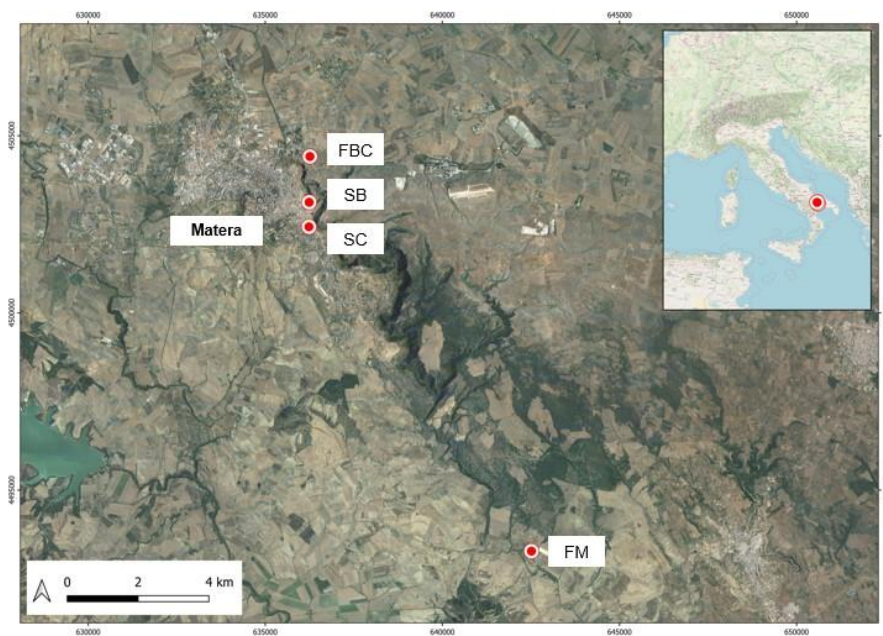


Figura 21: Localizzazione delle zone di prelievo dei campioni oggetto di studio.

a





Figura 20 a-c: Le cave di tufo di Matera nelle immagini di Michele Morelli.

3.2.2 Prodotti consolidanti

Alla luce dei limitati esempi di ricerche sull'impiego pratico dei consolidanti nel patrimonio storico costruito dei *Sassi di Matera* e della conseguente mancanza di comunicazione efficace tra la comunità scientifica e quella professionale locale, questo studio si è focalizzato sull'analisi dei consolidanti a base di nanoparticelle per materiali lapidei attualmente disponibili sul mercato.

I consolidanti a base di *nanocalce* hanno dimostrato di essere una metodologia promettente per il consolidamento di substrati carbonatici, superando le limitazioni dei trattamenti tradizionali con acqua e latte di calce e mantenendo al contempo la compatibilità chimica, come evidenziato da numerosi studi (§1.4.4) [89,177–180].

Parallelamente, i consolidanti a base di silicio e le dispersioni di *nanosilice*, sono stati applicati e studiati su una varietà di materiali carbonatici, mostrando risultati significativi [181–186].

In base a criteri osservativi preliminari, sono state selezionate tre formulazioni nanoparticellari per il presente studio: due di queste sono basate su nanoparticelle di idrossido di calcio disperse in alcol isopropilico con variazioni nelle dimensioni e concentrazioni, mentre la terza è una dispersione acquosa colloidale di silice con particelle di dimensioni nanometriche.

I tre prodotti commerciali sono stati confrontati con un consolidante a base di silicato di etile, utilizzato nei lavori di conservazione e restauro nel centro storico di Matera.

Le principali caratteristiche dei prodotti consolidanti selezionati sono riportate in Tabella 3.

Le schede tecniche dettagliate di ciascun consolidante sono allegate in appendice (Appendice B-E).

In particolare, i prodotti esaminati includono:

- Nanorestore® (Brevetto Italiano Consorzio CSGI-Università degli Studi di Firenze n° F1/96/A/000255, 31/10/1996), che consiste in nanoparticelle di idrossido di calcio (100-300 nm) disperse in isopropanolo alla concentrazione di 5 g/L;
- CaLoSil IP25® (IBZ Salzchemie GmbH & Co.KG, Germania), con nanoparticelle di idrossido di calcio (50-250 nm) disperse in isopropanolo alla concentrazione di 25 g/L;
- Nano ESTEL®, una dispersione acquosa colloidale di particelle di silice di dimensioni nanometriche (10-20 nm), che, in accordo con la scheda tecnica, è stato diluito con tre parti di acqua demineralizzata partendo da un prodotto concentrato al 30% di residuo secco;
- KSE 100®, una soluzione costituita da estere etilico dell'acido silicico, ossia silicato di etile, in miscela idrocarburica.

Tabella 3: Sintesi delle principali caratteristiche dei prodotti consolidanti selezionati

	Aspetto	Principio attivo	Solvente	Dimensioni particelle
Nanorestore®	bianco opalescente	Ca(OH) ₂ NPs	alcol isopropilico	100-300 nm
Calosil®	bianco opalescente	Ca(OH) ₂ NPs	alcol isopropilico	50-250 nm
Nano Estel®	incolore	SiO ₂ NPs	dispersione acquosa	10-20 nm
KSE 100®	incolore	esteri etilici dell'acido silicico	white spirit	

2.3 Metodi

2.3.1 Caratterizzazione dei litotipi

L'immagine di un paesaggio scolpito nella roccia, dove elementi costruiti e scavati si fondono armoniosamente, nasconde un significativo degrado del materiale lapideo, dovuto sia a fattori intrinseci che a dissesti differenziali, agenti atmosferici e azione antropica. La combinazione di questi fattori può compromettere in modo irreversibile le proprietà della pietra, causando gravi danni ai manufatti storici. Per tale motivo, è fondamentale che le caratteristiche e le proprietà dei materiali utilizzati siano determinate in modo preciso e, se necessario, quantitativo.

La conservazione del patrimonio costruito richiede una conoscenza dettagliata delle caratteristiche dei materiali costituenti e del loro stato di conservazione, permettendo di identificare i fattori di rischio e la necessità di interventi specifici. Basandosi su questa conoscenza, è possibile selezionare le strategie di intervento più efficaci e le soluzioni di conservazione più appropriate.

A tal fine, i campioni selezionati sono stati sottoposti, nella fase iniziale dello studio conoscitivo, a una serie di test di laboratorio per determinare la composizione mineralogica e petrografica, nonché le principali proprietà fisico-meccaniche.

Il protocollo operativo per la caratterizzazione minero-petrografica e fisico-meccanica iniziale del materiale lapideo, denominata per convenzione *Time zero* (t_0), ha coinvolto l'utilizzo di varie tecniche analitiche, di cui, di seguito, sono riportate le principali caratteristiche (i-ix). Tale approccio ha permesso di caratterizzare il materiale lapideo e di stabilire punti di riferimento fondamentali per monitorare le variazioni chimiche e fisico-meccaniche dovute all'applicazione dei trattamenti e alla fase di invecchiamento artificiale.

Per un approfondimento sulle tecniche analitiche, si rimanda alla letteratura specializzata.

i. Osservazione macroscopica e indagine stereomicroscopica

L'impiego di tale strumento è cruciale nella fase preliminare dell'analisi, poiché consente di preservare l'integrità del campione e di caratterizzarne i principali aspetti morfologici.

Le osservazioni delle superfici dei campioni sono state effettuate mediante uno stereomicroscopio a illuminazione a fibre ottiche Leica WILD M3Z, equipaggiato con una fotocamera digitale Leica MC170 HD per l'acquisizione delle immagini, con ingrandimenti progressivi da 6,5x a 40x [Fig. 22 a].

ii. Microscopia ottica in luce trasmessa polarizzata

L'analisi in sezione sottile tramite microscopio ottico polarizzatore è una tecnica consolidata per lo studio minero-petrografico dei materiali lapidei naturali e artificiali.

Le analisi, eseguite su sezioni sottili (spessore standard, 30 μm), sono in grado di fornire importanti informazioni sulla composizione mineralogica, composizione e caratterizzazione della matrice, porosità e percentuale di pori, ecc.

Lo studio petrografico dei materiali è stato eseguito su sezioni sottili, appositamente allestite, mediante microscopio ottico polarizzatore in luce trasmessa Leitz LABORLUX 12 POL S dotato di fotocamera digitale Leica MC170 HD.

Lo studio petrografico e la classificazione dei vari litotipi si è basata sulle pubblicazioni di riferimento Dunham (1962), Embry and Klován (1972) [187,188]. Lo studio della microfauna è stato condotto basandosi sul trattato di Flügel (1982) [189] e lo studio della calcarenite di Gravina e della calcarenite di Monte Castiglione condotto da Baccelle Scudeler et al. (2010) [128] [Fig. 22 b].

iii. Diffrazione a raggi X su polveri (XRPD)

La diffrazione dei raggi X (XRPD) è una tecnica utilizzata per l'identificazione qualitativa o semi-quantitativa delle principali fasi cristalline in un materiale e in eventuali prodotti di alterazione.

La composizione mineralogica dei materiali lapidei è stata definita su polvere (ottenuta previa macinatura fine con mortaio d'agata) mediante lo strumento Panalytical Empyrean a geometria Bragg-Brentano con una radiazione CuK α (operante a 40 kV e 40 mA) e un detector X'Celerator. L'interpretazione qualitativa e semi-quantitativa è stata eseguita mediante il software X'Pert HighScore Plus® (PANalytical) con il supporto del database PDF-2. L'informazione semiquantitativa è stata ottenuta mediante procedura RIR [190] [Fig. 22 c].

iv. Microscopia elettronica a scansione con microsonda elettronica (SEM-EDS)

La microscopia elettronica a scansione (SEM) è una tecnica avanzata che consente l'acquisizione di immagini ad altissima risoluzione della superficie dei campioni. Grazie alla sua capacità di rilevare dettagli a livello sub-micrometrico, lo strumento permette uno studio approfondito della morfologia delle superfici, rivelando strutture e caratteristiche invisibili con tecniche ottiche convenzionali.

In aggiunta, la spettroscopia a dispersione di energia dei raggi X (EDS) viene integrata con la microscopia elettronica a scansione, fornendo informazioni sulla composizione elementare dei materiali analizzati. Questa tecnica sfrutta l'emissione di raggi X caratteristici da parte degli elementi quando sono colpiti da un fascio di elettroni ad alta energia, consentendo di identificare gli elementi presenti nei campioni e determinarne la distribuzione.

La combinazione di SEM ed EDS permette così di ottenere un quadro completo della struttura e della composizione dei campioni, facilitando lo studio della morfologia delle superfici, della distribuzione degli elementi nei materiali.

Le indagini micro-morfologiche e tessiturali sono state condotte utilizzando un microscopio elettronico a scansione (SEM) ZEISS EVO15 dotato di un catodo LaB₆, integrato da un sistema di spettroscopia a raggi X a dispersione di energia (EDX) X Flash 6160 BRUKER per l'esecuzione di analisi elementali puntuali e di mappature di distribuzione degli elementi. Le indagini sono state condotte previo rivestimento con platino [Fig. 22 d].

v. *Porosimetria ad intrusione di mercurio (MIP)*

L'analisi del sistema poroso delle pietre da costruzione e ornamentali, insieme alla loro composizione e tessitura, è cruciale per valutare il comportamento sotto stress e stimarne la durabilità [30].

In particolare, la caratterizzazione della struttura porosa è fondamentale nella scienza della conservazione del patrimonio, poiché determina l'interazione della pietra con agenti ambientali come l'acqua piovana, il vento e le variazioni igrotermiche, che influenzano il degrado e la conseguente perdita di valore estetico.

Le proprietà tessiturali e porosimetriche di un materiale influenzano significativamente la permeabilità ai fluidi, definendo i tempi e le modalità di alterazione del materiale.

Diverse tecniche analitiche sono state sviluppate per la misurazione, descrizione e quantificazione delle strutture dei pori nelle rocce e nei materiali porosi [191,192].

Tra queste, la porosimetria a intrusione di mercurio (MIP) è una tecnica utilizzata per valutare la porosità aperta, la distribuzione dimensionale dei pori, l'area superficiale totale dei pori, il diametro medio dei pori e la tortuosità. Si basa sul principio che un liquido non bagnante, con un angolo di contatto superiore a 90°, penetra nei capillari sotto una pressione specifica. La relazione tra pressione e raggio dei pori è espressa dall'equazione di Washburn (7):

$$P = 2\gamma\cos\theta / r \quad (7)$$

dove:

- P è la pressione assoluta esercitata (N/m²)
- γ è la tensione superficiale del mercurio (N/M)
- θ è l'angolo di contatto del sistema mercurio/aria
- R è il raggio dei pori (μm)

In questo studio, per l'individuazione di macro- e meso- porosità sono stati utilizzati gli strumenti Pascal 140 e Pascal 240 Thermo Nicolet (CE Elantech, Inc., Lakewood, NJ, USA).

Sebbene la MIP sia ampiamente utilizzata, presenta alcune limitazioni: l'assunzione che i pori siano perfettamente cilindrici e che il mercurio si sposti dai pori più grandi a quelli più piccoli. Inoltre, a pressioni di intrusione elevate, la struttura dei pori può essere danneggiata, distorcendo la distribuzione delle dimensioni dei pori con un aumento artificiale della frazione di pori piccoli [Fig. 22 e].

vi. *Prove di compressione uniassiale*
(UCS, *uniaxial compressive strenght*)

Il test di resistenza alla compressione uniassiale viene utilizzato per determinare il valore massimo di stress raggiunto dal materiale prima del cedimento.

Le prove di compressione uniassiale sono state condotte su provini cubici con lato di 5 cm presso il *LabSCo - Laboratorio di Scienza delle Costruzioni*

dell'Università IUAV di Venezia, a cui va un sentito ringraziamento per la collaborazione.

vii. *Determinazione della velocità ultrasonica*
(UPV, *ultrasound pulse velocity*)

La prova, eseguita secondo le specifiche Raccomandazioni UNI EN 14579:2005 [193], consente di registrare il tempo impiegato dagli ultrasuoni per attraversare il campione. Tale dato è direttamente correlabile alla densità del materiale ed alle eventuali discontinuità presenti al suo interno.

Il fenomeno in esame riguarda la trasmissione di ultrasuoni attraverso il materiale, effettuata mediante trasduttori dotati di un dispositivo di sincronizzazione del segnale di origine.

Le misure in trasmissione sono state effettuate sui campioni cubici. Per ognuna delle tre direzioni (x, y, z) le misurazioni sono state replicate 3 volte. Lo strumento utilizzato è Matest C369N, trasduttori 55KHz. Per migliorare la conducibilità tra i trasduttori e i provini analizzati, è stato utilizzato un gel per ultrasuoni idrosolubile. Conoscendo il tempo t che intercorre tra l'emissione e la ricezione del segnale che attraversa il campione si è potuta calcolare la velocità utilizzando la formula (8):

$$V = L/T \quad (8)$$

dove:

- V è la velocità dell'impulso, espresso in m/s;
- L è la lunghezza del campione, espresso in m; T è il tempo, espresso in μ s, impiegato dall'impulso ad attraversare il provino.

Dai dati ottenuti, è stato inoltre calcolato l'indice di anisotropia in accordo con quanto riportato da Ruedrich et al. e Vasanelli et al. [194–196], secondo la formula (9):

$$\text{Anisotropy index \%} = ((V_{\max} - V_{\min}) / (V_{\max}) * 100) \quad (9)$$

viii. *Capacità di assorbimento d'acqua mediante spugna di contatto*
(WAC, *water absorption coefficient*)

Nell'ambito dei beni culturali, le valutazioni sull'assorbimento d'acqua e sulla capacità di imbibizione dei materiali lapidei rivestono un'importanza fondamentale e sono ampiamente utilizzate, in particolare per valutare lo stato di conservazione delle superfici.

In questo studio, la misurazione della capacità di assorbimento d'acqua mediante spugna di contatto è stata scelta a seguito della constatazione del basso grado di coesione del materiale lapideo in esame. Durante un tentativo preliminare di test di assorbimento d'acqua mediante immersione totale, si è osservata, infatti, una significativa perdita di peso nei campioni dovuta alla disgregazione del materiale, motivo per cui il test non è stato completato.

L'obiettivo di questa prova è valutare l'assorbimento d'acqua di un materiale lapideo per unità di superficie nel tempo, utilizzando una spugna imbevuta di acqua distillata (2 ml per una spugna di 2,7 cm di diametro) sottoposta a una

pressione costante e posta a contatto con la superficie del materiale per un tempo determinato di 3 minuti, in conformità alla norma [197]. La differenza di peso della spugna, misurata prima e dopo il test, fornisce un'indicazione della quantità di acqua assorbita dal materiale. Le analisi sono state ripetute tre volte per ciascun campione.

I risultati sono espressi come variazione dell'assorbimento d'acqua, secondo la formula (10):

$$WAC = g/(cm^2 \cdot min) \quad (10)$$

ix. *Analisi colorimetriche*

L'analisi colorimetrica rappresenta un metodo sistematico e oggettivo per l'identificazione e la quantificazione del colore. Attraverso l'impiego dell'analisi spettrocolorimetrica, è possibile non solo misurare il colore, ma anche monitorare nel tempo le variazioni cromatiche (ΔL) associate, nel contesto specifico dello studio, all'applicazione di trattamenti e alla loro stabilità. Questa metodologia non distruttiva è ampiamente utilizzata nel campo della ricerca sperimentale.

L'analisi spettrocolorimetrica si basa sulla rilevazione della riflettanza, espressa come percentuale dell'intensità della radiazione riflessa rispetto a quella incidente. Questi dati vengono successivamente convertiti in valori numerici attraverso un sistema di coordinate spaziali che rappresentano i colori presenti nello spettro visibile. Tra i vari spazi di colore, il CIELAB è uno dei più utilizzati, caratterizzato dalle coordinate L^* , a^* , b^* , che delineano uno spazio euclideo tridimensionale, facilitando l'interpretazione dei risultati.

Le misurazioni del colore sono state effettuate nello spazio colore CIE Lab*, dove L^* rappresenta la luminosità (valori positivi e negativi), mentre a^* e b^* sono le coordinate cromatiche che indicano rispettivamente le direzioni rosso-verde e giallo-blu. Le alterazioni cromatiche nei campioni sono espresse dal parametro ΔE , che quantifica la variazione cromatica totale in funzione delle variazioni di ciascuna coordinata cromatica (ΔL^* , Δa^* , Δb^*).

La variazione totale del colore ΔE^* è stata calcolata utilizzando la seguente formula (11):

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (11)$$

Secondo la norma EN 15886:2010, i dati cromatici sono stati acquisiti utilizzando uno spettrofotometro portatile CM-2600d Konica Minolta. Questo strumento, con un'area di misura di 5 mm di diametro, è stato configurato per quantificare le potenziali variazioni di colore includendo la componente speculare (SCI) [Fig. 22 f].

In accordo con quanto riportato da Mokrzycki e Tatol, nell'ambito di questo studio, si fa riferimento alla seguente classificazione [72,73,198]:

0 < ΔE < 1 – l'osservatore non nota la differenza

1 < ΔE < 2 – solo un osservatore esperto può notare la differenza

2 < ΔE < 3,5 – anche un osservatore inesperto nota la differenza

3,5 < ΔE < 5 – viene notata una chiara differenza di colore

ΔE > 5 – l'osservatore nota due colori diversi.



Figura 22 a-f: Strumentazione in dotazione al Laboratorio LAMA-Laboratorio Analisi di Materiali Antichi dell'Università IUAV di Venezia e utilizzata nell'ambito di questo studio.

2.3.2 Applicazione e valutazione dei trattamenti consolidanti

Alla luce delle considerazioni sul tema e per una maggiore vicinanza alla pratica reale, tenendo conto della porosità della pietra da trattare (circa 32,35%), i prodotti menzionati nel Paragrafo 2.2.2 sono stati applicati a pennello, ciascuno su quattro campioni di cava precedentemente caratterizzati nelle loro proprietà iniziali (t_0 , *Time zero*) [Tab. 4].

I consolidanti sono stati sottoposti ad agitazione preliminare di cinque minuti mediante un agitatore magnetico. La procedura di applicazione è stata ripetuta per un totale di cinque cicli, con un intervallo di 24 ore tra un'applicazione e l'altra (23°C, 70% RH).

Prima del trattamento, i campioni sono stati essiccati in stufa a 50°C fino al raggiungimento di una massa costante e successivamente conservati in essiccatore.

In accordo con quanto riportato nelle schede tecniche e nel lavoro di Otero et al.(2018,2019) [199,200], il quale descrive la completa carbonatazione dei prodotti a base di nanoparticelle di idrossido di calcio entro 28 giorni dall'applicazione in condizioni di umidità tra il 60% e l'80%, l'efficacia dei trattamenti di consolidamento è stata valutata 30 giorni dopo l'applicazione, utilizzando principalmente tecniche concepite per l'impiego pratico in situ.

Il protocollo per il monitoraggio dell'efficacia, della compatibilità e della durabilità dei trattamenti conservativi nel tempo ha previsto l'impiego dei seguenti strumenti e metodi:

- Stereomicroscopio, al fine di monitorare eventuali modifiche macroscopiche superficiali successive all'applicazione dei consolidanti.
- Stima della quantità di prodotto depositato, al fine di valutare la quantità di prodotto consolidante penetrato e depositato all'interno dei campioni lapidei utilizzati nei test mediante il monitoraggio periodico del peso dei campioni. I campioni sono stati pesati prima e dopo l'applicazione dei diversi consolidanti, nonché a distanza di 30 giorni. Le variazioni percentuali di prodotto penetrato e il residuo secco depositato all'interno del materiale lapideo ($\Delta p\%$) sono stati calcolati secondo la relazione (12):

$$\Delta p\% = (p_1 - p_0 / p_0) \cdot 100 \quad (12)$$

dove p_1 è il peso del campione dopo il trattamento (dopo l'evaporazione del solvente) e p_0 è il peso del campione prima del trattamento.

- Microscopia elettronica a scansione con microsonda elettronica (SEM-EDS): ha permesso l'osservazione della distribuzione dei prodotti consolidanti sulla sezione trasversale dei campioni trattati.
- Porosimetria a intrusione di mercurio (MIP), al fine di valutare come i trattamenti incidono sulla porosità e sulla distribuzione dei pori.
- Analisi delle variazioni delle coordinate colorimetriche, per monitorare nel tempo le variazioni cromatiche (ΔE) correlate all'applicazione dei trattamenti e alla loro stabilità [72,73,198].

- Valutazione della capacità di assorbimento d'acqua tramite spugna di contatto, metodo efficace per determinare l'efficacia dei trattamenti consolidanti e ottenere informazioni indirette sulla porosità del materiale. Questo approccio ha permesso di registrare le variazioni nel comportamento del materiale durante le diverse fasi della ricerca [197].
- Analisi della variazione della velocità ultrasonica, poiché i trattamenti di consolidamento incrementano la propagazione degli impulsi ultrasonici, indicando una maggiore coesione nel materiale lapideo [193].

Tabella 4: Elenco dei provini trattati per ciascun consolidante

NANORESTORE®	NANO ESTEL®	CALOSIL®	KSE 100®
FBC_5	FBC_6	FBC_7	FBC_8
FBC_14	FBC_17	FBC_20	FBC_23
FBC_15	FBC_18	FBC_21	FBC_24
FBC_16	FBC_19	FBC_22	FBC_25



Figura 23: Applicazione a pennello dei trattamenti consolidanti selezionati

2.3.3 Valutazione dell'efficacia a lungo termine dei trattamenti

Ogni materiale risponde in modo specifico agli stress ambientali, come le fluttuazioni climatiche, l'esposizione a temperature estreme e la cristallizzazione dei sali disciolti in acqua. Questi fattori contribuiscono a definire caratteristiche distintive nei processi di deterioramento dei materiali.

L'invecchiamento accelerato è una tecnica sperimentale che simula e accelera i processi di degrado tipici mediante condizioni estreme o cicli rapidi di variabili ambientali, quali temperatura, umidità relativa, concentrazione di O₂, CO, CO₂, SO_x, NO_x nell'aria e radiazioni UV. Questo approccio è applicato a una vasta gamma di materiali da costruzione, tra cui pietre, cementi, legno e rivestimenti plastici.

Attraverso trattamenti sperimentali in laboratorio e test di invecchiamento accelerato su campioni di roccia, è possibile osservare e studiare le reazioni dei materiali a tali fenomeni. Le prove di invecchiamento accelerato, integrate con analisi delle proprietà fisico-meccaniche, rappresentano uno strumento efficace per analizzare le cause, i meccanismi e gli effetti del degrado sui materiali lapidei utilizzati sia in edifici storici che moderni [201].

L'invecchiamento artificiale consente di valutare a lungo termine l'efficacia dei trattamenti conservativi, minimizzando il rischio di utilizzare prodotti inadatti che non rispondono alle reali esigenze dei manufatti storici.

Per garantire la qualità e la sostenibilità a lungo termine delle operazioni di conservazione, è essenziale implementare un programma diagnostico completo, che consideri anche l'invecchiamento come elemento integrante.

Una critica spesso sollevata nei confronti dell'invecchiamento accelerato è che il deterioramento causato da condizioni ambientali severe, come temperature elevate, alta umidità relativa e intensa radiazione solare, differisce dal deterioramento naturale che si verifica nel lungo periodo. Pertanto, i processi di invecchiamento accelerato e naturale non sono direttamente correlabili, e i dati derivati dall'invecchiamento accelerato dovrebbero essere confrontati e corroborati con dati empirici ottenuti dall'esposizione reale agli agenti atmosferici esterni.

È stato osservato, infatti, che le esposizioni cicliche artificiali tendono a essere più severe di quelle naturali. D'altro canto, i test di invecchiamento sono principalmente utilizzati per esaminare i processi di degrado secondo standard internazionali che prevedono l'applicazione di parametri aggravati. Le principali normative che regolano l'invecchiamento dei materiali da costruzione includono: UNI EN 12370:2001 [74], UNI EN 14066:2013 [202], UNI EN 14147:2007 [203] e UNI EN 12371:2010 [69,204].

L'invecchiamento mediante cicli di gelo-disgelo (F-T) consiste nel sottoporre campioni di pietra a condizioni controllate di congelamento e scongelamento. L'invecchiamento per cicli di riscaldamento-raffreddamento (H-C), secondo la norma UNI EN 14066:2013 [202], sottopone i campioni di pietra a condizioni estreme di riscaldamento (105°C) e raffreddamento (20°C).

Oltre agli invecchiamenti H-C e F-T, il test di cristallizzazione salina (UNI EN 12370:2001) [74] è utilizzato per valutare la resistenza dei materiali lapidei alla

cristallizzazione del sale, utilizzando una soluzione al 14% di Na_2SO_4 e un ambiente di essiccazione a 105°C . Diversi studi hanno investigato la cristallizzazione salina sui materiali lapidei, dimostrando come la pressione di cristallizzazione interna acceleri l'alterazione fisica naturale delle pietre.

La ricerca sulla simulazione completa dell'invecchiamento in contesti climatici e ambientali è ancora limitata. Tuttavia, alcuni autori nel campo dei geo-materiali hanno recentemente condotto test metodologici in cui campioni sono stati sottoposti a cicli di invecchiamento utilizzando le temperature massime e minime medie di un'area specifica (Nord del Portogallo), anziché quelle prescritte dallo standard [205].

I test di invecchiamento condotti con questo protocollo potrebbero essere impiegati anche per valutare strategicamente la risposta dei materiali destinati a specifici contesti climatici. Questi test in camera climatica sono utili anche per valutare la performance a lungo termine di rivestimenti avanzati, protettivi e consolidanti.

Sitzia et al. [147,206] hanno proposto l'utilizzo di una camera climatica SOLARBOX, configurata secondo i database meteorologici della Sardegna, per riprodurre esclusivamente l'irradiazione solare sulle pietre, introducendo il nuovo concetto di *ipotetica esposizione all'aperto*, assente in letteratura.

Tuttavia, il test presenta limitazioni, come l'utilizzo di dati meteorologici medi e la mancanza di variabilità giornaliera nelle condizioni ambientali simulate. Inoltre, alcuni processi ambientali reali, come l'azione del vento e l'impatto meccanico delle precipitazioni, non sono riprodotti accuratamente in camera climatica.

La necessità di una normativa internazionale che definisca le condizioni di esposizione è evidente per facilitare confronti tra materiali sottoposti a trattamenti simili e garantire coerenza e comparabilità.

Per tale ragione, ai fini di questo studio, i test, della durata complessiva di 200 ore, sono stati effettuati mediante camera climatica Atlas SUNTEST XXL secondo lo standard internazionale ISO 4892-2:2013 [207] di cui si riportano i principali parametri [Tab.5] [Fig. 24].

Con l'obiettivo di facilitare il monitoraggio *in situ* e permettere una valutazione agevole dei parametri fisico-meccanici in contesti reali, il monitoraggio a lungo termine dell'efficacia e della stabilità dei trattamenti ha tratto vantaggio dall'uso di tecniche di indagine non distruttive e a basso costo, precedentemente descritte (§ 2.3.1), tra cui:

- stima della variazione di peso
- indagini ultrasoniche [193]
- variazione della capacità di assorbimento d'acqua mediante *sponge tests* [197]
- spettrocolorimetro [72,73,198].

Tabella 5. Sintesi dei parametri impiegati nei test di invecchiamento artificiale

Cycle no.	Exposure period	Irradiance		Black-standard temperature C°	Chamber temperature C°	Relative humidity %
		Broadband (300 nm to 400 nm) W/m ²	Narrowband (340 nm) W/(m ² * nm)			
1	102 min dry	60 ± 2	0,51 ± 0,02	65 ± 3	38 ± 3	50 ± 10
	18 min water spray	60 ± 2	0,51 ± 0,02	—	—	



Figura 24: Avanzamento del test di invecchiamento artificiale condotto in camera climatica Atlas SUNTEST XXL secondo lo standard internazionale ISO 4892-2:2013

2.4 Caratterizzazione dei litotipi

2.4.1 Caratterizzazione mineralogico-petrografica dei campioni

Di seguito vengono riportati i risultati dello studio microscopico delle sezioni sottili, facendo riferimento alle descrizioni e alla terminologia impiegata da Baccelle Scuderel et al. (2010) nello studio archeometrico delle pietre del tempio di Hera (Tavole Palatine) di Metaponto e dei materiali lapidei dalle possibili cave di origine individuate nelle aree di Matera, Taranto e Montescaglioso (MT) [128]. Nello studio citato, gli autori descrivono i litotipi come caratteristici di depositi di piattaforma carbonatica con, occasionalmente, contributi di materiale silicocalstico. Essi sono descritti come macroscopicamente simili, ma contraddistinti da differenze tessiturali legate alla mutevole paleografia del bacino [128].

I campioni selezionati, rappresentativi della formazione della Calcarenite di Gravina e denominati FBC, SB e SC, presentano struttura isotropa e tessitura organogena-clastica-cristallina. La classazione è buona e il supporto è granulare, con contatti tra i granuli lunghi e tangenti. Il cemento intergranulare è costituito da un esile orlo isopaco e limpido di calcite sparitica, con cristalli aciculari.

La frazione carbonatica è dominante, con solo 1% di porzione silicatica data da rari cristalli di quarzo monocristallino. I granuli bioclastici, talvolta rimaneggiati e fratturati, consistono, prevalentemente, di abbondanti alghe rosse calcaree, ramificate. Sono inoltre presenti echinodermi, foraminiferi planctonici a guscio ialino e foraminiferi bentonici a guscio porcellanaceo (tipo Miliolidi), micritizzati e con mineralizzazione a goethite e cemento intragranulare microspartito, oltre a frammenti di molluschi a guscio fascicolato. Nei campioni FBC, provenienti dalla cava situata a nord-est della città di Matera, si rilevano, in minor quantità, gasteropodi e rari serpulidi, insieme a radiolari a guscio siliceo. Sono altresì presenti pochi frammenti di intraclasti carbonatici [Fig.25 a-b].

I campioni SB [Fig. 26 a-b] e SC [Fig. 27 a-b] si differenziano per la presenza, in tracce, di briozoi. Secondo la classificazione di Dunham (1962) [187] e Embry and Klovan (1971) [188], i campioni analizzati si possono classificare come *Grainstones* ben classati, con associazione prevalente di alghe ed echinodermi [Tab. 6].

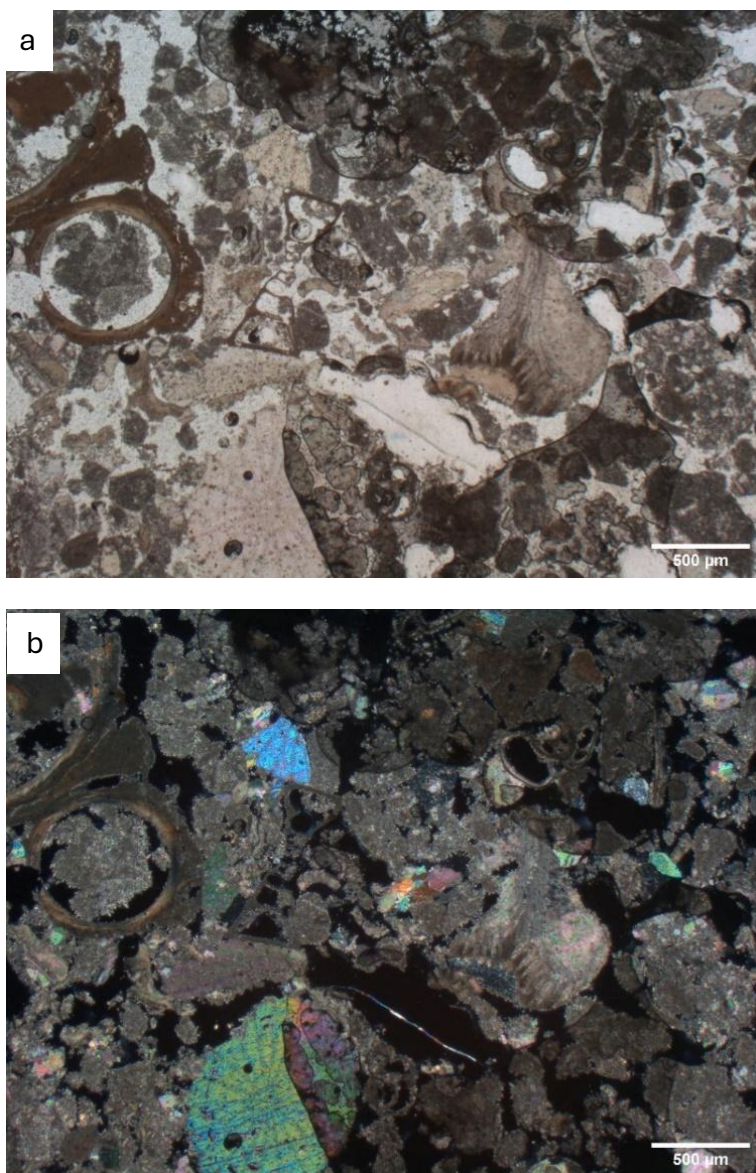


Figura 25: Immagini al microscopio ottico in luce trasmessa polarizzata ingrandimento 25X del campione FBC. Vista d'insieme a nicol paralleli (a) e incrociati (b).

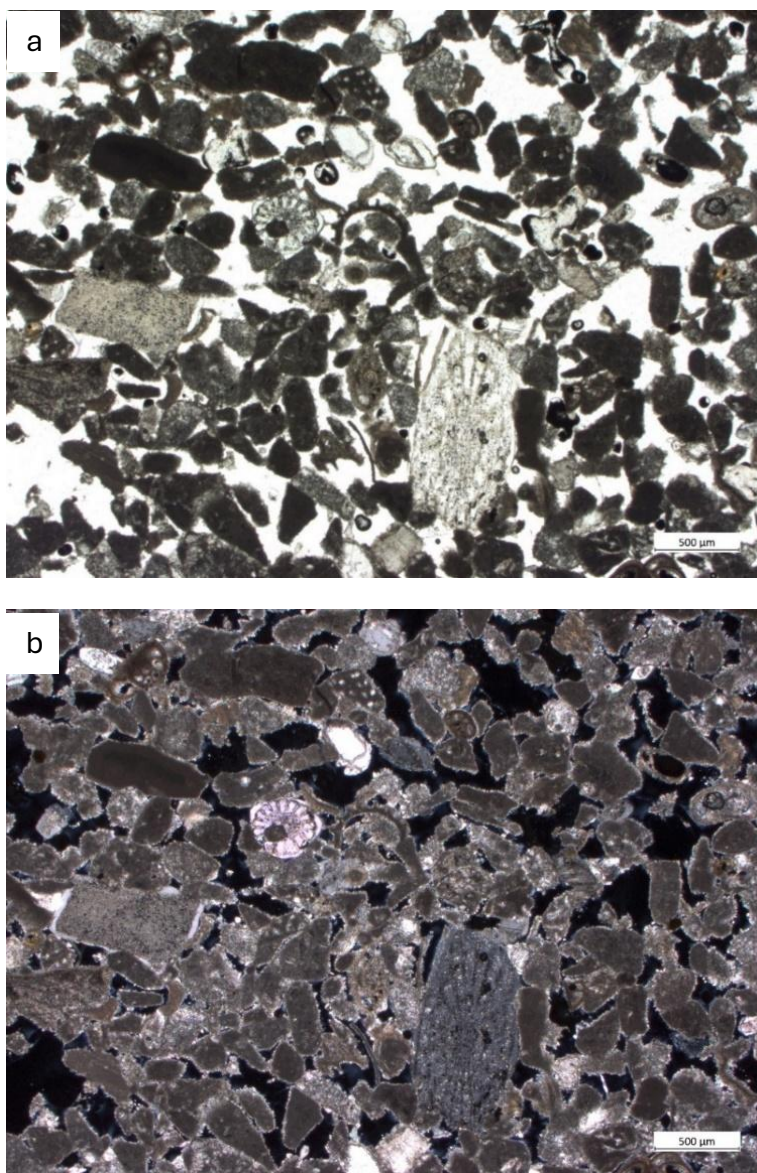


Figura 26: Immagini al microscopio ottico in luce trasmessa polarizzata ingrandimento 25X del campione SB. Vista d'insieme a nicol paralleli (a) e incrociati (b).

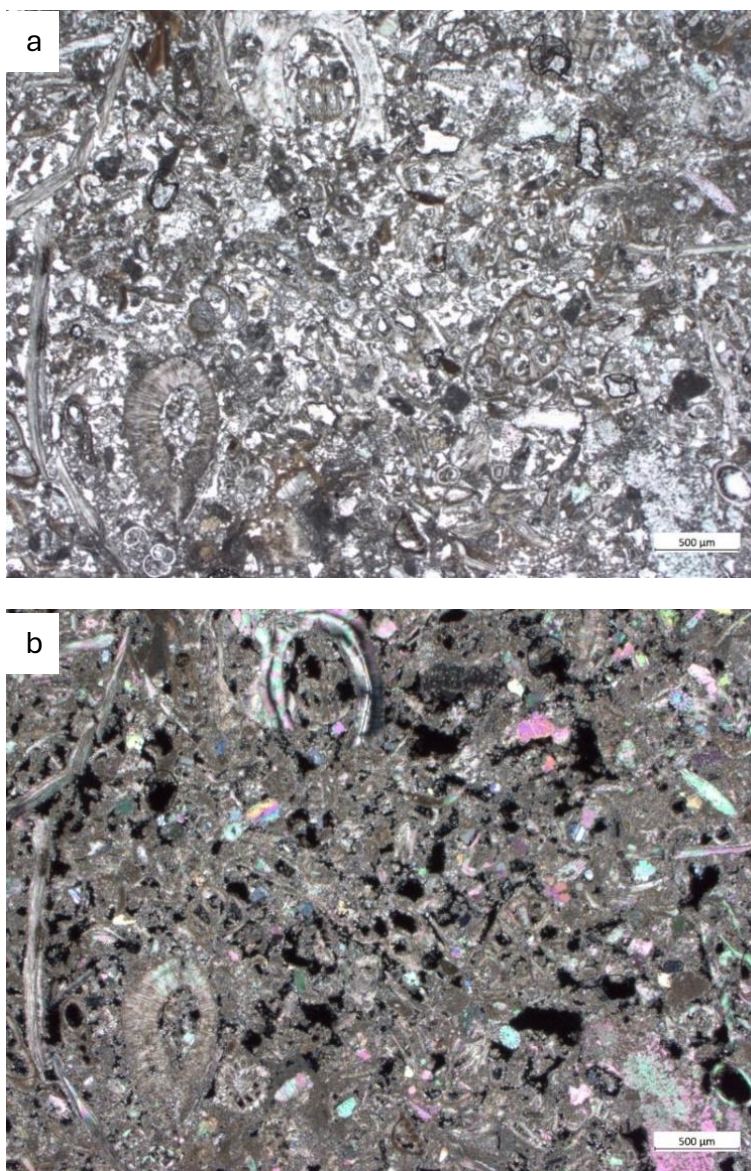


Figura 27: Immagini al microscopio ottico in luce trasmessa polarizzata ingrandimento 25X del campione SC. Vista d'insieme a nicol paralleli (a) e incrociati (b).

I campioni FM appartenenti alla formazione della Calcarenite di Monte Castiglione (Montescaglioso, MT) presentano supporto granulare, struttura isotropa e tessitura organogeno-clastica-cristallina. La classazione è media e i contatti tra i granuli risultano lunghi e tangenti. Il cemento intergranulare consiste in un esile orlo isopaco e limpido con cristalli aciculari di sparite.

Anche in questo caso, la frazione carbonatica è dominante, con solo 1% di porzione silicatica data da rari cristalli di quarzo monocristallino. Gli elementi allochimici, tolti alcuni rari intraclasti, corrispondono essenzialmente a bioclastici, talora rimaneggiati, con prevalenza di Alghe rosse calcaree, ramificate, seguite, da Echinodermi, Foraminiferi planctonici a guscio ialino, Foraminiferi bentonici a guscio porcellanaceo con mineralizzazione a goethite, frequenti frammenti di molluschi a guscio fascicolato, Briozoi, Serpulidi e, in minor quantità, Gasteropodi [Fig. 28 a-b].

Secondo la classificazione di Dunham (1962) [187] e Embry and Klovan (1971) [188], in virtù della loro classazione media determinata dalla presenza di oltre il 10% di bioclasti con dimensioni superiori ai 2 mm, entrambi i campioni si classificano come *Grainstone/Rudstone* con associazione prevalente di Alghe, Echinodermi e Molluschi [Tab. 6].

I risultati dell'analisi XRPD hanno evidenziato una chiara predominanza della componente calcitica, associata a tracce di quarzo, in tutti i campioni rappresentativi della Formazione della Calcarenite di Gravina e della Formazione della Calcarenite di Monte Castiglione. Una minore aliquota dolomitica è stata rilevata nei campioni SB, SC, FM. [Fig. 29-32] [Tab. 7].

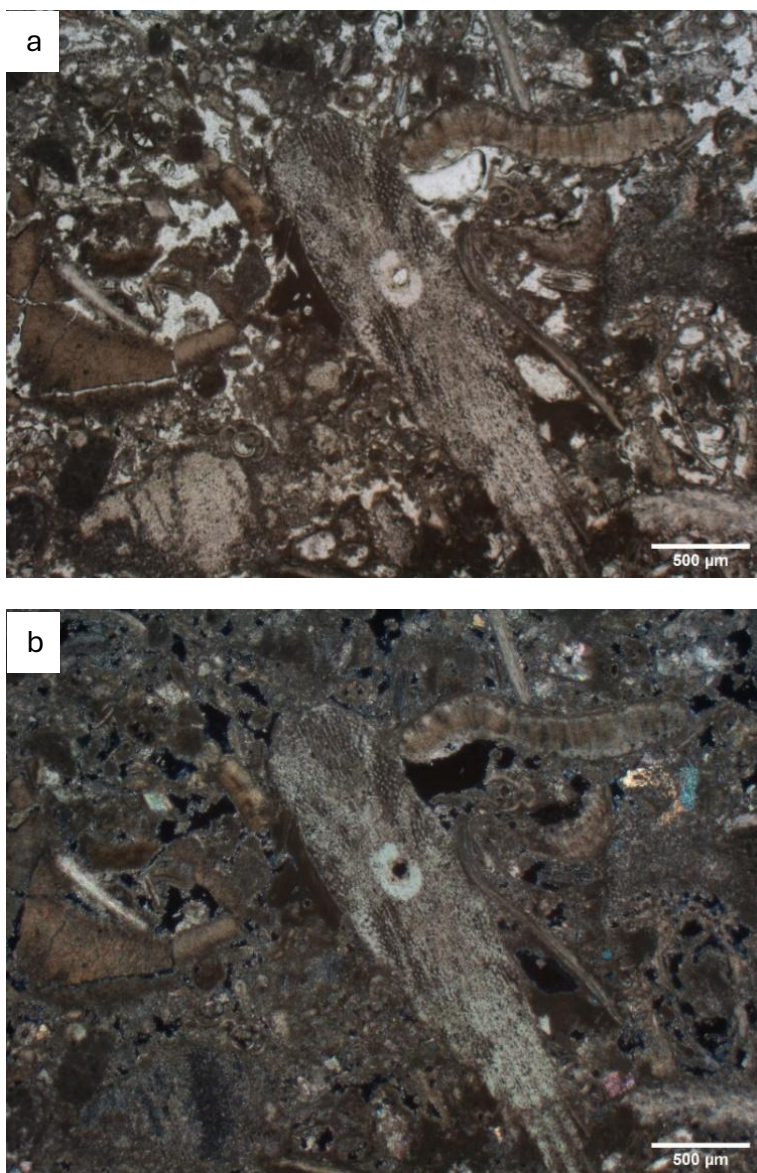
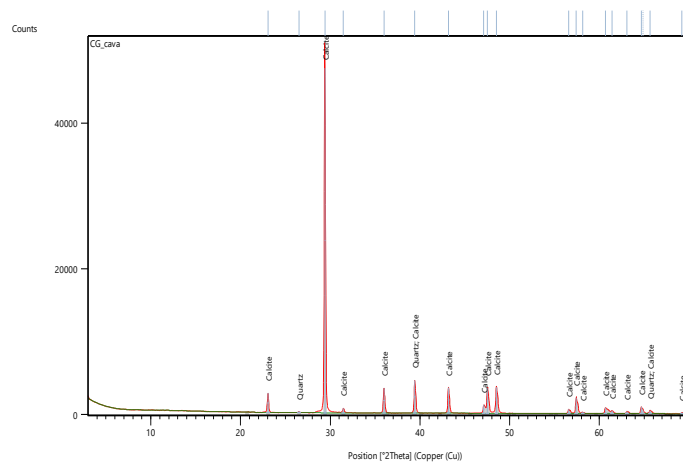


Figura 28: Immagini al microscopio ottico in luce trasmessa polarizzata ingrandimento 25X del campione FM. Vista d'insieme a nicol paralleli (a) e incrociati (b).

Tabella 6: Descrizione petrografica semiquantitativa dei campioni esaminati. Abbondanze reciproche: ++++ molto abbondanti; +++ abbondanti; ++ frequenti; + scarso; ± in tracce

Campioni	Allochemi										Altri granuli		Tessitural features						Classificazione (DUNHAM 1962; EMBRY & KLOVAN 1971)
	Radiolaria	Foraminifera		Echinodermat a	Bivalva	Gasteropoda	Mollusca	Calcareous algae	Briozoa	Serpulidi	Intraclasts	Classazione	Cemento	Fango	Porosità	Struttura	Tessitura		
		P	B																
FBC	±	+	+	++		±	+	++++		±?	±	Goethite/limonite; quarzo raro	Alta	+	-	+++	Isotropa	Organogena-clastica cristallina	Grainstone
SB		+	+	++			+	++++	±			Goethite/limonite; quarzo raro	Alta	+	-	++++	Isotropa	Organogena-clastica cristallina	Grainstone
SC		++	++	+++	++		++	++	±?			Goethite/limonite; quarzo raro	Alta	++	-	++	Isotropa	Organogena-clastica cristallina	Grainstone
CM		+	+	++		±	++	+++	+	+	±	Goethite/limonite; quarzo raro	Media	+	-	++	Isotropa	Organogena-clastica cristallina	Grainstone/Rudstone



FBC

■ Cal ■ Qz

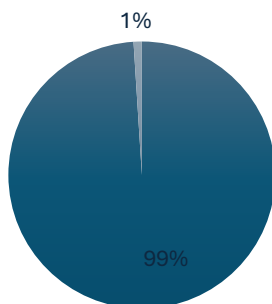
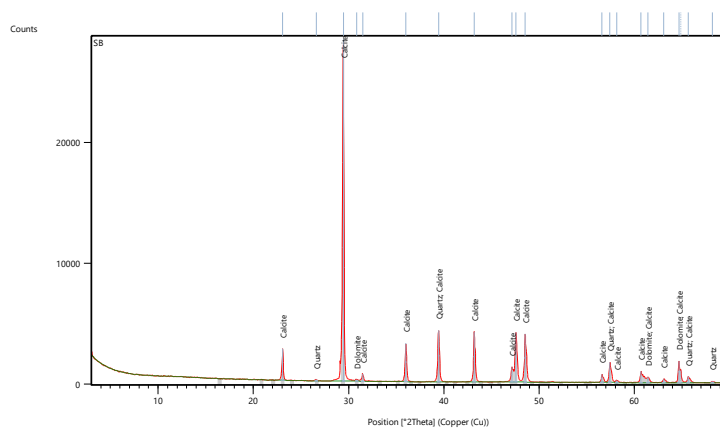


Figura 29: Diffattogramma del campione FBC. Sono riportate le componenti mineralogiche riconosciute per ogni picco. A destra, grafico che riassume la composizione dei campioni ottenuti da XRPD. Abbreviazioni dei campioni come in Tabella 6.



SB

■ Cal ■ Dol ■ Qz

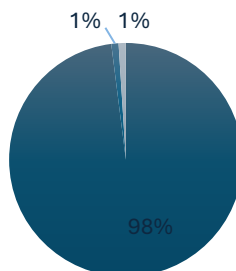


Figura 30: Diffratogramma del campione SB. Sono riportate le componenti mineralogiche riconosciute per ogni picco. A destra, grafico che riassume la composizione dei campioni ottenuti da XRPD. Abbreviazioni dei campioni come in Tabella 6.

Tabella 7: Analisi XRPD di tutti i campioni esaminati. Abbreviazioni secondo Warr, 2021 [208]: Cal = calcite; Dol = dolomite; Qz = quarzo. Abbondanze reciproche: +++++ molto abbondanti; +++ abbondanti; ++ frequenti; + scarso; ± in tracce.

	XRPD		
	Cal	Dol	Qz
FBC	+++++	-	±
SB	+++++	+	+
SC	+++++	+	±
FM	+++++	+	+

2.4.2 Determinazione dei parametri fisico-meccanici

I risultati ottenuti mediante porosimetria ad intrusione di mercurio sono riportati in Tabella 8.

Si riportano i dati relativi alla porosità accessibile e al raggio medio dei pori, misurati per i campioni rappresentativi della Formazione della Calcarenite di Gravina (FBC, SB, SC) e della Formazione della Calcarenite di Monte Castiglione (FM). Vengono inoltre presentati i valori di area superficiale dei pori, insieme ai valori di densità reale e apparente misurati.

I grafici relativi al volume cumulativo (mm^3/g) e alla distribuzione del volume dei pori (dV/dR) in funzione del raggio, sono riportati nelle Figure 33-36.

Per meglio rappresentare la distribuzione delle porosità, è stato utilizzato il volume relativo percentuale intruso in determinati range dimensionali, esplicitati nella Tabella 9 e nel grafico di sintesi e confronto Figura 37.

Il valore medio più basso di porosità accessibile è stato misurato per i campioni FBC ($32,35\% \pm 0,7\%$).

La frazione di volume occupata dai pori accessibili nei campioni SB è compresa in un range tra il 37,1% e il 46,03%, con una media del $40,95\% \pm 4,59\%$, mentre i campioni SC mostrano una porosità accessibile media del $45,76\% \pm 0,6\%$.

I campioni FM, rappresentativi della Formazione della Calcarenite di Gravina, presentano un valore medio di porosità accessibile pari al $41,93\% \pm 1,70\%$.

Le curve porosimetriche ottenute rivelano che le calcareniti esaminate presentano una porosità significativa e una gamma molto ampia di dimensioni dei pori, evidenziando l'eterogeneità dei sistemi di rete dei pori.

Le curve relative ai campioni FBC e SB mostrano un picco prominente nell'intervallo di dimensione dei pori compreso tra 10-100 μm e un ulteriore picco nell'intervallo 0,1-1 μm . Come si può osservare in Tabella 9, per i campioni FBC e SB circa il 50% del volume relativo dei pori è compreso in un intervallo tra 10 e 50 μm .

I campioni SC, appartenenti alla medesima formazione, mostrano una distribuzione dimensionale dei pori meno eterogenea, concentrata nell'intervallo 0,5-10 μm , con il 60% del volume relativo nell'intervallo dimensionale compreso tra 1 e 10 μm .

Le curva relativa ai campioni FM, rappresentativi della formazione della calcarenite di Monte Castiglione, un picco in corrispondenza dei pori con dimensioni comprese nell'intervallo 1-10 μm .

La distribuzione delle dimensioni dei pori è un fattore cruciale che influenza l'assorbimento e il trasporto dei liquidi all'interno dei materiali lapidei. La diffusione dell'acqua attraverso questi materiali è strettamente legata sia alle dimensioni che alla distribuzione dei pori. Tale distribuzione incide notevolmente sulla resistenza dei materiali lapidei ai processi di degrado, soprattutto in condizioni di esposizione a fenomeni di cristallizzazione dei sali e cicli di gelo-disgelo, che possono causare espansioni e contrazioni ripetute, portando alla disgregazione del materiale [30,37,39,40,196,209–213].

È importante notare che due rocce con una porosità totale simile possono avere livelli di resistenza al degrado differenti, a seconda delle specifiche distribuzioni

delle dimensioni dei pori. Studi condotti sul campo, in laboratorio e tramite modelli teorici hanno identificato una serie di micropori particolarmente rilevanti nel favorire i danni causati dalla cristallizzazione.

I range dimensionali osservati in diversi studi spaziano da raggi inferiori a 0,05 μm [40], 0,1 μm [214], 0,5 μm [215], 1 μm [35], 2,5 μm [144], fino a intervalli di pori tra 0,5 e 5 μm [38].

In questo studio, i campioni SC e FM presentano una porosità caratterizzata da pori con un raggio inferiore a 1 μm pari, rispettivamente, al $28 \pm 4\%$ e il $20 \pm 0,9\%$ del volume totale. Nei campioni FBC e SB, i pori di questa dimensione costituiscono solo il $18 \pm 0,9\%$ e il $14 \pm 0,8\%$ del volume totale.

In Tabella 10 si riportano i risultati dei test di assorbimento d'acqua tramite spugna di contatto (WAC). I valori di capacità di assorbimento d'acqua, osservati per i campioni appartenenti alla formazione della Calcarenite di Gravina (campioni FBC, SB, SC) oscillano tra 0,79 $\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$ e 1,26 $\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$, con valore medio pari a $0,95 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$. Nello specifico, il valore medio per i campioni provenienti dalla zona di cava a nord-est di Matera (FBC) è di $0,94 \pm 0,11 \text{ g}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$. I campioni di Sasso Barisano (SB) e Sasso Caveoso (SC), nonostante appartenenti alla stessa formazione geologica, mostrano valori medi di capacità di assorbimento d'acqua pari a $1,08 \pm 0,09$ e $0,93 \pm 0,11 \text{ g}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$. I campioni appartenenti alla formazione della Calcarenite di Monte Castiglione (FM) mostrano valori medi di capacità di assorbimento d'acqua pari a $0,58 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$.

Tabella 8: risultati ottenuti mediante porosimetria ad intrusione di mercurio

	Porosità accessibile	Raggio medio dei pori	Area superficiale dei pori	Densità apparente	Densità reale
	%	μm	m ² /g	g/cm ³	g/cm ³
FBC	32,35 ± 0,70	0,393 ± 0,03	0,917 ± 0,09	1,802 ± 0,05	2,664 ± 0,08
SB	40,95 ± 4,59	0,574 ± 0,17	0,857 ± 0,25	1,765 ± 0,17	3,016 ± 0,54
SC	45,76 ± 0,60	0,351 ± 0,03	1,606 ± 0,04	1,635 ± 0,09	3,015 ± 0,18
FM	41,93 ± 1,70	0,510 ± 0,11	1,058 ± 0,17	1,058 ± 0,17	2,746 ± 0,05

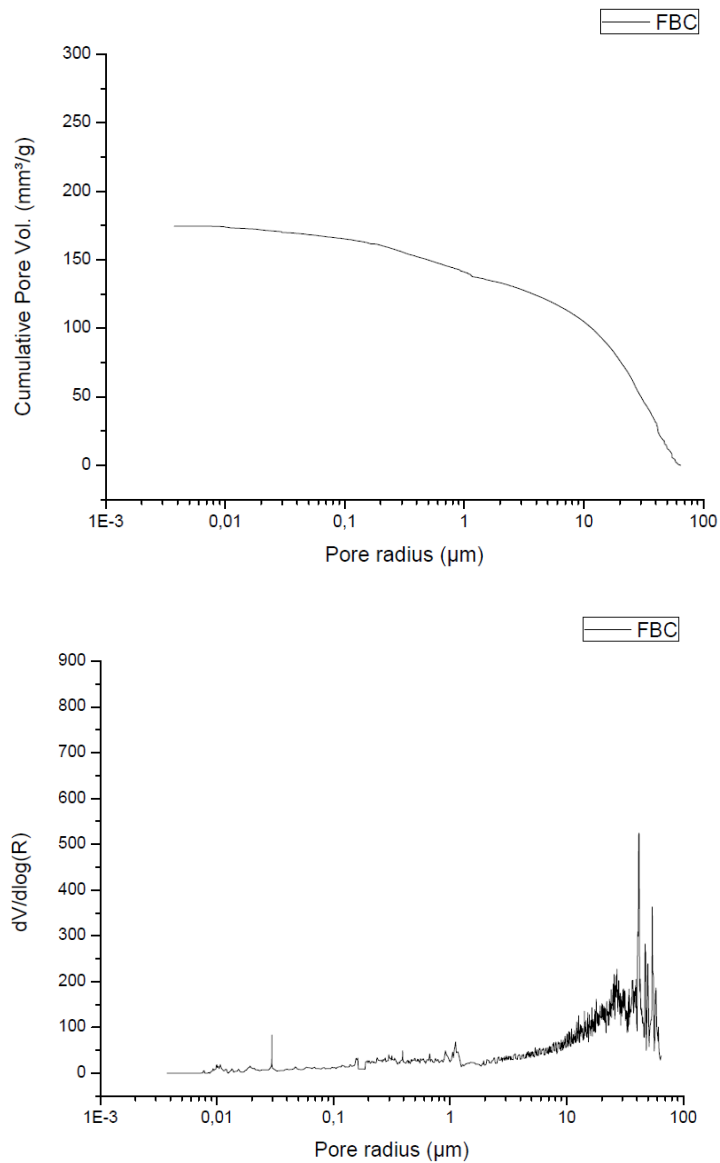


Figura 33: grafici relativi a: a) volume cumulativo (mm³/g) in funzione del raggio e b) distribuzione del volume dei pori (dV/dR) in funzione del raggio per i campioni FBC

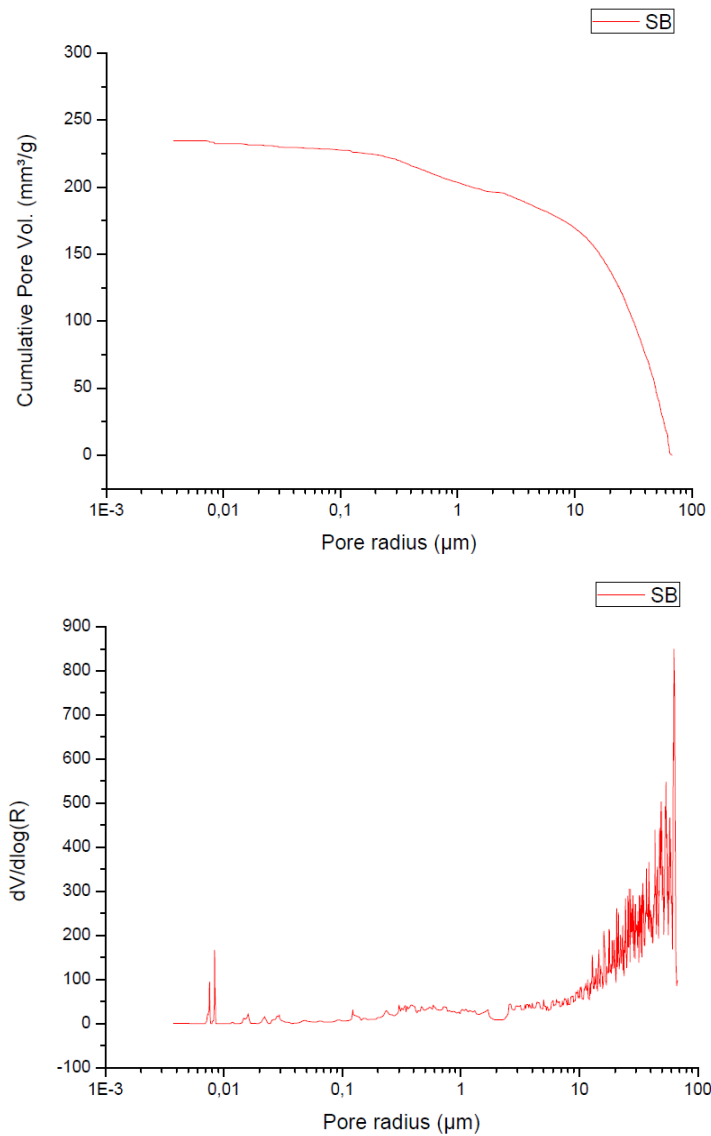


Figura 34: grafici relativi a: a) volume cumulativo (mm³/g) in funzione del raggio e b) distribuzione del volume dei pori (dV/dR) in funzione del raggio per i campioni SB.

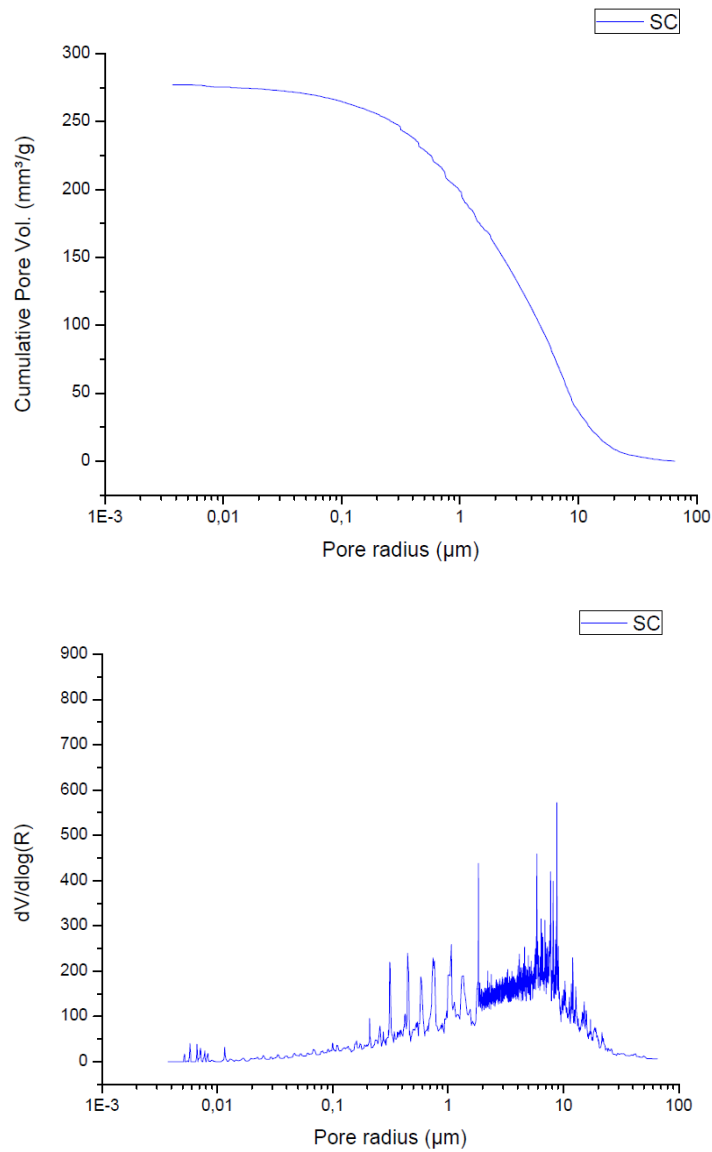


Figura 35: grafici relativi a: a) volume cumulativo (mm³/g) in funzione del raggio e b) distribuzione del volume dei pori (dV/dR) in funzione del raggio per i campioni SC.

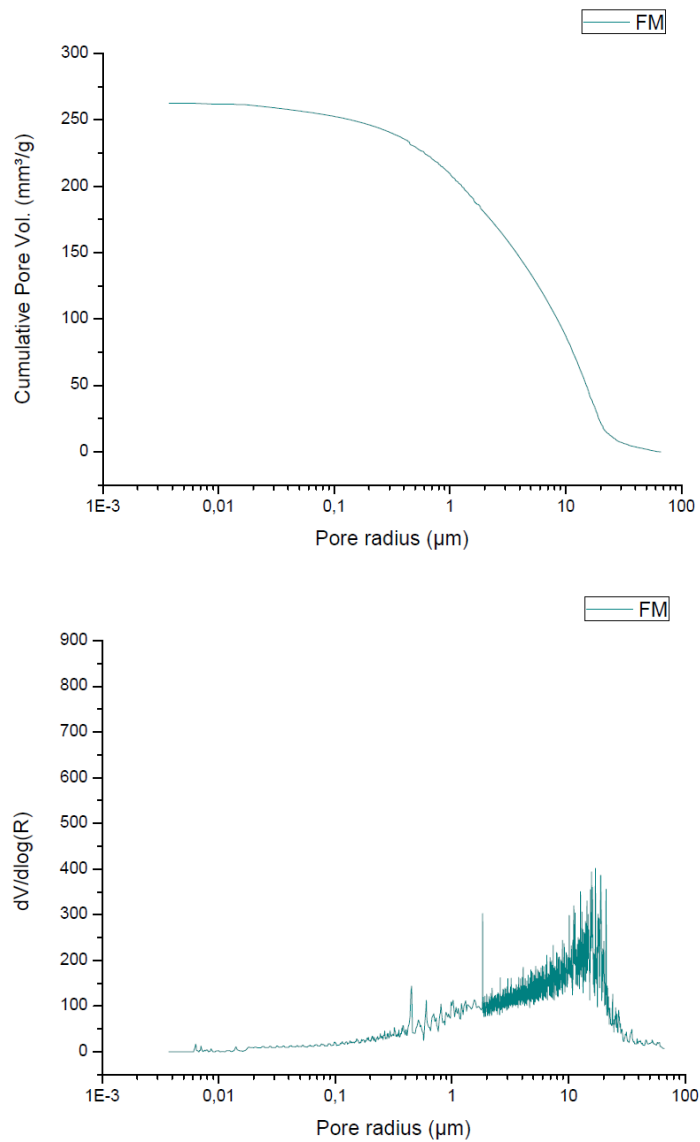


Figura 36: grafici relativi a: a) volume cumulativo (mm³/g) in funzione del raggio e b) distribuzione del volume dei pori (dV/dR) in funzione del raggio per i campioni FM.

Tabella 9: Volume relativo dei pori (%) negli intervalli dimensionali selezionati.

	Relative pore volume (%)					
	0,001-0,01 μm	0,01-0,1 μm	0,1-1 μm	1,0-10 μm	10,0 – 50 μm	50 – 100 μm
FBC	0,29 ± 0,14	4,58 ± 0,43	13,62 ± 0,82	20,71 ± 0,52	52,25 ± 0,82	8,57 ± 2,09
SB	0,50 ± 0,39	2,23 ± 0,49	11,28 ± 1,35	15,80 ± 1,26	55,85 ± 12,30	14,34 ± 12,54
SC	0,43 ± 0,19	4,12 ± 0,39	23,01 ± 4,11	60,00 ± 1,54	12,13 ± 3,77	0,22 ± 0,19
FM	0,27 ± 0,22	3,16 ± 0,38	16,13 ± 0,43	50,55 ± 3,87	29,23 ± 3,67	0,61 ± 0,12

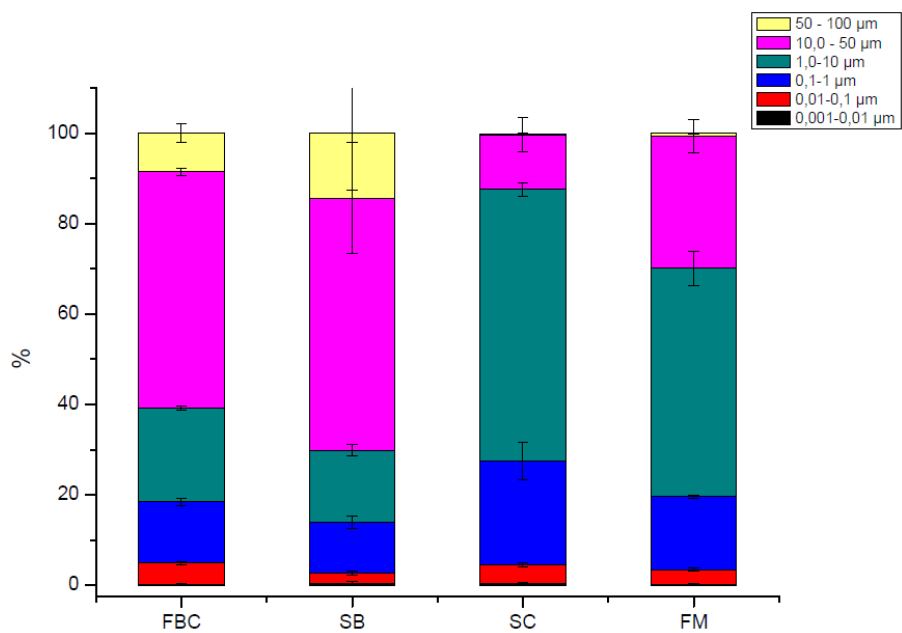


*Figura 37: Volume relativo dei pori (%) negli intervalli dimensionali selezionati.
Grafico di confronto.*

La tipologia dei pori, la loro distribuzione dimensionale e la complessità ed eterogeneità delle microstrutture influenzano non solo la cinetica dell'assorbimento d'acqua nei materiali lapidei, ma anche le proprietà dinamiche delle rocce, come la velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici e la resistenza alla compressione [35,216,217].

La Tabella 11 presenta i valori di velocità ultrasonica (UPV) (m/s) registrati lungo i tre assi (x, y, z) per ogni campione, insieme all'indice di anisotropia corrispondente (%). In accordo con *Classification of rock and soils for engineering geological mapping – part 1* [218], le velocità di propagazione degli ultrasuoni sono state classificate come molto basse (inferiori a 2500 m/s) e basse (2500-3500 m/s).

I valori di velocità di propagazione degli ultrasuoni, osservati per i campioni appartenenti alla formazione della Calcarenite di Gravina (campioni FBC, SB, SC) mostrano un valore medio pari a 2325 ± 284 m/s. Nello specifico, i valori medi, per i campioni FBC, variano nel range compreso tra 2068 m/s e 2683 m/s. I campioni SB e SC mostrano velocità di propagazione degli ultrasuoni minime e massime rispettivamente di 1415 m/s e 1822 m/s e 2356 m/s e 2706 m/s, evidenziando l'eterogeneità della formazione e la minore compattezza dei campioni estratti dal Sasso Barisano.

Alla luce dei risultati ottenuti, è stato calcolato l'indice di anisotropia, il quale quantifica la variazione delle proprietà di un materiale in funzione dell'orientamento spaziale delle misure, secondo quanto riportato da Vasanelli et al. [194,195].

L'indice di anisotropia mostra una dispersione significativa, con un picco del 28% osservato per il campione FBC_15.

I campioni appartenenti alla formazione della Calcarenite di Monte Castiglione (FM) mostrano velocità media di propagazione degli ultrasuoni pari a 2270 ± 122 m/s. Il calcolato indice di anisotropia per i campioni FM varia tra il 12% e il 19%. Per la misura delle proprietà meccaniche, i campioni sono stati inoltre sottoposti a prove di compressione uniassiale. I risultati dei test eseguiti sui campioni selezionati mostrano una dispersione generale dei dati ottenuti. In base ai valori di resistenza alla compressione uniassiale, secondo la classificazione delle rocce e dei terreni suggerita da [218] i materiali lapidei con una resistenza inferiore a 1,5 MPa sono classificati come terreni duri (SB 0,78 MPa). Le rocce con resistenza compresa tra 1,5 e 15 MPa sono classificate come rocce deboli, come nel caso dai campioni FBC ($8,07 \text{ MPa} \pm 1,22$) e SC (9,28 MPa).

I campioni della formazione della Calcarenite di Monte Castiglione, prelevati nell'area di Montescaglioso (MT), mostrano resistenze a compressione di 1,83 MPa, classificandosi, da un punto di vista meccanico, come rocce deboli (< 50MPa).

Ricerche precedenti hanno esplorato la relazione tra valutazioni non distruttive e distruttive, confrontando la velocità di propagazione dell'impulso ultrasonico e la resistenza a compressione uniassiale in pietre tenere impiegate nella costruzione di strutture storiche [141,194,195,219,220].

Sulla base dei risultati ottenuti, sono state ipotizzate correlazioni analitiche tra le velocità ultrasoniche e la resistenza a compressione. Metodi di regressione

lineare sono stati impiegati per indagare possibili relazioni tra UPV e UCS. Si è osservata una correlazione moderata tra la resistenza a compressione e la velocità ultrasonica media in condizioni di asciutto ($R^2 = 0,83$), risultato analogo a quanto riportato negli studi pregressi, precedentemente citati, sulla pietra leccese ($R^2 = 0,85$), una biocalcarenite ad elevata porosità comunemente utilizzata come materiale da costruzione in tutto il Salento.

I risultati ottenuti nello studio dei parametri fisico-meccaniche dei campioni sono riassunti in Tabella 10.

Tabella 10: Valori di capacità di assorbimento d'acqua (WAC), di velocità di propagazione degli ultrasuoni (UPV) e indice di anisotropia calcolato.

	WAC	UPV						Indice di anisotropia
	g/cm ² · min	m/s						%
	media	x	y	z	media	max	min	
FBC_2	0,79 ± 0,02	2408	2804	2496	2569 ± 208	2804	2408	14
FBC_3	0,84 ± 0,11	2177	2508	2206	2297 ± 184	2508	2177	13
FBC_4	1,07 ± 0,08	2118	2357	2142	2205 ± 132	2357	2118	10
FBC_5	0,87 ± 0,08	2370	2613	2366	2450 ± 142	2613	2366	9
FBC_6	0,87 ± 0,08	2627	2825	2242	2565 ± 296	2825	2242	21
FBC_7	0,81 ± 0,11	2246	2209	2235	2230 ± 19	2246	2209	2
FBC_8	0,86 ± 0,07	2836	2140	2732	2569 ± 375	2836	2140	25
FBC_11	1,26 ± 0,02	2478	2724	2200	2467 ± 262	2724	2200	19
FBC_13	1,03 ± 0,25	2295	2828	2739	2621 ± 286	2828	2295	19
FBC_14	0,97 ± 0,17	2137	1956	2177	2090 ± 118	2177	1956	10
FBC_15	0,91 ± 0,15	2924	2246	2119	2429 ± 433	2924	2119	28
FBC_16	0,81 ± 0,15	2674	2504	2874	2684 ± 185	2874	2504	13
FBC_17	0,98 ± 0,05	2311	2232	2232	2259 ± 46	2311	2232	3
FBC_18	0,90 ± 0,15	2301	1918	2027	2082 ± 197	2301	1918	17
FBC_19	0,99 ± 0,06	2392	2232	2110	2245 ± 142	2392	2110	12
FBC_20	0,90 ± 0,03	2439	2276	2400	2372 ± 85	2439	2276	7
FBC_21	0,90 ± 0,12	2492	2171	2134	2265 ± 197	2492	2134	14
FBC_22	0,96 ± 0,11	2229	2143	2242	2205 ± 54	2242	2143	4
FBC_23	0,98 ± 0,11	2636	2742	2400	2593 ± 175	2742	2400	12
FBC_24	0,95 ± 0,04	2431	1908	1866	2068 ± 315	2431	1866	23
FBC_25	1,01 ± 0,13	2564	2259	2222	2348 ± 188	2564	2222	13
FBC_27	1,05 ± 0,09	2655	2534	2415	2535 ± 120	2655	2415	9
SB_1	1,14 ± 0,10	1866	1899	1705	1823 ± 104	1899	1705	10
SB_2	1,02 ± 0,14	1479	1404	1362	1415 ± 59	1479	1362	8

SC_1	0,85 ± 0,19	2415	2183	2471	2357 ± 153	2471	2183	12
SC_2	1,00 ± 0,32	2492	2890	2737	2706 ± 201	2890	2492	14
FM_1	0,58 ± 0,03	2125	2347	2636	2369 ± 256	2636	2125	19
FM_2	0,58 ± 0,11	2530	2137	2336	2334 ± 196	2530	2137	16
FM_3	0,46 ± 0,21	2259	2149	2431	2280 ± 142	2431	2149	12
FM_4	0,70 ± 0,25	2297	2019	1969	2095 ± 177	2297	1969	14

Tabella 11: Tabella di sintesi dei risultati ottenuti nello studio dei parametri fisico-meccaniche dei campioni

	Porosità accessibile	Raggio medio dei pori	Densità apparente	Densità reale	WAC	UPV	UCS
	%	μm	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ² · min	m/s	Mpa
FBC	32,35 ± 0,70	0,393 ± 0,03	1,80 ± 0,05	2,66 ± 0,08	0,942 ± 0,11	2370 ± 188	8,07 ± 1,22
SB	40,95 ± 4,59	0,574 ± 0,17	1,77 ± 0,17	3,02 ± 0,54	1,08 ± 0,09	1619 ± 288	0,78
SC	45,76 ± 0,60	0,351 ± 0,03	1,64 ± 0,09	3,02 ± 0,18	0,926 ± 0,11	2532 ± 247	9,28
FM	41,93 ± 1,70	0,510 ± 0,11	1,06 ± 0,17	2,75 ± 0,05	0,579 ± 0,1	2270 ± 122	1,81

2.5 Valutazione dell'efficacia e della compatibilità dei trattamenti consolidanti.

2.5.1 Monitoraggio delle caratteristiche macroscopiche dei provini

Il monitoraggio successivo ai trattamenti ha incluso l'analisi periodica del peso e delle condizioni superficiali dei campioni per determinare la quantità di prodotto assorbito e ritenuto e valutare gli effetti del trattamento consolidante [95,221].

Le osservazioni allo stereomicroscopio, trascorsi 28 giorni dall'applicazione, hanno evidenziato che l'applicazione dei prodotti consolidanti non ha causato modifiche morfologiche significative alla superficie dei campioni, ad eccezione della formazione di un lieve strato traslucido sulla superficie dei campioni trattati con silicato d'etile KSE 100 [Fig. 38].

In conformità con le linee guida stabilite dalla raccomandazione Normal 20/85 e come riportato da Sassoni et al. [60,222], la quantità di consolidante assorbito e depositato all'interno dei campioni lapidei utilizzati per i test è stata valutata mediante la variazione del peso dei provini prima e dopo l'applicazione dei prodotti consolidanti selezionati.

Le variazioni di peso, utilizzate per determinare la quantità di prodotto assorbito e trattenuto all'interno del materiale lapideo [Tab. 12], sono state esaminate rispettivamente 24 ore dopo la quinta e ultima applicazione e a distanza di 28 giorni dall'applicazione.

Le variazioni di peso sono state mediate sulla base delle misurazioni effettuate su quattro provini distinti per ciascun tipo di consolidante testato.

I campioni analizzati hanno mostrato variazioni nei livelli di assorbimento specifico, attribuibili alle differenze chimico-fisiche nei trattamenti consolidanti impiegati. Tali differenze possono essere ricondotte a vari fattori, inclusi la densità e la viscosità dei consolidanti e la composizione dei solventi volatili utilizzati nei diversi prodotti. Questi parametri influenzano significativamente l'andamento del processo di consolidamento.

Il residuo secco dopo 28 giorni, periodo durante il quale hanno avuto luogo l'evaporazione del solvente e le reazioni responsabili del consolidamento, secondo quanto riportato nelle schede tecniche, è risultato sensibilmente differente tra i trattamenti.

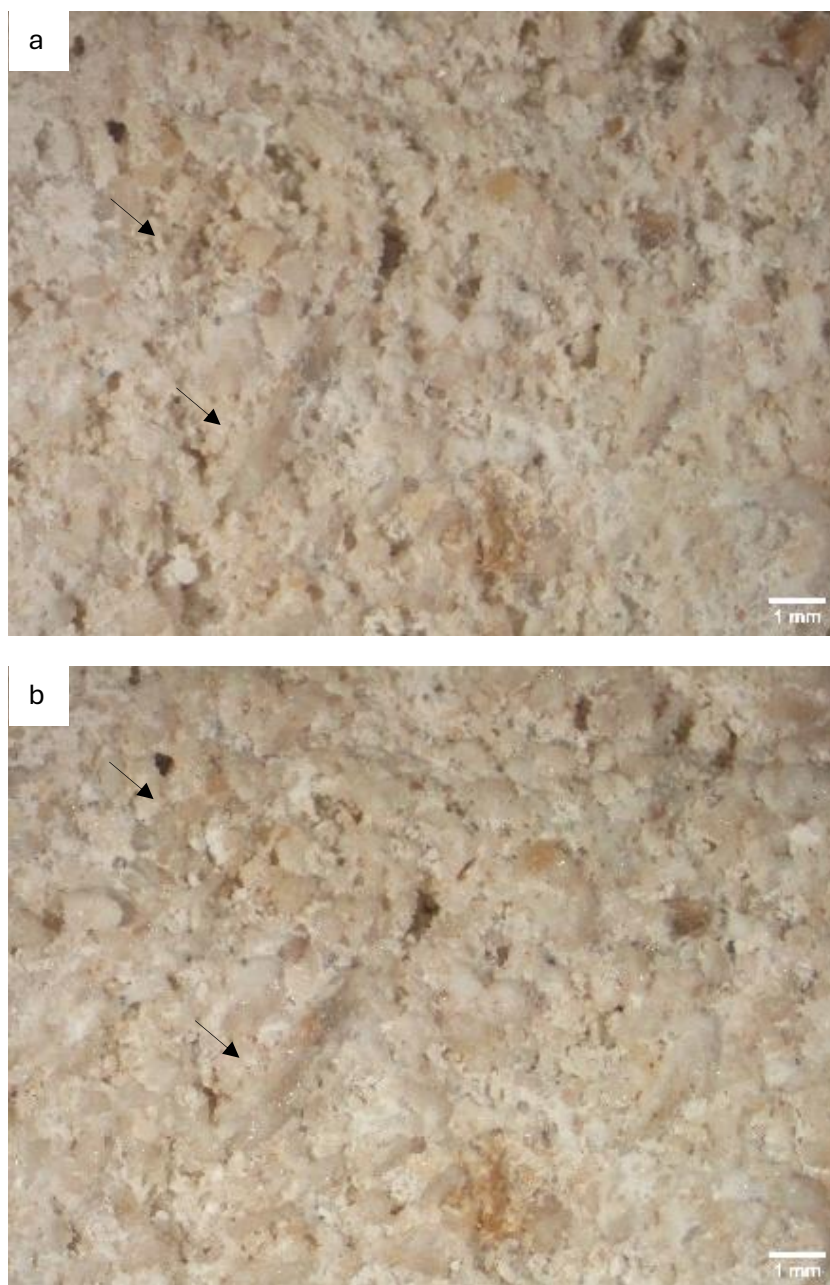


*Figura 38: FBC_23, prima (a) e dopo trattamento (b) con KSE 100.
Ingrandimento 16X.*

L'aumento di peso finale registrato con silicato d'etile KSE 100® è stato significativamente superiore rispetto a quello ottenuto con Ca(OH)_2 NPs CALOSIL®, e lievemente superiore al trattamento con SiO_2 NPs NANO ESTEL®, suggerendo una modifica della porosità e dell'area superficiale dei pori più marcata per il trattamento con KSE 100®.

Il valore medio negativo osservato nei campioni trattati con NANORESTORE® è dovuto alla perdita di peso riscontrata nei campioni FBC_14 e FBC_15. A 28 giorni dal trattamento, l'incremento di peso nei campioni FBC_5 e FBC_16, anch'essi trattati con NANORESTORE®, è stato molto limitato e, rispettivamente, dello 0,008% e 0,004%, probabilmente a causa della bassa concentrazione del prodotto utilizzato (5g/l).

In sintesi, NANORESTORE® presenta la quantità più bassa di residuo secco. Al contrario, NANO ESTEL® e KSE 100® mostrano valori di residuo secco più elevati. CALOSIL®, d'altro canto, offre risultati relativamente stabili tra il peso registrato al termine della quinta applicazione e dopo 28 giorni.

Tabella 12: Variazioni di peso registrate per tutti i campioni trattati, 24 ore dopo la quinta e ultima applicazione e a distanza di 28 giorni dall'applicazione.

	Prodotto assorbito dopo 5 applicazioni						Residuo secco dopo 28 giorni dall'applicazione					
	g		g/cm2		Δp %		g		g/cm2		Δp %	
NANORESTORE	0,01	±0,015	0,00	±0,001	0,00	±0,01	-0,01	±0,020	0,00	±0,001	0,00	±0,01
NANO ESTEL	1,22	±0,480	0,05	±0,019	0,68	±0,31	1,16	±0,463	0,05	±0,019	0,65	±0,30
CALOSIL	0,37	±0,036	0,01	±0,001	0,21	±0,01	0,36	±0,034	0,01	±0,001	0,20	±0,01
KSE 100	2,47	±0,507	0,10	±0,020	1,35	±0,34	1,65	±0,313	0,07	±0,013	0,90	±0,21

2.5.2 Analisi SEM-EDS

La distribuzione e la morfologia dei prodotti consolidanti è stata esplorata mediante SEM-EDS sulla sezione trasversale dei campioni trattati.

Studi sulla carbonatazione dell'idrossido di calcio hanno evidenziato che diverse fasi di CaCO_3 possono formarsi nelle porosità della pietra a seconda delle condizioni sperimentali, come umidità relativa, temperatura e concentrazione di CO_2 , noti per influenzare significativamente la cinetica della reazione di carbonatazione [102].

Nel presente studio, i campioni trattati con CALOSIL® mostrano una morfologia già documentata in ricerche precedenti [102–105], descritta come caratteristica in condizioni di alta umidità relativa (75–90% RH) e caratterizzata da aggregati di micro cristalli di carbonato di calcio con forme irregolari [Fig. 39].

López-Arce et al. [102,223] e Gomez-Villalba [106] hanno evidenziato che, a seconda delle condizioni di umidità relativa (RH), possono formarsi fasi metastabili come il carbonato di calcio amorfo (ACC; con formula generale $\text{CaCO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), la monoidrocalcite ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e i polimorfi anidri vaterite e aragonite. A tal proposito, Rodriguez-Navarro et al. (2018) [224] riportano che la carbonatazione delle nanoparticelle di idrossido di calcio non porta direttamente alla formazione della fase di carbonato di calcio più stabile, la calcite, a condizioni standard di temperatura e pressione. Nello specifico, Rodriguez-Navarro et al. (2018) hanno evidenziato che l'ACC è la fase dominante durante le prime fasi della carbonatazione delle nanocalci a temperatura ambiente. L'ACC precipita omogeneamente dalla soluzione derivante dalla dissoluzione della portlandite e, successivamente, è soggetta a dissoluzione per formare vaterite e aragonite. Infine, sia la vaterite che l'aragonite, sebbene in quantità minori, sono soggette a dissoluzione, seguita dalla precipitazione della calcite. Il processo di carbonatazione descritto segue quindi la sequenza: ACC → vaterite → aragonite → calcite.

Sebbene Otero et al. (2018) [200], nell'analizzare le velocità di carbonatazione dei prodotti consolidanti NANORESTORE® e CALOSIL®, abbiano evidenziato una reattività significativa per NANORESTORE® e una carbonatazione più lenta per CALOSIL®, l'osservazione della sezione trasversale dei campioni trattati con NANORESTORE® non sembra rivelare morfologie significativamente diverse rispetto alla sezione trasversale non trattata dello stesso campione.

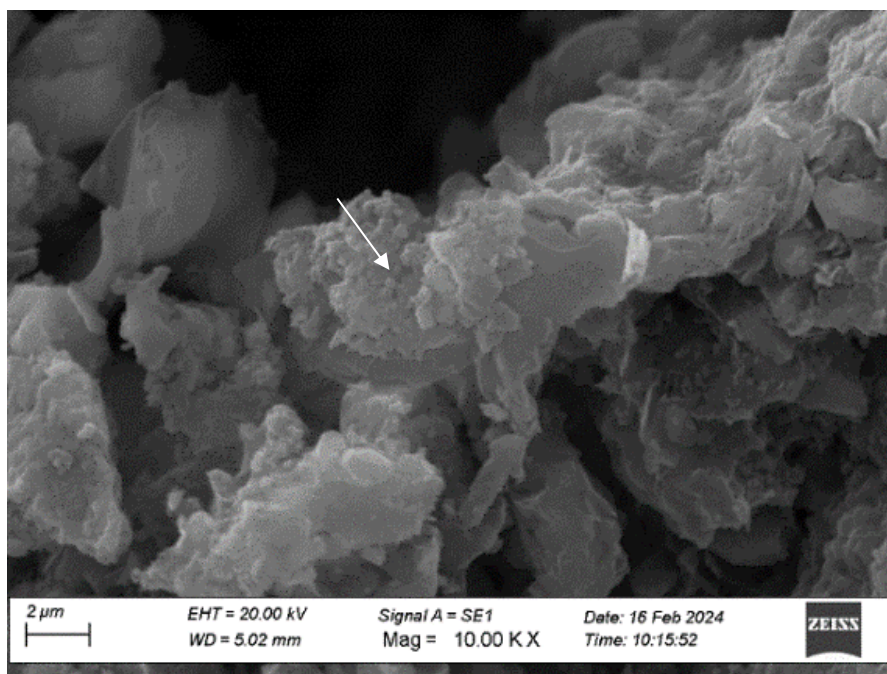


Figura 39: Sezione trasversale di un campione di Calcarenite di Gravina trattato con nanoparticelle di idrossido di calcio CALOSIL®.

Per i trattamenti con nanoparticelle di idrossido di calcio, la composizione del materiale neoformato (CaCO_3) non è stata confermata dalle analisi EDS a causa della composizione chimica simile della matrice del substrato, rendendo difficile distinguere tra il consolidante e la pietra originale.

Nei campioni trattati con SiO_2 NPs NANO ESTEL®, l'analisi della morfologia superficiale della pietra di Matera ha rivelato la presenza di materiale silicatico neoformato nelle cavità della pietra. Le analisi EDS hanno confermato la presenza del trattamento, fornendo mappe composizionali dettagliate [Fig.40].

I campioni trattati con silicato di etile KSE 100®, osservati in sezione trasversale, mostrano lo sviluppo di un materiale compatto ma fessurato che riempie le porosità del materiale costituito principalmente da silice, come confermato dalla microanalisi [Fig. 41] e dalla mappa composizionale [Fig.42].

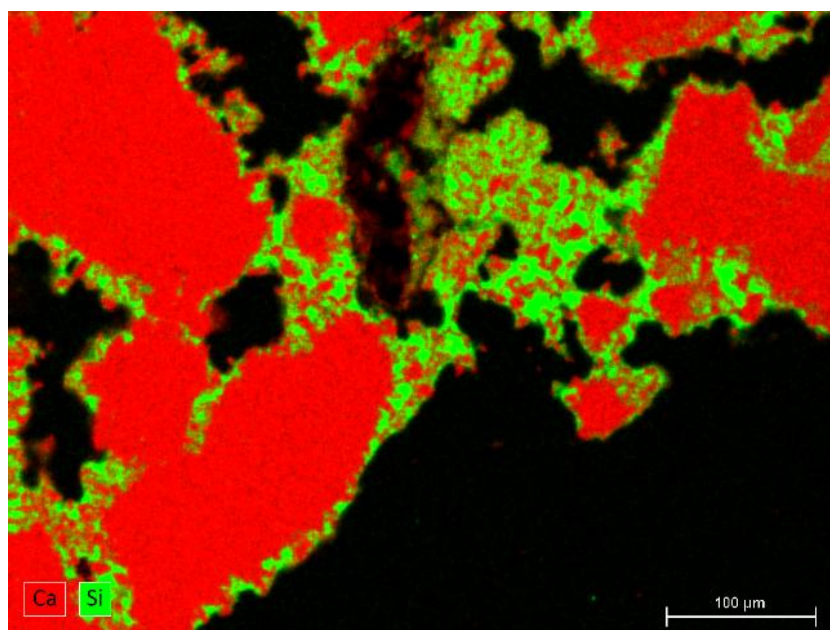
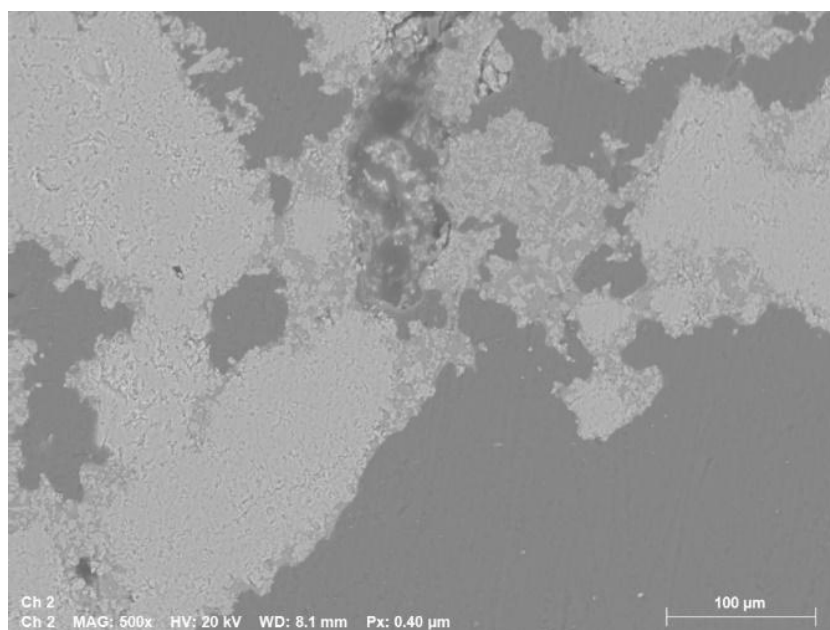


Figura 40: Sezione trasversale di un campione di Calcarenite di Gravina trattato con nanosilice NANO ESTEL®. Mappa composizionale.

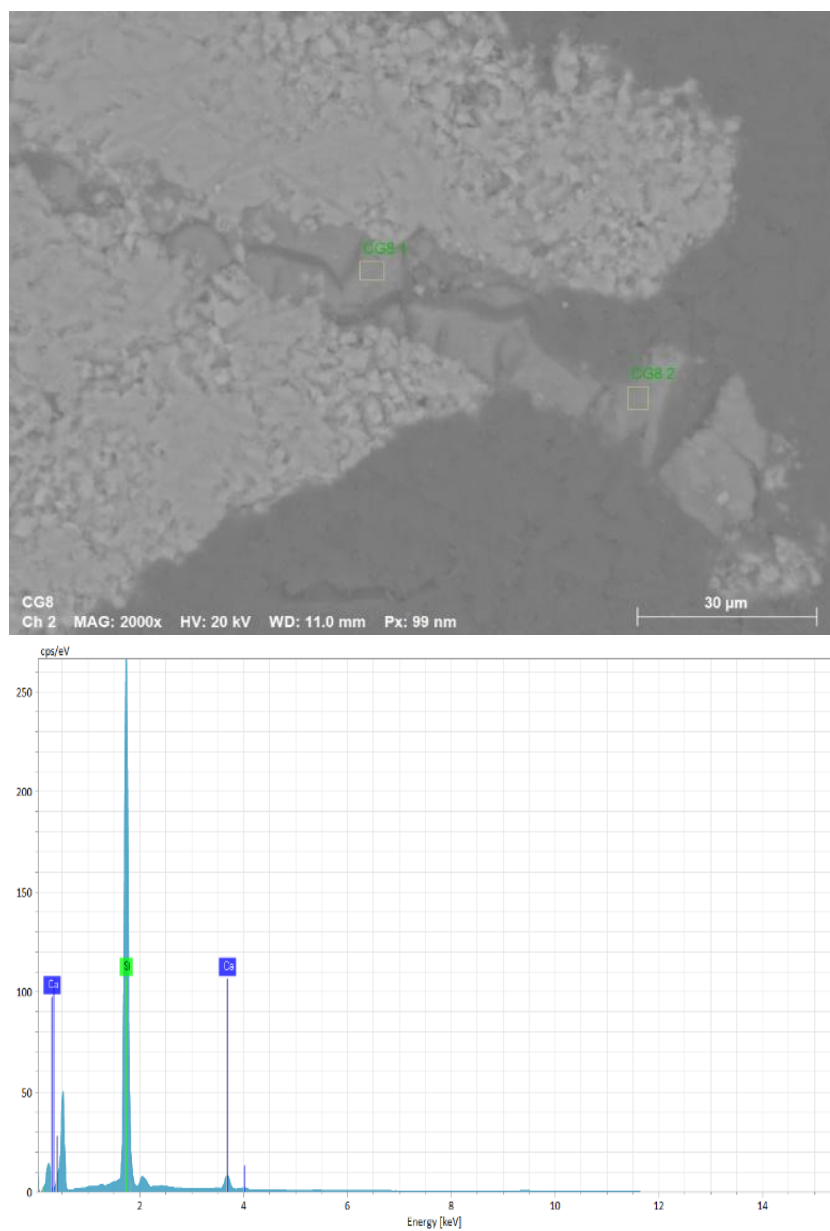


Figura 41: Sezione trasversale di un campione di Calcarenite di Gravina trattato con KSE 100®. Microanalisi EDS.

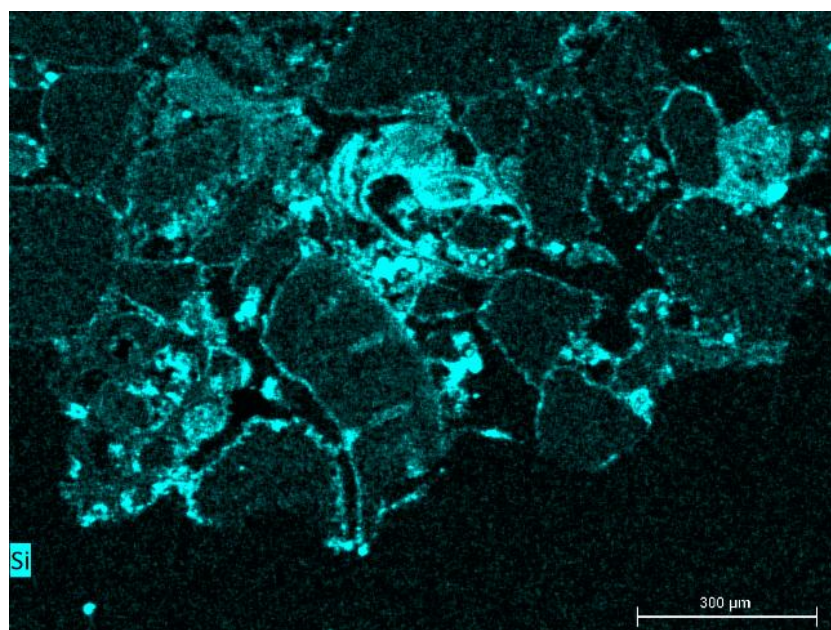


Figura 42: Sezione trasversale di un campione di Calcarenite di Gravina trattato con KSE 100. Mappa composizionale.

2.5.3 Analisi porosimetriche mediante porosimetria ad intrusione di mercurio

L'analisi della porosità mediante porosimetria ad intrusione di mercurio è stata condotta su campioni prelevati dalla superficie trattata. Lo studio mirava a valutare come la presenza dei consolidanti all'interno del materiale lapideo influenzi la struttura dei pori. L'analisi ha permesso di rilevare e valutare la distribuzione dei consolidanti all'interno dei pori dei campioni, fornendo risultati mediati da tre prove ripetute per garantire l'affidabilità dei dati e verificare l'uniformità del trattamento.

Le caratteristiche del network poroso dei campioni trattati e non trattati sono state riassunte in Tabella 13, includendo parametri quali la porosità accessibile, la distribuzione dimensionale dei pori, l'area superficiale e la densità.

I risultati delle analisi di porosità mostrano valori medi di porosità accessibile comparabili tra i campioni trattati e i campioni di controllo non trattati (NT). Alla luce dell'elevata variabilità dei dati, rappresentata dalla deviazione standard, i valori si mantengono all'interno dell'intervallo di porosità dei campioni di controllo. Pertanto, le variazioni potrebbero essere attribuite alla normale variabilità della porosità del materiale lapideo utilizzato come supporto.

Si osserva, d'altro canto, un generale aumento del raggio medio dei pori nei campioni trattati rispetto al campione di controllo non trattato, ad eccezione dei campioni trattati con NANO ESTEL®, per i quali si registra una diminuzione del raggio medio dei pori accompagnata da un aumento dell'area superficiale dei pori stessi.

*Tabella 13: Risultati medi delle analisi mediante porosimetria ad intrusione di mercurio.
NT: campione non trattato, di controllo.*

	Porosità accessibile		Raggio medio		Area superficiale dei pori		Densità apparente		Densità assoluta	
	%		μm		m ² /g		g/cm ³		g/cm ³	
NT	32,35	0,70	0,393	0,03	0,92	0,09	1,80	0,05	2,66	0,08
NANORESTORE®	32,95	1,17	0,832	0,09	0,44	0,02	1,82	0,07	2,71	0,07
NANO ESTEL®	32,48	1,27	0,236	0,06	1,60	0,41	1,80	0,08	2,67	0,12
CALOSIL®	35,60	4,04	0,674	0,29	0,66	0,23	1,78	0,09	2,78	0,25
KSE 100®	34,83	2,90	1,179	0,34	0,35	0,07	1,74	0,03	2,68	0,09

Lo studio dettagliato della distribuzione dimensionale dei pori è riportato nei grafici in Figura 43-46.

La Tabella 14 e il grafico di sintesi riportato in Figura 47 presentano il volume relativo dei pori (%) per diverse classi di dimensioni dei pori, includendo i campioni di controllo non trattati e trattati con diversi prodotti. I dati forniscono una panoramica di come il trattamento con i prodotti considerati influenzi la distribuzione del volume relativo dei pori, con particolare attenzione ai pori con raggio inferiore a 1 μm .

In sintesi:

- NT (Non Trattato)
 - 0,001-0,01 μm : 0,29%
 - 0,01-0,1 μm : 4,58%
 - 0,1-1 μm : 13,62%
- NANOESTORE®
 - 0,001-0,01 μm : 0,14% (diminuzione rispetto a NT)
 - 0,01-0,1 μm : 2,00% (diminuzione rispetto a NT)
 - 0,1-1 μm : 11,45% (diminuzione rispetto a NT)
- NANOESTEL®
 - 0,001-0,01 μm : 1,82% (aumento rispetto a NT)
 - 0,01-0,1 μm : 2,33% (diminuzione rispetto a NT)
 - 0,1-1 μm : 7,32% (diminuzione significativa rispetto a NT)
- CALOSIL®
 - 0,001-0,01 μm : 0,16% (diminuzione rispetto a NT)
 - 0,01-0,1 μm : 2,97% (diminuzione rispetto a NT)
 - 0,1-1 μm : 14,26% (leggero aumento rispetto a NT ma deviazione standard elevata)
- KSE 100®
 - 0,001-0,01 μm : 0,12% (diminuzione rispetto a NT)
 - 0,01-0,1 μm : 1,39% (diminuzione rispetto a NT)
 - 0,1-1 μm : 9,21% (diminuzione rispetto a NT)

Nel confronto dei vari trattamenti applicati ai campioni, si osservano variazioni significative nella distribuzione dimensionale dei pori. In particolare, per quanto riguarda i pori di dimensioni comprese tra 0,001 e 0,01 μm e tra 0,01 e 0,1 μm , tutti i trattamenti applicati portano a una diminuzione del volume relativo di questi pori rispetto al campione non trattato. Tuttavia, il trattamento NANOESTEL® si distingue per un incremento del volume relativo dei pori nella fascia di 0,001-0,01 μm , con un aumento del 1,82%.

Per quanto riguarda i pori di dimensioni comprese tra 0,1 e 1 μm , i trattamenti NANOESTEL® e KSE 100® provocano una riduzione significativa del volume relativo dei pori rispetto al campione non trattato, mentre il trattamento CALOSIL® provoca un leggero aumento rispetto al campione non trattato. D'altro canto, si tenga presente l'elevata deviazione standard associata al valore medio. Inoltre, il trattamento NANOESTORE® e KSE 100® mostrano un aumento nella percentuale di pori grandi (>10 μm), mentre NANOESTEL® tende a concentrare la porosità nella fascia di dimensioni 1-10 μm . CALOSIL® mantiene una

distribuzione simile a quella del materiale non trattato, sebbene sia necessario considerare la deviazione standard associata alla media.

Nel complesso, una generale diminuzione del volume dei pori di raggio inferiore ad 1 μm e un aumento del volume relativo dei pori di dimensioni maggiori di 1 μm , come riscontrato per tutti i trattamenti, si traduce in una diminuzione delle pressioni interne e della vulnerabilità al degrado [Tab. 15].

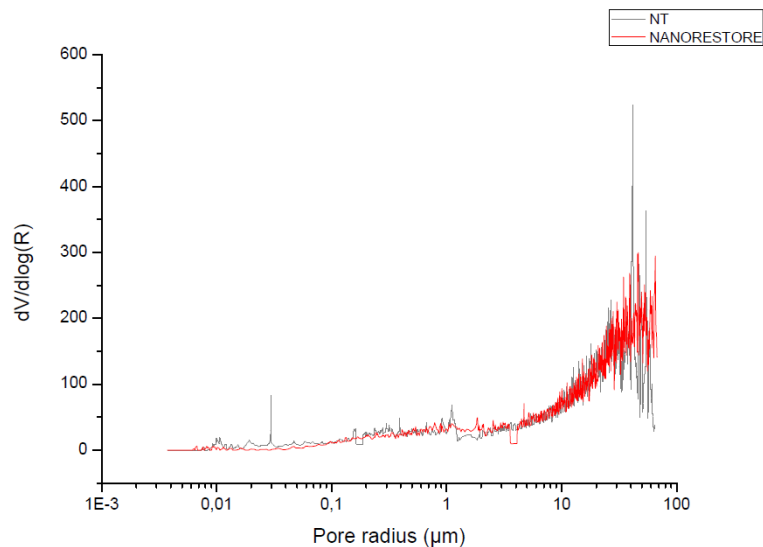


Figura 43: Distribuzione dimensionale dei pori per i campioni trattati con NANOESTORE®. Confronto con distribuzione dimensionale dei pori nel campione non trattato.

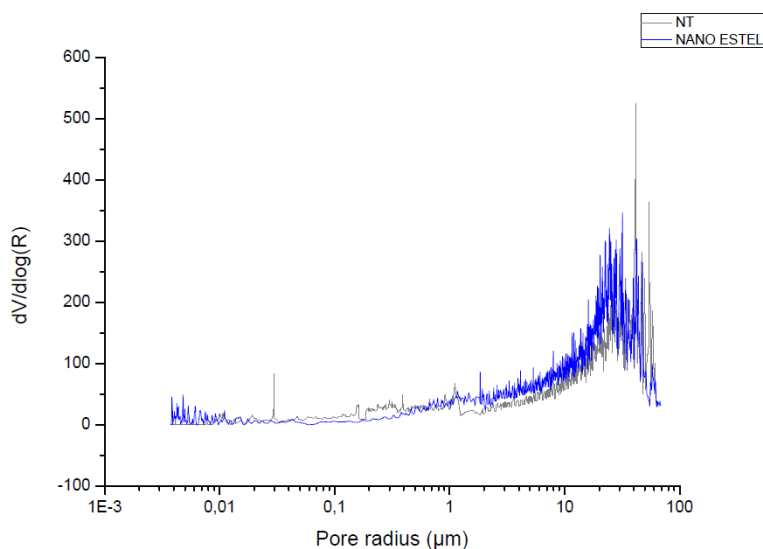


Figura 44: Distribuzione dimensionale dei pori per i campioni trattati con NANO ESTEL®. Confronto con distribuzione dimensionale dei pori nel campione non trattato

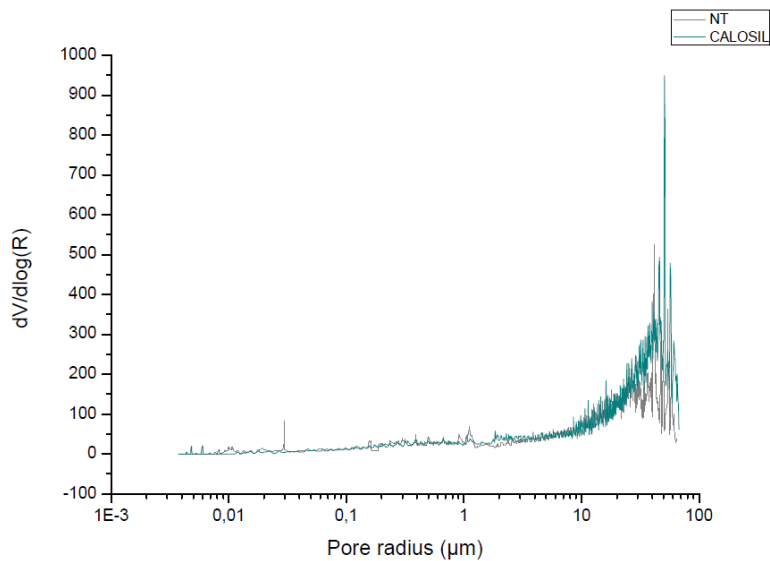


Figura 45: Distribuzione dimensionale dei pori per i campioni trattati con CALOSIL®. Confronto con distribuzione dimensionale dei pori nel campione non trattato

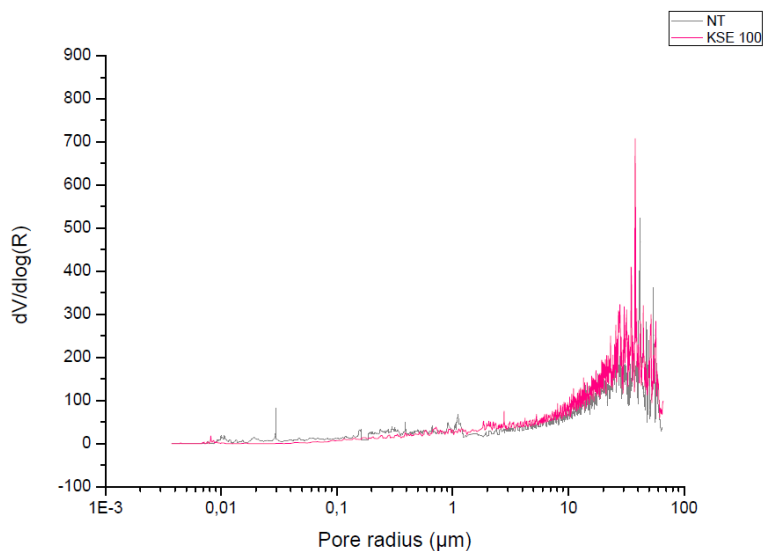


Figura 46: Distribuzione dimensionale dei pori per i campioni trattati con KSE 100®. Confronto con distribuzione dimensionale dei pori nel campione non trattato

Tabella 14: Volume relativo dei pori (%) negli intervalli dimensionali selezionati. Confronto con volume relativo dei pori (%) misurato per il campione non trattato (NT). Valori medi.

	Volume relativo dei pori (%)											
	0,001-0,01 μm		0,01-0,1 μm		0,1-1 μm		1,0-10 μm		10,0 – 50 μm		50 – 100 μm	
NT	0,29	± 0,14	4,58	± 0,43	13,62	± 0,82	20,71	± 0,52	52,25	± 0,82	8,57	± 2,09
NANORESTORE®	0,14	± 0,06	2,00	± 0,61	11,45	± 0,82	22,32	± 3,90	51,93	± 3,62	12,15	± 1,56
NANOESTEL®	1,82	± 0,25	2,33	± 0,28	7,32	± 0,98	29,26	± 0,04	53,02	± 0,87	6,33	± 0,15
CALOSIL®	0,16	± 0,22	2,97	± 1,17	14,26	± 4,53	21,87	± 3,36	53,94	± 5,35	6,73	± 8,19
KSE 100®	0,12	± 0,14	1,39	± 0,75	9,21	± 0,44	23,31	± 2,82	59,32	± 1,90	6,64	± 5,81

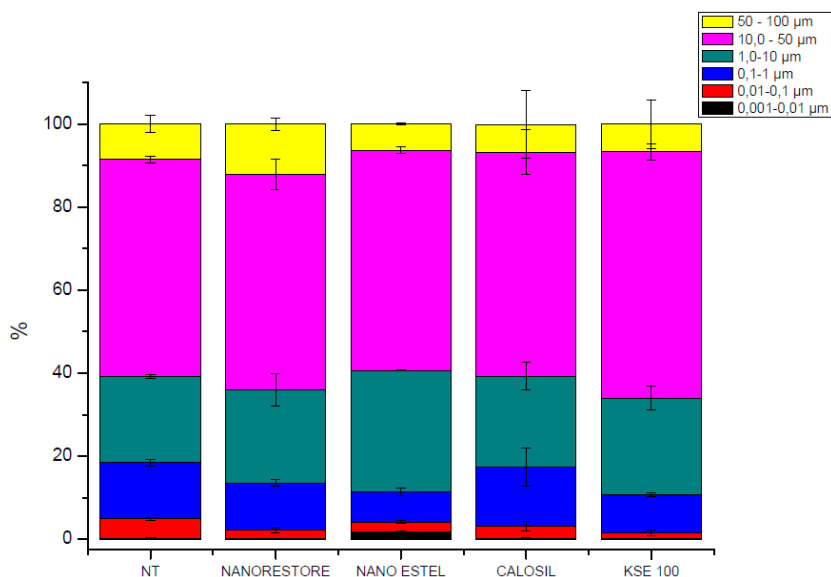


Figura 47: Volume relativo dei pori (%) negli intervalli dimensionali individuati. Grafico di confronto.

Tabella 15: Volume relativo dei pori (%) con evidenziato il volume dei pori inferiori a 1 μm. Valori medi registrati per campione non trattato (NT) e per ciascun trattamento.

	Volume relativo dei pori (%)					
	< 1 μm		1,0-10 μm		> 10 μm	
NT	18	±0,9	21	±0,5	61	±1,4
NANORESTORE®	14	±0,9	22	±3,9	64	±4,5
NANO ESTEL®	12	±0,8	30	±1,7	58	±2,2
CALOSIL®	17	±3,9	22	±3,4	61	±7,3
KSE 100®	11	±1,1	23	±2,8	66	±3,9

2.5.4 Variazione dei parametri fisico-meccanici

La capacità di assorbimento d'acqua mediante *sponge tests* è stata misurata per ciascun provino prima e dopo l'applicazione del trattamento, come riportato in Tabella 16. I dati riportati includono le misurazioni iniziali (t_0) e dopo il trattamento (t_1), le variazioni ($\Delta t_1 - t_0$) assolute e percentuali della capacità di assorbimento.

Nei campioni trattati con NANORESTORE®, non si è osservata una diminuzione significativa del coefficiente di assorbimento d'acqua (WAC). Solo uno dei quattro campioni analizzati ha mostrato una riduzione del coefficiente di assorbimento d'acqua di circa il 4%.

I campioni trattati con NANO ESTEL® hanno mostrato una variazione percentuale relativamente significativa nel coefficiente di assorbimento d'acqua. Tuttavia, la deviazione standard ampia per WAC t_1 suggerisce una notevole variabilità nei dati relativi ai campioni trattati.

Per CALOSIL®, è stato osservato il maggiore decremento percentuale tra i campioni trattati con prodotti in nano particelle, con una significativa perdita della capacità di assorbimento d'acqua. La bassa deviazione standard per WAC t_1 indica che il decremento è stato coerente tra i campioni, suggerendo che la diminuzione nella capacità di assorbimento è stata uniforme e generalizzata per tutti i campioni analizzati.

Infine, i campioni trattati con KSE 100® hanno mostrato una diminuzione molto elevata della capacità di assorbimento d'acqua, pari al 98%. Questo decremento rappresenta una perdita quasi totale della capacità di assorbimento. La variazione è estremamente significativa e la bassa deviazione standard per WAC t_1 indica che tutti i campioni hanno manifestato un comportamento simile, confermando un effetto uniforme e marcato del trattamento sul coefficiente di assorbimento.

In sintesi, i trattamenti con NANO ESTEL®, CALOSIL®, e KSE 100® hanno prodotto variazioni significative, con KSE 100 che ha mostrato il decremento più marcato della capacità di assorbimento d'acqua [Fig. 48].

I valori della velocità di propagazione degli ultrasuoni (UPV) misurati sono riportati in Tabella 17.

Nei campioni trattati con NANORESTORE®, la velocità di propagazione degli ultrasuoni ha registrato una diminuzione dello 0,8%. Questa variazione, seppur misurabile, è relativamente modesta, suggerendo che il materiale è rimasto sostanzialmente stabile in termini di capacità di propagazione degli ultrasuoni, coerentemente con quanto osservato finora.

Per i campioni trattati con NANO ESTEL®, è stato osservato un aumento moderato della velocità di propagazione degli ultrasuoni del 4,6%. Questo incremento indica un miglioramento significativo nella capacità di propagazione, che potrebbe essere attribuito a un miglioramento nella coesione interna o nella densità del materiale.

Nel caso dei campioni trattati con CALOSIL®, la velocità di propagazione degli ultrasuoni è aumentata dell'1,1%. Sebbene l'incremento sia modesto, suggerisce che il materiale ha mantenuto una stabilità generale, con un leggero miglioramento nella compattezza.

Per i campioni trattati con KSE 100®, la velocità di propagazione degli ultrasuoni è aumentata del 3,9%. Questo aumento, sebbene inferiore rispetto a quello osservato per NANO ESTEL®, suggerisce un miglioramento simile nella propagazione degli ultrasuoni. Anche se meno pronunciato, indica un potenziale aumento della coesione interna del materiale.

In sintesi, NANORESTORE® non ha mostrato variazioni significative nella velocità di propagazione degli ultrasuoni. Al contrario, NANO ESTEL® e KSE 100® suggeriscono potenziali miglioramenti nelle proprietà meccaniche, indicando un effetto positivo del trattamento [Fig. 49]. Tuttavia, è importante notare che le immagini SEM hanno rivelato la presenza di crettature nel trattamento con KSE 100®. CALOSIL®, pur mostrando un miglioramento minore, ha mantenuto una performance adeguata, indicando una stabilità generale con un leggero incremento nelle proprietà meccaniche.

Tabella 16: Capacità di assorbimento d'acqua mediante sponge tests prima (t_0) e dopo (t_1) l'applicazione del trattamento. Valori medi registrati per ciascun trattamento. Variazione assoluta Δt_1-t_0 e percentuale Δt_1-t_0 %.

	WAC t_0	WAC t_1	Δt_1-t_0	Δ_{WAC}
	g/cm ² · min	g/cm ² · min	g/cm ² · min	%
NANORESTORE®	0,889 ±0,07	1,041 ±0,15	0,15	17,1
NANO ESTEL®	0,936 ±0,06	0,772 ±0,39	-0,16	-17,5
CALOSIL®	0,892 ±0,06	0,593 ±0,01	-0,30	-33,5
KSE 100®	0,95 ±0,06	0,019 ±0,01	-0,93	-98

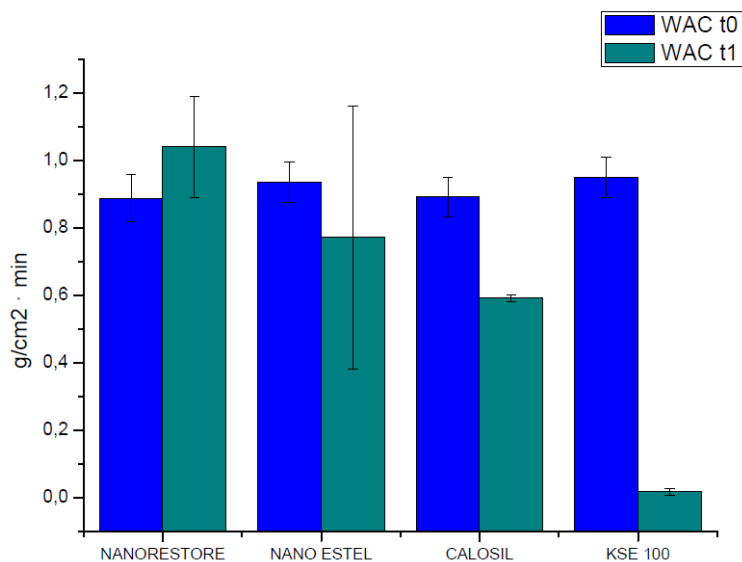


Figura 48: Grafico relativo alla capacità di assorbimento d'acqua mediante sponge tests prima (t_0) e dopo (t_1) l'applicazione del trattamento.

Tabella 17: Velocità di propagazione degli ultrasuoni prima (t_0) e dopo (t_1) l'applicazione del trattamento. Valori medi registrati per ciascun trattamento. Variazione assoluta $\Delta t_1 - t_0$ e percentuale $\Delta t_1 - t_0$ %.

	UPV t_0		UPV t_1		$\Delta t_1 - t_0$	Δ_{UPV}
	m/s		m/s		m/s	%
NANORESTORE®	2413	±245	2393	±274	-20	-0,8
NANO ESTEL®	2287	±201	2394	±170	106	4,6
CALOSIL®	2268	±74	2293	±93	25	1,1
KSE 100®	2395	±244	2487	±228	92	3,9

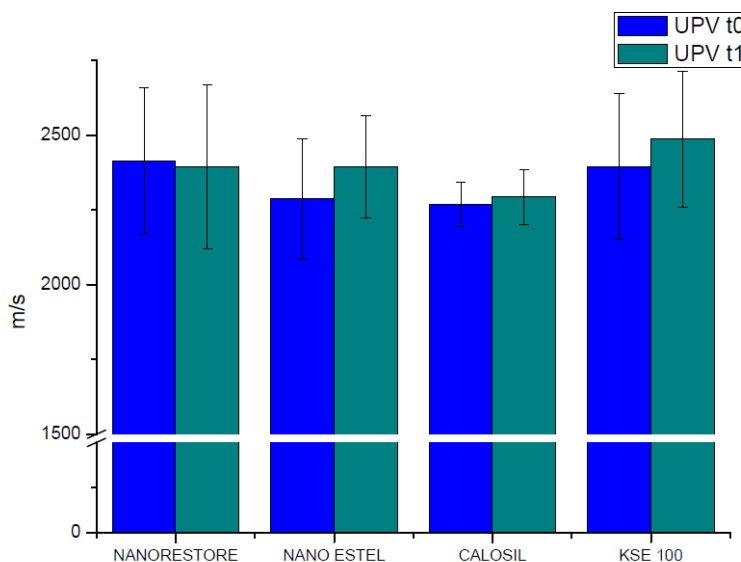


Figura 49: Grafico relativo alla variazione di velocità ultrasonica misurata nei provini prima (t_0) e dopo (t_1) l'applicazione del trattamento

2.5.5 Variazione delle coordinate cromatiche

Idealmente, i trattamenti di consolidamento hanno lo scopo di migliorare le proprietà fisico-meccaniche del materiale senza modificarne l'aspetto estetico. Tuttavia, l'uso della *nanocalce* è spesso associato a uno sbiancamento della superficie dopo il trattamento, mentre l'impiego di *nanosilice* e silicato d'etile è associato ad un ingiallimento della superficie trattata [95,225,226].

Al fine di investigare l'insorgenza di questi fenomeni in associazione con l'uso dei prodotti testati, sono state effettuate indagini colorimetriche per misurare le variazioni delle coordinate cromatiche dopo il trattamento.

Le variazioni nei parametri colorimetrici osservate nei campioni a seguito dell'applicazione dei prodotti consolidanti sulla superficie del substrato lapideo sono riportate nella Tabella 18.

L'analisi delle variazioni nella luminosità (ΔL^*) ha rivelato che tutti i prodotti consolidanti hanno provocato una riduzione della luminosità dei campioni. In particolare, i prodotti NANO ESTEL® e KSE 100® hanno mostrato le diminuzioni più accentuate, suggerendo che i campioni trattati con questi prodotti tendono a scurirsi in misura più significativa rispetto ad altri trattamenti.

Per quanto concerne la componente di colore rosso-verde (Δa^*), tutti i prodotti consolidanti hanno determinato un incremento della componente rossa. Le variazioni più rilevanti sono state osservate nei campioni trattati con NANO ESTEL® e NANORESTORE®, che evidenziano un aumento marcato della componente rossa rispetto al verde.

L'analisi della componente gialla-blu (Δb^*) ha mostrato un aumento della componente gialla in tutti i campioni trattati. Tuttavia, KSE 100® ha registrato l'incremento più significativo, in accordo con quanto riportato in letteratura, indicando un effetto particolarmente pronunciato di questo consolidante sulla componente gialla.

In relazione alla quantità di prodotto consolidante assorbito e al residuo secco successivo all'applicazione, si osserva che i prodotti consolidanti con elevati valori di assorbimento e residuo secco sono stati interessati da modifiche più marcate nei parametri colorimetrici dei campioni trattati. NANO ESTEL® e KSE 100® hanno indotto variazioni più significative nella luminosità e nelle componenti di colore dei materiali. In accordo con quanto riportato da Mokrzycki e Tatol (2011) [73], per i campioni trattati con NANO ESTEL® e KSE 100® l'osservatore potrebbe notare differenze di colore ($3,5 < \Delta E < 5$; $\Delta E > 5$), benché, nel caso specifico, sia cruciale considerare l'elevata deviazione standard associata ai valori medi.

Al contrario, NANORESTORE® e CALOSIL®, alla luce di un assorbimento e un residuo secco moderati, hanno causato modifiche meno significative nei parametri colorimetrici. In particolare, i campioni trattati con CALOSIL® hanno mostrato la variazione ΔE più contenuta [Fig.50] [Tab.19].

Tabella 18: Variazioni nei parametri colorimetrici osservate nei campioni a seguito dell'applicazione dei prodotti consolidanti.

			ΔL^*	Δa^*	Δb^*	$\Delta E (t_1)$
NANORESTORE®	FBC_5	SCI	-0,07	0,12	1,56	1,57
	FBC_14	SCI	0,28	0,18	0,12	0,35
	FBC_15	SCI	-3,63	1,04	2,91	4,77
	FBC_16	SCI	-4,37	1,12	2,63	5,22
NANO ESTEL®	FBC_6	SCI	-2,57	0,45	1,62	3,07
	FBC_17	SCI	0,36	-0,14	0,67	0,77
	FBC_18	SCI	-4,51	0,43	2,73	5,29
	FBC_19	SCI	-7,03	0,59	3,58	7,91
CALOSIL®	FBC_7	SCI	-1,02	0,09	-0,07	1,03
	FBC_20	SCI	-2,18	0,9	0,32	2,38
	FBC_21	SCI	-4,14	0,23	1,17	4,31
	FBC_22	SCI	0,51	0,38	-0,96	1,15
KSE 100®	FBC_8	SCI	-4,59	1,36	4,55	6,60
	FBC_23	SCI	-3,34	0,72	4,06	5,31
	FBC_24	SCI	-5,4	1,98	5,39	7,88
	FBC_25	SCI	-1,93	0,67	2,51	3,24

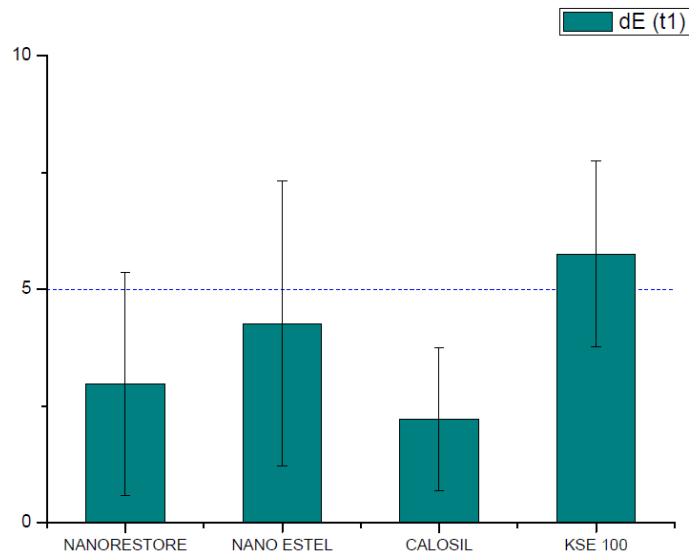


Figura 50: Valore di ΔE registrato per i campioni trattati.

Tabella 19: Variazioni nei parametri colorimetrici osservate nei campioni a seguito dell'applicazione dei prodotti consolidanti. Valori medi.

	ΔL^*		Δa^*		Δb^*		ΔE (t1)	
NANORESTORE®	-1,95	±2,39	0,62	±0,54	1,81	±1,27	2,98	±2,39
NANO ESTEL®	-3,44	±2,39	0,33	±0,32	2,15	±1,27	4,26	±3,05
CALOSIL®	-1,71	±1,96	0,40	±0,35	0,12	±0,88	2,22	±1,52
KSE 100®	-3,81	±1,52	1,18	±0,62	4,13	±1,21	5,76	±1,98

2.6 Valutazione comparativa dell'efficacia a lungo termine dei trattamenti di consolidamento testati

Il monitoraggio dell'efficacia e della stabilità dei trattamenti a lungo termine è stato effettuato grazie all'uso di tecniche di indagine non distruttive e a basso costo, come le indagini ultrasoniche, la misurazione della capacità di assorbimento con sponge tests e l'uso di spettrocolorimetro. Questo approccio facilita il monitoraggio in situ, consentendo una valutazione agevole dei parametri fisico-meccanici in condizioni reali.

Le analisi dopo il ciclo di invecchiamento artificiale in camera climatica SOLAR BOX (t_2) (§ 1.3.3) sono state eseguite su tre dei quattro campioni trattati in precedenza. Se ne riportano i valori medi.

Per quel che riguarda le variazioni di peso, NANORESTORE® ha mostrato una perdita di peso subito dopo il trattamento, con una riduzione di 0,012 g (-0,006%), da 191,231 g a 191,219 g. In seguito all'invecchiamento artificiale, la perdita di peso è aumentata (-0,2%), con un peso finale di 190,771 g.

NANO ESTEL® ha causato un aumento iniziale di 1,148 g (0,7%) del peso, da 177,494 g a 178,642 g. Dopo l'invecchiamento, il peso si è ridotto, rimanendo comunque superiore al peso iniziale t_0 , con un valore finale di 178,314 g. Questo suggerisce un effetto consolidante efficace, sebbene con una lieve perdita di massa nel tempo.

I campioni trattati con CALOSIL® hanno mostrato un basso incremento di peso di 0,357 g (0,2%) dopo il trattamento, passando da 177,136 g a 177,493 g. L'invecchiamento artificiale ha causato una riduzione minima, con un peso finale di 177,176 g.

KSE 100® ha mostrato un significativo aumento del peso di 1,616 g (0,8%), passando da 192,294 g a 193,910 g, a seguito dell'applicazione del consolidante. Tuttavia, dopo l'invecchiamento, il peso è diminuito di 1,223 g (-0,6%), raggiungendo 192,687 g. Sebbene l'aumento iniziale suggerisca una buona penetrazione del consolidante, la successiva riduzione potrebbe indicare una presenza del prodotto limitata alla superficie.

Tra i consolidanti analizzati, NANO ESTEL® si distingue per aver mantenuto un incremento di peso netto positivo anche dopo l'invecchiamento, indicando un buon potenziale di consolidamento, durabilità e resistenza al degrado a lungo termine. NANORESTORE® e KSE 100® hanno mostrato una perdita di massa post-invecchiamento, con KSE 100® che ha subito la perdita più significativa [Tab.20].

*Tabella 20: Variazioni in peso dei campioni dopo il trattamento (Δt_1-t_0) e dopo invecchiamento artificiale (Δt_2-t_1).
 $P t_0$: peso prima del trattamento; $p t_1$: peso dopo il trattamento; $p t_2$: peso dei campioni trattati dopo invecchiamento artificiale.*

	p t ₀		p t ₁		p t ₂		Δt_1-t_0	Δt_2-t_1	Δt_1-t_0	Δt_2-t_1
	g						g		%	
NANORESTORE	191,231	±11,84	191,219	±11,9	190,771	±12,0	-0,012	-0,448	-0,006	-0,234
NANO ESTEL	177,494	±10,33	178,642	±9,8	178,314	±9,9	1,148	-0,328	0,647	-0,184
CALOSIL	177,136	±22,2	177,493	±22,2	177,176	±22,3	0,357	-0,316	0,201	-0,178
KSE 100	192,294	±8,45	193,910	±8,1	192,687	±8,4	1,616	-1,223	0,841	-0,631

L'analisi dei dati relativi alla capacità di assorbimento d'acqua (WAC) dei campioni trattati con diversi consolidanti prima (t_0), dopo il trattamento (t_1) e dopo l'invecchiamento artificiale (t_2) evidenzia differenze significative nelle prestazioni dei materiali nel tempo.

Il trattamento con NANORESTORE® ha mostrato un leggero aumento della WAC subito dopo l'applicazione, passando da $0,895 \pm 0,082$ g/cm²·min a $0,974 \pm 0,070$ g/cm²·min, con una variazione di $+0,078$ g/cm²·min (+8,7%). Questo incremento iniziale suggerisce una certa inefficacia del trattamento nel ridurre la capacità di assorbimento dell'acqua. Dopo l'invecchiamento artificiale, la WAC è ulteriormente aumentata a $1,229 \pm 0,158$ g/cm²·min, con un incremento di $+0,255$ g/cm²·min rispetto al t_1 . Questi risultati indicano una ulteriore perdita di efficacia del trattamento con il tempo, con un peggioramento della resistenza all'assorbimento d'acqua.

Il trattamento con NANO ESTEL® ha mostrato una riduzione significativa della WAC subito dopo il trattamento, passando da $0,956 \pm 0,048$ g/cm²·min a $0,605 \pm 0,243$ g/cm²·min, con una variazione di $-0,351$ g/cm²·min (-36,8%). Tuttavia, dopo l'invecchiamento artificiale, la WAC è aumentata a $0,948 \pm 0,257$ g/cm²·min, un incremento di $+0,343$ g/cm²·min rispetto a t_1 . Nonostante questo aumento post-invecchiamento, il trattamento NANO ESTEL® è riuscito a mantenere una WAC relativamente bassa rispetto ai valori iniziali t_0 , indicando una buona stabilità nel tempo rispetto agli altri trattamenti.

Il trattamento con CALOSIL ha mostrato una riduzione della WAC da $0,919 \pm 0,034$ g/cm²·min a $0,654 \pm 0,059$ g/cm²·min dopo il trattamento (t_1), con una variazione di $-0,265$ g/cm²·min. Tuttavia, dopo l'invecchiamento artificiale, la WAC è aumentata a $1,261 \pm 0,016$ g/cm²·min, con una variazione di $+0,607$ g/cm²·min rispetto al t_1 . Questo aumento indica una significativa perdita di efficacia del trattamento nel tempo, con una resistenza all'assorbimento d'acqua che peggiora con l'invecchiamento.

Il trattamento con KSE 100 ha mostrato la riduzione più drastica della WAC subito dopo il trattamento, passando da $0,979 \pm 0,029$ g/cm²·min a $0,021 \pm 0,022$ g/cm²·min, con una variazione di $-0,957$ g/cm²·min (-97,8%). Tuttavia, dopo l'invecchiamento artificiale, la WAC è aumentata a $1,262 \pm 0,037$ g/cm²·min, con un incremento di $+1,241$ g/cm²·min rispetto a t_1 . Sebbene KSE 100 mostri una eccellente riduzione iniziale della WAC, l'aumento post-invecchiamento suggerisce una notevole perdita di efficacia con il tempo.

Tra i trattamenti analizzati, NANO ESTEL® ha dimostrato la maggiore stabilità all'invecchiamento artificiale. Al contrario, CALOSIL® e KSE 100® hanno mostrato una maggiore tendenza all'aumento della WAC dopo l'invecchiamento, indicando una diminuzione dell'efficacia con il passare del tempo [Tab.21].

Le differenze di velocità di propagazione degli ultrasuoni, sia in termini assoluti (Δt_1-t_0 e Δt_2-t_1) che percentuali, forniscono ulteriori indicazioni sulla performance e sulla durabilità dei trattamenti applicati.

In seguito al trattamento con NANORESTORE®, si è osservata una leggera diminuzione nella velocità di propagazione degli ultrasuoni. Questo potrebbe indicare una riduzione della coesione o della densità del materiale trattato. Tale

diminuzione è ulteriormente accentuata dopo il processo di invecchiamento artificiale, suggerendo una possibile instabilità nel tempo del consolidante.

NANO ESTEL® mostra un incremento significativo della UPV dopo il trattamento, suggerendo un miglioramento della coesione strutturale del materiale. Tuttavia, il calo successivo alla fase di invecchiamento indica una perdita parziale di efficacia del consolidante nel lungo termine, pur mantenendo una velocità superiore rispetto al valore iniziale t_0 .

Il trattamento con CALOSIL® porta ad un modesto incremento nella velocità degli ultrasuoni, il che indica un lieve miglioramento della struttura interna. La leggera diminuzione dopo l'invecchiamento suggerisce una certa stabilità del consolidante.

KSE 100 evidenzia un buon incremento iniziale della UPV post-trattamento, indicando un efficace consolidamento del materiale. La successiva riduzione della velocità dopo l'invecchiamento, sebbene significativa, non annulla completamente il miglioramento iniziale, suggerendo una moderata stabilità nel tempo.

Tra i trattamenti analizzati, NANO ESTEL® ha dimostrato la migliore resistenza all'invecchiamento artificiale, mantenendo un incremento netto della UPV del 3,2% rispetto al valore iniziale, nonostante una riduzione post-invecchiamento. Questo risultato indica una buona stabilità del trattamento nel migliorare la coesione interna del materiale. [Tab. 22].

Tabella 21: Variazioni della capacità di assorbimento d'acqua dopo il trattamento (Δt_1-t_0) e dopo invecchiamento artificiale (Δt_2-t_1). WAC t_0 : capacità di assorbimento prima del trattamento; WAC t_1 : capacità di assorbimento dopo il trattamento; WAC t_2 : capacità di assorbimento nei campioni trattati dopo invecchiamento artificiale.

	WAC t_0		WAC t_1		WAC t_2		Δt_1-t_0	Δt_2-t_1	Δt_1-t_0	Δt_2-t_1
	g/cm ² · min						g/cm ² · min		%	
NANORESTORE	0,895	±0,082	0,974	±0,070	1,229	±0,158	0,078	0,255	8,7	26,2
NANO ESTEL	0,956	±0,048	0,605	±0,243	0,948	±0,257	-0,351	0,343	-36,8	56,8
CALOSIL	0,919	±0,034	0,654	±0,059	1,261	±0,016	-0,265	0,607	-28,8	92,8
KSE 100	0,979	±0,029	0,021	±0,022	1,262	±0,037	-0,957	1,241	-97,8	-

Tabella 22: Variazioni della velocità di propagazione degli ultrasuoni dopo il trattamento (Δt_1-t_0) e dopo invecchiamento artificiale (Δt_2-t_1). UPV t_0 : velocità di propagazione prima del trattamento; UPV t_1 : velocità di propagazione dopo il trattamento; UPV t_2 : velocità di propagazione nei campioni trattati dopo invecchiamento artificiale.

	UPV t_0		UPV t_1		UPV t_2		Δt_1-t_0	Δt_2-t_1	Δt_1-t_0	Δt_2-t_1
	m/s						m/s		%	
NANORESTORE	2401	±298	2393	±335	2366	±300	-7,8	-26,9	-0,3	-1,1
NANO ESTEL	2195	±98	2317	±88	2266	±178	121,6	-50,6	5,5	-2,2
CALOSIL	2281	±85	2313	±102	2274	±73	32,7	-39,0	1,4	-1,7
KSE 100	2337	±262	2428	±239	2347	±213	91,0	-80,8	3,9	-3,3

Nella valutazione delle proprietà estetiche, il trattamento con NANORESTORE® ha causato una variazione di colore $\Delta E_{t_1-t_0}$ di $3,45 \pm 2,69$, il che indica un cambiamento visibile ma moderato. Dopo l'invecchiamento, la variazione di colore ulteriore ($\Delta E_{t_2-t_1}$) è stata di $1,47 \pm 0,44$, segnalando una stabilità cromatica relativamente buona. Questo risultato suggerisce che, pur causando una certa alterazione iniziale, NANORESTORE® tende a mantenere stabile il colore nel tempo.

NANO ESTEL® ha indotto una variazione di colore iniziale di $4,66 \pm 3,61$, una delle più elevate registrate, con una notevole deviazione standard associata. Questo suggerisce un impatto cromatico particolarmente significativo del trattamento in alcuni campioni. Tuttavia, la variazione ulteriore dopo l'invecchiamento ($\Delta E_{t_2-t_1}$) è stata di $1,42 \pm 0,84$, indicando che, nonostante l'impatto iniziale, il consolidante tende a stabilizzarsi e a non causare ulteriori cambiamenti cromatici significativi nel tempo.

CALOSIL® ha mostrato la variazione di colore più bassa iniziale ($\Delta E_{t_1-t_0}$: $2,61 \pm 1,59$), indicativo di un impatto minimo sulla colorazione originale del materiale trattato. Tuttavia, dopo l'invecchiamento, la variazione è stata di $1,66 \pm 1,09$ ($\Delta E_{t_2-t_1}$), leggermente superiore a quella di NANORESTORE® e NANO ESTEL®, ma comunque indicativa di una buona stabilità cromatica complessiva.

KSE 100® ha provocato la maggiore variazione iniziale di colore ($\Delta E_{t_1-t_0}$: $5,48 \pm 2,33$), suggerendo un impatto cromatico notevole sul materiale trattato. Inoltre, dopo l'invecchiamento, la variazione $\Delta E_{t_2-t_1}$ è stata di $3,17 \pm 1,15$, la più alta tra i consolidanti analizzati.

CALOSIL® si distingue per avere l'impatto iniziale più basso sulla variazione di colore, rendendolo il trattamento più conservativo in termini estetici. NANORESTORE® e NANO ESTEL® hanno mostrato una buona stabilità cromatica dopo l'invecchiamento, con variazioni aggiuntive minime [Tab. 23]. Questi risultati sono essenziali per la scelta del consolidante, in particolare per mantenere l'integrità estetica dei materiali trattati.

Nell'ottica di una conservazione preventiva, è stata effettuata la valutazione dell'effetto a lungo termine dei trattamenti sui materiali lapidei confrontando i parametri analizzati sinora con gli stessi parametri ma di provini di calcarenite di Gravina non trattati, sottoposti allo stesso ciclo di invecchiamento artificiale. In particolare, si è inteso verificare se tali trattamenti potessero estendere la vita utile dei materiali, incrementando la resistenza agli effetti erosivi e ai danni provocati dal processo di invecchiamento. Attraverso questo studio, si è cercato di evidenziare come l'uso di consolidanti possa garantire un miglioramento significativo delle caratteristiche originarie del materiale lapideo esaminato, contribuendo così a una conservazione più efficace nel tempo.

Rispetto ai campioni non trattati, i provini trattati con consolidanti mostrano generalmente variazioni di peso più contenute o addirittura non registrano un decremento.

In generale, i trattamenti consolidanti si dimostrano efficaci nel mantenere o migliorare la massa del materiale lapideo, contrastando così la perdita di materiale osservata sui provini non trattati [Tab. 24].

Inoltre, è stata valutata la capacità di assorbimento d'acqua (WAC) dei provini di calcarenite di Gravina trattati con diversi consolidanti a confronto con campioni non trattati sottoposti allo stesso ciclo di invecchiamento artificiale.

Il campione non trattato (NT) ha mostrato un incremento della capacità di assorbimento d'acqua di $0,170 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}$, corrispondente a un aumento del 15,1% rispetto al valore iniziale (t_0) [Tab.25] [Fig.51].

Il confronto tra le variazioni nella velocità ultrasonica dei campioni trattati con diversi consolidanti rispetto al campione non trattato (NT), ha evidenziato per il campione non trattato una diminuzione della velocità di propagazione degli ultrasuoni di 122 m/s , pari al 5,0%. Questo decremento suggerisce un deterioramento delle proprietà meccaniche del materiale dovuto all'invecchiamento artificiale, probabilmente associato alla perdita di integrità strutturale, a un aumento della porosità o alla formazione di micro-fessure [Tab. 26] [Fig.52].

Per quanto riguarda il mantenimento delle proprietà estetiche nel tempo, il campione non trattato ha mostrato una variazione di $\Delta E_{t_2-t_0}$ pari a 2,48, fornendo una base di confronto per l'efficacia dei trattamenti conservativi [Tab.27] [Fig.53].

Alla luce di tali considerazioni, si può concludere che i trattamenti consolidanti applicati ai provini di calcarenite di Gravina dimostrano una chiara efficacia nel rallentare i processi di deterioramento, come evidenziato dalla minore perdita di massa e dal mantenimento delle proprietà meccaniche rispetto ai campioni non trattati.

Il trattamento con NANO ESTEL® comporta, altresì, una diminuzione della capacità di assorbimento d'acqua rispetto. Tra i consolidanti testati, si distingue per la sua capacità di estendere significativamente la vita utile dei materiali lapidei, preservando maggiormente le caratteristiche fisiche, meccaniche ed estetiche del materiale nel tempo.

Tabella 23: Variazioni delle coordinate colorimetriche dopo il trattamento ($\Delta E_{t_1-t_0}$) e dopo invecchiamento artificiale ($\Delta E_{t_2-t_1}$)

	$\Delta E_{t_1-t_0}$		$\Delta E_{t_2-t_1}$	
NANORESTORE®	3,45	$\pm 2,69$	1,47	$\pm 0,44$
NANO ESTEL®	4,66	$\pm 3,61$	1,42	$\pm 0,84$
CALOSIL®	2,61	$\pm 1,59$	1,66	$\pm 1,09$
KSE 100®	5,48	$\pm 2,33$	3,17	$\pm 1,15$

Tabella 24: Variazioni in peso dei campioni non trattati (NT) e trattati dopo invecchiamento artificiale (Δt_2-t_0). p_{t_0} : peso prima del trattamento; p_{t_1} : peso dopo il trattamento; p_{t_2} : peso dei campioni trattati dopo invecchiamento artificiale

	P_{t_0}		p_{t_1}		p_{t_2}		$\Delta_{t_2-t_0}$	$\Delta_{t_2-t_0}$
	g						g	%
NT	193,084	$\pm 7,641$			189,720	$\pm 6,001$	-3,364	-1,742
NANORESTORE®	191,231	$\pm 11,838$	191,219	$\pm 11,853$	190,771	$\pm 11,985$	-0,460	-0,240
NANO ESTEL®	177,494	$\pm 10,325$	178,642	$\pm 9,839$	178,314	$\pm 9,889$	0,820	0,462
CALOSIL®	177,136	$\pm 22,200$	177,493	$\pm 22,238$	177,176	$\pm 22,319$	0,040	0,023
KSE 100®	192,294	$\pm 8,450$	193,910	$\pm 8,148$	192,687	$\pm 8,447$	0,393	0,204

Tabella 25: Variazioni della capacità di assorbimento d'acqua dei campioni non trattati (NT) e trattati dopo invecchiamento artificiale (Δt_2-t_0). WAC t_0 : capacità di assorbimento per i campioni tal quali; WAC t_1 : capacità di assorbimento dopo il trattamento; WAC t_2 : capacità di assorbimento nei campioni trattati dopo invecchiamento artificiale.

	WAC t_0		WAC t_1		WAC t_2		Δt_2-t_0	Δt_2-t_0
	g/cm ² · min						g/cm ² · min	%
NT	1,123	±0,123			1,293	±0,161	0,170	15,1
NANORESTORE®	0,895	±0,082	0,974	±0,070	1,229	±0,158	0,333	37,2
NANO ESTEL®	0,956	±0,048	0,605	±0,243	0,948	±0,257	-0,008	-0,9
CALOSIL®	0,919	±0,034	0,654	±0,059	1,261	±0,016	0,342	37,3
KSE 100®	0,979	±0,029	0,021	±0,022	1,262	±0,037	0,284	29,0

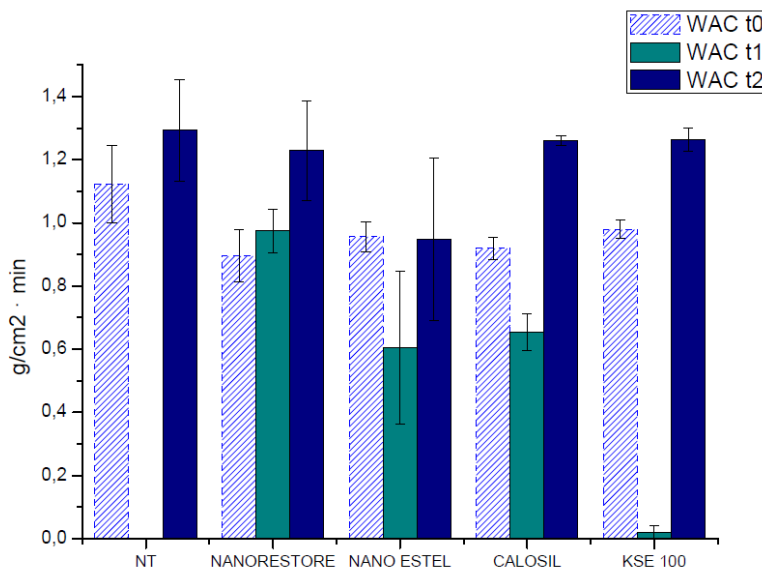


Figura 51: Variazioni della capacità di assorbimento d'acqua dei campioni non trattati (NT) e trattati dopo invecchiamento artificiale. WAC t_0 : capacità di assorbimento per i campioni tal quali; WAC t_1 : capacità di assorbimento nei campioni trattati; WAC t_2 : capacità di assorbimento nei campioni trattati dopo invecchiamento artificiale.

Tabella 26: Variazioni della velocità di propagazione degli ultrasuoni dei campioni non trattati (NT) e trattati dopo invecchiamento artificiale (Δt_2-t_0). UPV t_0 : velocità di propagazione per i campioni tal quali; UPV t_1 : velocità di propagazione dopo il trattamento; UPV t_2 : velocità di propagazione nei campioni trattati dopo invecchiamento artificiale.

	UPV t_0		UPV t_1		UPV t_2		Δt_2-t_0	Δt_2-t_0
	m/s						m/s	%
NT	2431	± 210			2309	± 189	-122	-5,0
NANORESTORE®	2401	± 298	2393	± 335	2366	± 300	-35	-1,4
NANO ESTEL®	2195	± 98	2317	± 88	2266	± 178	71	3,2
CALOSIL®	2281	± 85	2313	± 102	2274	± 73	-6	-0,3
KSE 100®	2337	± 262	2428	± 239	2347	± 213	10	0,4

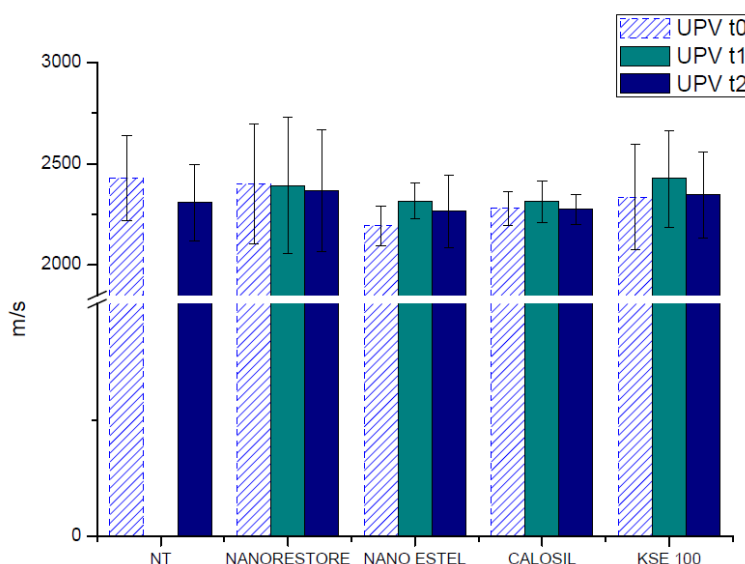


Figura 52: Variazioni della velocità di propagazione degli ultrasuoni dei campioni non trattati (NT) e trattati dopo invecchiamento artificiale (Δt_2-t_0). UPV t_0 : velocità di propagazione per i campioni tal quali; UPV t_1 : velocità di propagazione nei campioni trattati; UPV t_2 : velocità di propagazione nei campioni trattati dopo invecchiamento artificiale.

Tabella 27: Variazioni delle coordinate colorimetriche per i campioni non trattati (NT) e trattati dopo invecchiamento artificiale ($\Delta E_{t_2-t_0}$).

	$\Delta E_{t_2-t_0}$	
NT	2,48	$\pm 1,22$
NANORESTORE®	3,29	$\pm 2,21$
NANO ESTEL®	3,65	$\pm 2,62$
CALOSIL®	1,26	$\pm 0,39$
KSE 100®	2,43	$\pm 1,71$

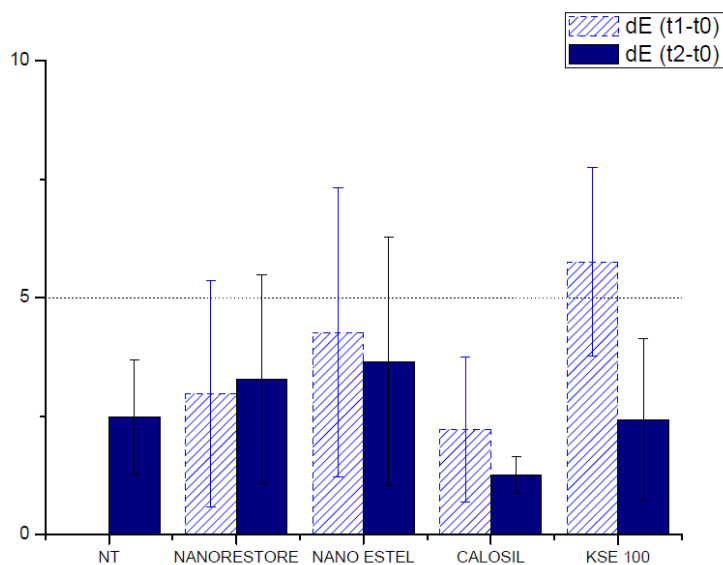


Figura 53: Variazioni delle coordinate colorimetriche per i campioni non trattati (NT) e trattati prima ($\Delta E_{t_1-t_0}$) e dopo invecchiamento artificiale ($\Delta E_{t_2-t_0}$).

*2.7 Strategie di conservazione proattive per il sito UNESCO dei Sassi di
Matera:
conclusioni e prospettive future*

“Preserving in time an object, as well as preserving any existing material, is nothing more, from a strictly technical point of view, than an attempt to slow down the evolutionary processes caused by the unbalanced conditions existing between the object and its environment” [227].

Con l'obiettivo di promuovere un approccio sistemico e integrato per la conservazione del sito patrimonio *UNESCO* dei *Sassi di Matera*, uniformando i risultati in ambito scientifico, il quadro metodologico proposto per il consolidamento della calcarenite materana si è attenuto all'approccio delineato nel rapporto pubblicato nel maggio 2007: *World Heritage Reports n°22 - Climate Change and World Heritage (§ 0.1)* [Fig. 1]. In questo contesto, sono stati implementati i seguenti *steps*:

- ✓ *Selezione dei Siti*: identificazione e selezione di siti rappresentativi del patrimonio culturale: il sito patrimonio *UNESCO* dei *Sassi di Matera* (Basilicata, Italia).
- ✓ *Analisi dei Problemi*: individuazione e caratterizzazione dei problemi osservabili o dimostrabili derivanti dai cambiamenti climatici.
Nel contesto di questo studio, sono stati evidenziati tassi di recessione critici, quantificati mediante l'applicazione dell'equazione di Lipfert. Considerata la fragilità intrinseca e la porosità del materiale analizzato, si è rivelata necessaria l'adozione di misure preventive per preservarne l'integrità e garantire la sua conservazione a lungo termine.
- ✓ *Elaborazione delle Risposte*: sviluppo e implementazione di strategie di risposta alle sollecitazioni climatiche, adattate alle specifiche esigenze dei siti di patrimonio culturale.
I risultati di questo studio forniscono informazioni preziose per la pianificazione di interventi di consolidamento. I dati preliminari raccolti offrono indicazioni utili per selezionare i trattamenti conservativi più adeguati al consolidamento della calcarenite di Gravina, oltre a previsioni sulla loro durabilità nel contesto specifico del sito di intervento.
- ✓ *Valutazione delle Migliori Pratiche*: Analisi e adozione di soluzioni ottimali, o *best practices*, per garantire risposte efficaci ed integrate con le politiche di gestione del patrimonio culturale. La ricerca ha approfondito la comprensione scientifica delle prestazioni dei consolidanti a base di *nanocalce* e nanoparticelle di silice.

Per lo sviluppo e l'implementazione di strategie di risposta alle sollecitazioni climatiche, il protocollo analitico condotto presso il *LAMA – Laboratorio Analisi Materiali Antichi* (Università IUAV di Venezia) ha ricoperto un ruolo fondamentale nella comprensione e nel monitoraggio dei campioni analizzati (§ 2.3).

Durante la fase iniziale, denominata Time Zero (t_0), sono state effettuate la caratterizzazione minero-petrografica e fisico-meccanica dei campioni. Questa fase di studio conoscitivo si è rivelata fondamentale, poiché ha consentito di

valutare con precisione le caratteristiche e le proprietà del materiale, nonché le modifiche indotte dai trattamenti e dal successivo invecchiamento artificiale, fornendo così una solida base per interventi mirati e ottimizzati. I risultati della caratterizzazione iniziale della calcarenite di Gravina hanno rivelato la prevalenza di calcite, con tracce di quarzo e, per i campioni SB, SC e FM, tracce di dolomite. L'eterogeneità del network poroso e i parametri fisico-meccanici hanno messo in evidenza l'importanza di una diagnosi dettagliata per valutare la vulnerabilità del materiale ai processi di degrado (§ 2.4.1 – 2.4.2), ricorrendo all'integrazione di diverse tecniche analitiche [192].

In linea con gli obiettivi dichiarati, la sperimentazione ha, in seguito, confrontato tre consolidanti a base di nanoparticelle (Calosil®, Nanorestore®, Nano Estel®), già impiegati su substrati carbonatici, con un consolidante tradizionale a base di silicato d'etile, ampiamente utilizzato nel restauro delle architetture di Matera.

L'approccio multi-analitico adottato ha permesso di valutare le variazioni di porosità, assorbimento d'acqua, resistenza meccanica e alterazione cromatica delle superfici trattate, sia prima che dopo l'applicazione dei consolidanti, e successivamente ai test di invecchiamento accelerato eseguiti in camera climatica (§2.3).

In generale, tutti i trattamenti hanno prodotto una riduzione del volume dei pori con raggio inferiore a 1 μm e un incremento del volume dei pori con dimensioni superiori a 1 μm nei campioni trattati, risultando in una diminuzione delle pressioni interne e una riduzione della vulnerabilità al degrado. Tuttavia, il trattamento NANO ESTEL® si distingue per un aumento del volume relativo dei pori nella fascia di 0,001-0,01 μm , pari al 1,82%.

NANORESTORE® ha mostrato una performance complessivamente modesta sia in termini di efficacia che di durabilità. Dopo il trattamento, si è verificata una leggera perdita di peso, accentuatasi ulteriormente con l'invecchiamento artificiale. La capacità di assorbimento d'acqua (WAC) è aumentata immediatamente dopo l'applicazione e ha continuato a crescere nel tempo, evidenziando una ridotta efficacia a lungo termine. Le indagini ultrasoniche (UPV) hanno rilevato una diminuzione della velocità di propagazione, segno di una riduzione della coesione del materiale. Dal punto di vista cromatico, il consolidante ha dimostrato una stabilità complessiva, accompagnata da una variazione moderata del colore dopo l'invecchiamento, da valutare in relazione al ridotto residuo secco osservato.

NANO ESTEL® ha ottenuto i risultati più promettenti tra i consolidanti testati. Dopo l'applicazione, il campione ha registrato un aumento di peso, che si è mantenuto positivo anche a seguito dell'invecchiamento. La WAC si è ridotta significativamente subito dopo il trattamento, rimanendo relativamente bassa nel tempo rispetto al t_0 , a conferma di una buona resistenza. La velocità ultrasonica è aumentata, segnalando un miglioramento della coesione interna del materiale, sebbene si sia osservata una lieve riduzione dell'efficacia dopo l'invecchiamento. Il consolidante ha dimostrato una buona stabilità cromatica nel tempo, pur producendo, per alcuni dei campioni, una notevole variazione delle coordinate cromatiche subito dopo l'applicazione.

CALOSIL® ha mostrato una discreta efficacia iniziale, con un lieve aumento di peso e una riduzione della capacità di assorbimento dell'acqua dopo il trattamento. Tuttavia, l'invecchiamento artificiale ha comportato una diminuzione delle prestazioni, come evidenziato dall'incremento della capacità di assorbimento d'acqua e dalla diminuzione della velocità ultrasonica. Nonostante ciò, il consolidante ha mantenuto una buona stabilità cromatica, registrando la minima variazione di colore iniziale tra i trattamenti. Complessivamente, i risultati suggeriscono modeste prestazioni superficiali.

KSE 100® ha evidenziato una buona penetrazione iniziale, con un significativo aumento di peso e una netta riduzione della WAC subito dopo il trattamento. Tuttavia, a seguito dell'invecchiamento, si è registrato un incremento della WAC e una diminuzione della velocità ultrasonica, suggerendo una perdita di efficacia nel lungo periodo. Dal punto di vista estetico, KSE 100® ha causato le maggiori variazioni cromatiche sia in fase iniziale che dopo l'invecchiamento, rendendolo meno idoneo nel preservare l'aspetto originale. Sebbene abbia offerto buone prestazioni iniziali, il deterioramento delle sue proprietà nel tempo ne limita l'affidabilità nel garantire la durabilità.

In Figura 54 viene presentata un'analisi comparativa delle prestazioni di quattro consolidanti, valutati secondo i parametri:

- variazione del peso nel tempo
- coefficiente di assorbimento d'acqua (WAC)
- velocità dell'impulso ultrasonico (UPV)
- variazioni delle coordinate cromatiche.

La scala di valutazione utilizzata è compresa tra 0 e 1, dove 1 indica la performance ottimale e 0 rappresenta la performance meno efficace. In conclusione, NANO ESTEL® emerge come il consolidante con le migliori performance globali. Tra i prodotti analizzati, tale sospensione colloidale acquosa di nanoparticelle di silice si distingue per l'equilibrio ottimale tra resistenza meccanica e integrazione estetica, mostrando un'elevata durabilità e stabilità nel tempo, anche in condizioni di stress ambientale.

Studi sulla durabilità che mettano in relazione i parametri utilizzati nelle fasi di invecchiamento artificiale con le condizioni reali di esposizione caratteristiche del contesto materano sono auspicabili. In particolare, poiché il trattamento NANO ESTEL® ha mostrato un aumento del volume relativo dei pori nella fascia di 0,001-0,01 μm , risulta cruciale indagare come tale incremento influenzi la resistenza ai cicli di cristallizzazione. Sebbene i test eseguiti abbiano confermato l'efficacia e la durabilità generale del prodotto, è altrettanto importante esaminare la sua resistenza ai cicli di gelo e disgelo, nonché ai cicli di cristallizzazione dei sali. Studi recenti, come quello di Pozo-Antonio et al. (2019) [24], hanno infatti evidenziato che il consolidante a base di nanosilice NANO ESTEL® ha causato un aumento del decadimento del materiale dopo cicli di cristallizzazione. Approfondire la valutazione della durabilità dei trattamenti, con particolare attenzione ai test di invecchiamento naturale, ai cicli di gelo e disgelo e alla cristallizzazione dei sali, rappresenta un'opportunità per comprendere al meglio la resistenza del materiale trattato nelle condizioni ambientali reali. In questa

prospettiva, lo studio ha privilegiato tecniche analitiche applicabili direttamente in situ.

È importante sottolineare che la rappresentatività dei dati acquisiti in questo studio richiede un'analisi critica approfondita, a causa della significativa variabilità osservata nelle caratteristiche intrinseche, fisiche e meccaniche, dei provini. Tale variabilità, attentamente considerata nel processo decisionale, ha guidato la scelta di caratterizzare, in una fase iniziale (t_0), i materiali provenienti da cave e siti differenti, con l'obiettivo di garantire una rappresentatività più accurata del litotipo. Per successivi test (t_1 e t_2), sono stati invece selezionati provini estratti da cava, poiché la letteratura scientifica [130] documenta l'uso prevalente della *litofacies Fine bioclastic calcarenite* (FBC) nel patrimonio costruito di Matera.

I dati ottenuti evidenziano una variabilità significativa in parametri come la capacità di assorbimento dell'acqua, la velocità degli impulsi ultrasonici e le variazioni cromatiche, riflettendo l'eterogeneità del materiale, influenzata dalla composizione mineralogica e dalla complessa struttura porosa. Nonostante tutte le prove siano state eseguite e ripetute in modo, per definizione, statisticamente significativo, in una valutazione *ex post*, è possibile affermare che una analisi che includa un numero maggiore di provini e test, e che consideri, per la fase di applicazione dei prodotti, le modalità di applicazione e le variabili ambientali, sarebbe cruciale per identificare le soluzioni di conservazione più adatte a ciascun caso specifico. Un continuo approfondimento dei risultati ottenuti, che tenga conto della variabilità dei dati, contribuirà a rafforzare le conclusioni e a indirizzare le future ricerche verso approcci sempre più mirati ed efficaci. D'altro canto, nel contesto di una sperimentazione in continua evoluzione, i risultati finora ottenuti si configurano come *baseline* per ulteriori indagini e sviluppi in questo settore.

Nel contesto della conservazione, risulta altresì fondamentale valutare la sostenibilità dei materiali e dei processi impiegati, considerando gli impatti ambientali, economici e sociali. L'adozione di materiali sostenibili può ridurre i costi di manutenzione e prolungare la vita utile delle strutture, generando risparmi economici significativi nel lungo periodo. Inoltre, tali pratiche favoriscono la sostenibilità ambientale e tutelano la salute dei lavoratori, mitigando i rischi associati ai materiali utilizzati. Le scelte in questo ambito non solo contribuiscono alla conservazione del patrimonio culturale, ma promuovono anche un ciclo virtuoso di sviluppo per le comunità locali, supportando un approccio integrato e responsabile.

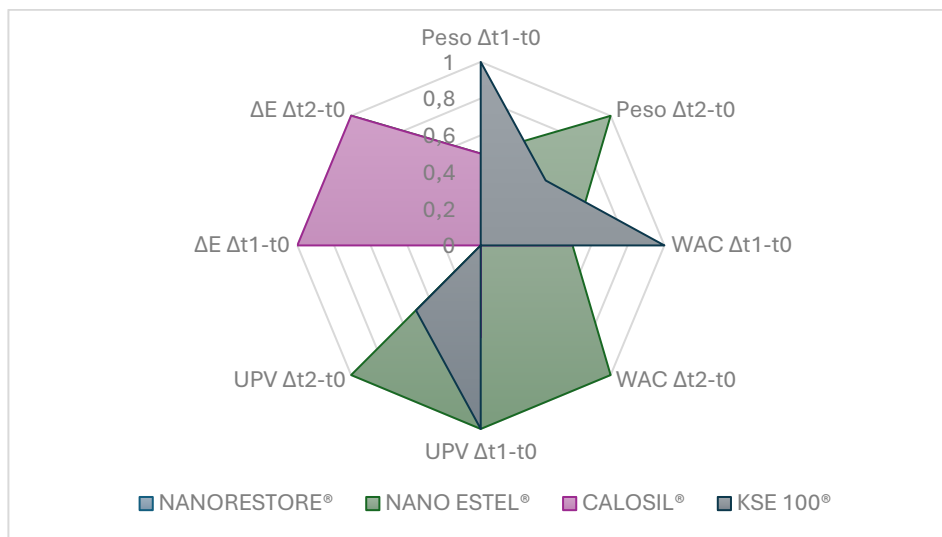


Figura 54: Confronto delle prestazioni di quattro consolidanti basato su Key Performance indicators: variazione del peso, coefficiente di assorbimento d'acqua (WAC), velocità dell'impulso ultrasonico (UPV) e variazioni cromatiche. La scala di valutazione va da 0 (performance minima) a 1 (performance ottimale).

L'approccio preventivo e programmato alla conservazione del patrimonio culturale può essere notevolmente potenziato attraverso l'integrazione di tecnologie digitali e piattaforme avanzate, come evidenziato da Guida e Porcari (2017) [18]. In particolare, strumenti come il Building Information Modeling (BIM) e il suo sviluppo specifico per il patrimonio storico, l'Heritage BIM (HBIM), offrono una nuova prospettiva nella modellazione e gestione degli edifici storici, consentendo di integrare dati geometrici, materiali, storici e diagnostici in un'unica piattaforma digitale. Come sottolineato da Pocobelli et al. (2018) [228], l'HBIM rappresenta un'importante evoluzione nel settore della conservazione, fornendo una gestione più efficiente delle informazioni legate ai materiali, ai processi di degrado e agli interventi conservativi. Grazie a tecniche avanzate di rilievo, come laser scanner e fotogrammetria digitale, è possibile creare modelli parametrici dettagliati che supportano la documentazione e la pianificazione delle attività di manutenzione.

Un significativo progresso nell'ambito dell'HBIM è rappresentato dall'automazione dei processi di modellazione basati su point cloud, che accelera la trasformazione dei dati di rilievo in modelli parametrici. Tuttavia, come rilevato da Pocobelli et al., la gestione di forme complesse e non standardizzate tipiche del patrimonio storico richiede ancora un notevole sforzo manuale. Secondo Yang et al. (2020) [229], l'HBIM può essere ulteriormente potenziato attraverso l'integrazione con tecnologie tradizionali e innovative, come i sistemi GIS (Geographic Information System) per la gestione spaziale e le ontologie per la rappresentazione semantica delle relazioni tra gli elementi costitutivi. Questa sinergia consente di superare le limitazioni dei modelli tridimensionali tradizionali, offrendo funzionalità avanzate come la segmentazione semantica e la gestione dei dati temporali e relazionali, particolarmente utili per edifici con morfologie complesse e stratificazioni storiche.

L'uso dell'HBIM si è dimostrato efficace nel combinare modelli tridimensionali con dati storici e diagnostici, come evidenziato da Morero et al. (2023) [230], che hanno mostrato come questa tecnologia possa migliorare il monitoraggio delle condizioni strutturali e consentire una pianificazione accurata degli interventi di manutenzione preventiva, contribuendo alla salvaguardia del patrimonio storico. Un esempio significativo è rappresentato dal Teatro Olimpico di Vicenza, dove Antonelli et al. (2024) [231] hanno applicato un approccio multidisciplinare, integrando analisi scientifiche, diagnostiche e documentali con un modello HBIM. Questo modello ha permesso di unire dati geometrici, materiali, storici e analitici, migliorando la gestione delle informazioni e la pianificazione degli interventi in modo preciso ed efficiente.

Oltre a descrivere con maggiore precisione lo stato attuale delle strutture, l'HBIM offre strumenti avanzati per la simulazione e la previsione degli interventi futuri, migliorando la capacità di rispondere alle sfide ambientali e strutturali. L'integrazione con sistemi GIS e ontologie consente di analizzare le interazioni tra i vari elementi architettonici e monitorare i cambiamenti nel tempo, favorendo una gestione sostenibile e lungimirante del patrimonio. Inoltre, l'approccio multidisciplinare e collaborativo promuove un'efficace cooperazione tra professionisti della conservazione, architetti e ricercatori, garantendo soluzioni

innovative e rispettose del valore storico delle strutture. In definitiva, l'HBIM rappresenta un'opportunità straordinaria per la conservazione del patrimonio culturale, offrendo una piattaforma tecnologica che unisce innovazione, sostenibilità e tutela del valore storico [Fig. 55].

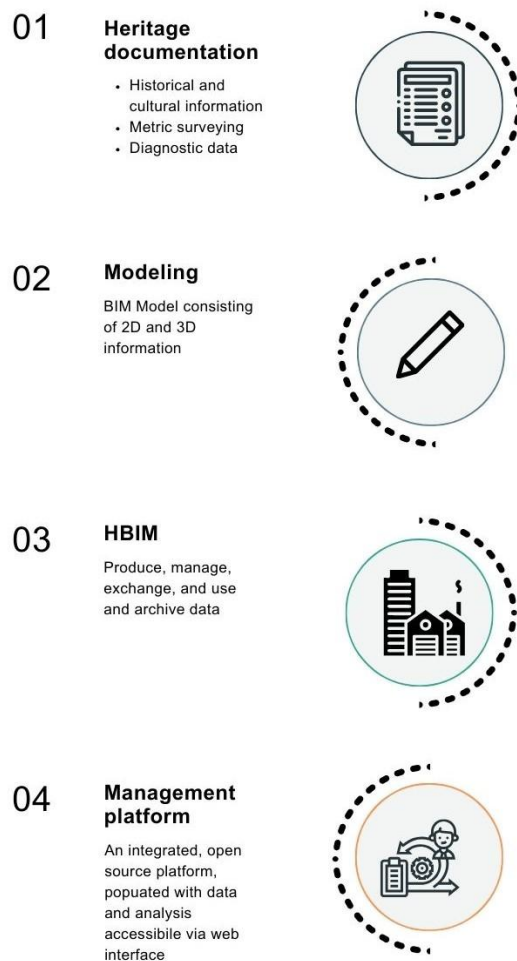


Figura 55: Dalla raccolta dei dati alla digitalizzazione: strategie per la gestione del patrimonio.

Bibliografia

1. Brabec, E.; Chilton, E. Toward An Ecology Of Cultural Heritage. *Change Over Time* **2015**, 5, 266–285, Doi:10.1353/Cot.2015.0021.
2. *Conclusioni Del Consiglio, Del 21 Maggio 2014 , Relative Al Patrimonio Culturale Come Risorsa Strategica Per Un'europa Sostenibile*; 2014;
3. Pinna, A. La Convenzione Quadro Sui Cambiamenti Climatici. *EQ* **1998**, Doi:10.1406/1937.
4. Wilkinson, E.; Schipper, L.; Simonet, C.; Kubik, Z. Cambiamento Climatico, Migrazioni E Agenda 2030 Per Lo Sviluppo Sostenibile. *EQ* **2017**, Doi:10.1406/86839.
5. Agenda 2030 Available Online: <https://Unric.Org/It/Agenda-2030/> (Accessed On 3 August 2023).
6. Centre, U.W.H. World Heritage Reports N°22 - Climate Change And World Heritage Available Online: <https://Whc.Unesco.Org/En/Activities/474/> (Accessed On 11 September 2024).
7. European Commission; Directorate-General For Education, Y., Sport And Culture *Strengthening Cultural Heritage Resilience For Climate Change – Where The European Green Deal Meets Cultural Heritage*; Publications Office Of The European Union, 2022;
8. Balliana, E.; Ricci, G.; Pesce, C.; Zendri, E. Assessing The Value Of Green Conservation For Cultural Heritage: Positive And Critical Aspects Of Already Available Methodologies. **2016**, 7, 185–202.
9. Castellari, S.; Venturini, S.; Giordano, F.; Denti, A.B.; Bigano, A.; Bindi, M.; Bosello, F.; Carrera, L.; Chiriaco, M.V.; Danovaro, R.; Et Al. *Elementi Per Una Strategia Nazionale Di Adattamento Ai Cambiamenti Climatici*; Min. Dell'ambiente E Della Tutela Del Territorio E Del Mare, 2014; ISBN 978-88-87728-07-1.
10. Centre, U.W.H. The Sassi And The Park Of The Rupestrian Churches Of Matera Available Online: <https://Whc.Unesco.Org/En/List/670/> (Accessed On 17 May 2023).
11. Restucci, A. *Matera, I Sassi. Manuale Del Recupero*; Einaudi, 1991;
12. Codice Di Pratica Per La Sicurezza E La Conservazione Dei Sassi Di Matera. *Fondazione Zetema*.
13. Colonna, A.P.; Conte, A.; Di Ginosa Francesco Paolo *Laboratorio Di Pratiche Della Conoscenza Nei Sassi Di Matera - Tessiture Murarie Come Eredità Del Costruito*; ITA, 2015; ISBN 978-88-95110-21-9.

14. Rocchi, P. *I Sassi Di Matera - Tra Restauro Conservativo E Consolidamento*; Marsilio.; 1988;
15. Rampazzi, L.; Andreotti, A.; Bressan, M.; Colombini, M.P.; Corti, C.; Cuzman, O.; d'Alessandro, N.; Liberatore, L.; Palombi, L.; Raimondi, V.; Et Al. An Interdisciplinary Approach To A Knowledge-Based Restoration: The Dark Alteration On Matera Cathedral (Italy). *Applied Surface Science* **2018**, 458, 529–539, Doi:10.1016/J.Apsusc.2018.07.101.
16. Sacchi, B.; Vettori, S.; Andreotti, A.; Rampazzi, L.; Colombini, M.P.; Tiano, P. Assessment Of Water Repellent Treatments For The Stone Of The Matera Cathedral Facade (Italy). *International Journal Of Architectural Heritage* **2022**, 16, 365–373, Doi:10.1080/15583058.2020.1782532.
17. Bernardo, G.; Guida, A.; Porcari, V.D.; Visone, F. The Preventive Maintenance Of The Religious Heritage Of The City Of Matera. In *Proceedings Of The ESRARC 2022 12th European Symposium On Religious Art, Restoration & Conservation, Proceedings Book*; Kermes/Books: Torino, 2022; Pp. 190–194.
18. Guida, A.; Porcari, V.D. Prevention, Monitoring And Conservation For A Smart Management Of The Cultural Heritage. *Int. J. HA* **2017**, 2, 71–80, Doi:10.2495/HA-V2-N1-71-80.
19. Ciantelli, C.; Palazzi, E.; Hardenberg, J.; Vaccaro, C.; Tittarelli, F.; Bonazza, A. How Can Climate Change Affect The UNESCO Cultural Heritage Sites In Panama? *Geosciences* **2018**, 8, 296, Doi:10.3390/Geosciences8080296.
20. Fuente, D. De La; Vega, J.M.; Viejo, F.; Díaz, I.; Morcillo, M. City Scale Assessment Model For Air Pollution Effects On The Cultural Heritage. **2011**, Doi:10.1016/J.Atmosenv.2010.12.011.
21. Slížková, Z.; Frankeová, D.; Drdácý, M. Consolidating Efficiency Of Nanolime Product Calosil On Porous Limestone. *Buildings* **2023**, 13, 209, Doi:10.3390/Buildings13010209.
22. Baglioni, P.; Chelazzi, D.; Giorgi, R.; Carretti, E.; Toccafondi, N.; Jaidar, Y. Commercial Ca(OH)₂ Nanoparticles For The Consolidation Of Immovable Works Of Art. *Appl. Phys. A* **2014**, 114, 723–732, Doi:10.1007/S00339-013-7942-6.
23. Barberena-Fernández, A.M.; Andrés-Moya, M.S.; Carmona-Quiroga, P.M.; Blanco-Varela, M.T. Nanosilica And Nanolime On The Conservation Of Mortars And Concretes Of Our Heritage.; 2014; Pp. 127–132.

24. Pozo-Antonio, J.S.; Otero, J.; Alonso, P.; Mas I Barberà, X. Nanolime-And Nanosilica-Based Consolidants Applied On Heated Granite And Limestone: Effectiveness And Durability. *Construction And Building Materials* **2019**, *201*, 852–870, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2018.12.213.
25. Calia, A.; Masieri, M.; Baldi, G.; Mazzotta, C. *THE EVALUATION OF NANOSILICA PERFORMANCE FOR CONSOLIDATION TREATMENT OF AN HIGHLY POROUS CALCARENITE*; 2012;
26. Impact Of Nanosilica On Lime Restoration Mortars Properties. *Journal Of Cultural Heritage* **2022**, *55*, 210–220, Doi:10.1016/J.Culher.2022.03.014.
27. Lazzarini, L.; Tabasso, M.L. *Il Restauro Della Pietra*; CEDAM, 1986; ISBN 978-88-13-15958-0.
28. Fitzner, B.; Heinrichs, K. Damage Diagnosis On Stone Monuments - Weathering Forms, Damage Categories And Damage Indices.; 2001.
29. Cantisani, E.; Canova, R.; Fratini, F.; Manganelli Del Fà, C.; Mazzuoli, R. Relationships Between Microstructures And Physical Properties Of White Apuan Marbles: Inferences On Weathering Durability. **2000**.
30. Benavente, D. Why Pore Size Is Important In The Deterioration Of Porous Stones Used In The Built Heritage. *Macra* **2011**, *15*, 41–42.
31. Choquette, P.W.; Pray, L.C. Geologic Nomenclature And Classification Of Porosity In Sedimentary Carbonates. *AAPG Bulletin* **1970**, *54*, 207–250.
32. Haul, R. S. J. Gregg, K. S. W. Sing: Adsorption, Surface Area And Porosity. 2. Auflage, Academic Press, London 1982. 303 Seiten, Preis: \$ 49.50. *Berichte Der Bunsengesellschaft Für Physikalische Chemie* **1982**, *86*, 957–957, Doi:10.1002/Bbpc.19820861019.
33. Kodikara, J.; Barbour, S.L.; Fredlund, D.G. Changes In Clay Structure And Behaviour Due To Wetting And Drying. In *Consolidating Knowledge. Proceedings Of The 8th Australia New Zealand Conference On Geomechanics, Hobart, February 1999*.; Australian Geomechanics Society (AGS), 1999; Pp. 179–185.
34. Siegesmund, S.; Dürrast, H. Physical And Mechanical Properties Of Rocks. In; 2014 ISBN 978-3-642-45154-6.
35. Benavente, D.; Del-Cura, M.Á.; Fort, R.; Salvador, O. Durability Estimation Of Porous Building Stones From Pore Structure And Strength. *Engineering Geology* **2004**, *74*, 113–127, Doi:10.1016/J.Enggeo.2004.03.005.

36. Charola, A.E.; Wendler, E. An Overview Of The Water-Porous Building Materials Interactions. *Restoration Of Buildings And Monuments* **2015**, *21*, 55–65, Doi:10.1515/Rbm-2015-2006.
37. Ruedrich, J.; Kirchner, D.; Siegesmund, S. Physical Weathering Of Building Stones Induced By Freeze–Thaw Action: A Laboratory Long-Term Study. *Environ Earth Sci* **2011**, *63*, 1573–1586, Doi:10.1007/S12665-010-0826-6.
38. A, A.; Zehnder, K. *Salt Weathering On Monuments*; 1989;
39. Rodriguez-Navarro, C.; Doehne, E. Salt Weathering: Influence Of Evaporation Rate, Supersaturation And Crystallization Pattern. *Earth Surface Processes And Landforms* **1999**, *24*, 191–209, Doi:10.1002/(SICI)1096-9837(199903)24:3<191::AID-ESP942>3.0.CO;2-G.
40. Steiger, M. Crystal Growth In Porous Materials—I: The Crystallization Pressure Of Large Crystals. *Journal Of Crystal Growth* **2005**, *282*, 455–469, Doi:10.1016/J.Jcrysgr.2005.05.007.
41. Grossi, C.M.; Brimblecombe, P.; Menéndez, B.; Benavente, D.; Harris, I.; Déqué, M. Climatology Of Salt Transitions And Implications For Stone Weathering. *Sci Total Environ* **2011**, *409*, 2577–2585, Doi:10.1016/J.Scitotenv.2011.03.029.
42. Charola, A.E. Salts In The Deterioration Of Porous Materials: An Overview. *Journal Of The American Institute For Conservation* **2000**, *39*, 327–343, Doi:10.1179/019713600806113176.
43. Doehne, E.; Price, C. *Stone Conservation: An Overview Of Current Research*; 2011; Vol. 37; ISBN 978-1-60606-046-9.
44. Charola, A.E.; Ware, R. Acid Deposition And The Deterioration Of Stone: A Brief Review Of A Broad Topic. *Geological Society, London, Special Publications* **2002**, *205*, 393–406, Doi:10.1144/GSL.SP.2002.205.01.28.
45. Camuffo, D.; Sturaro, G.; Valentino, A. Urban Climatology Applied To The Deterioration Of The Pisa Leaning Tower, Italy. *Theoretical And Applied Climatology* **1999**, *63*, 223–231, Doi:10.1007/S007040050104.
46. Piovesan, R.; Tesser, E.; Maritan, L.; Zaccariello, G.; Mazzoli, C.; Antonelli, F. Mapping Of Stones And Their Deterioration Forms: The Clock Tower, Venice (Italy). *Heritage Science* **2023**, *11*, 108, Doi:10.1186/S40494-023-00909-4.
47. Fitzner, B.; Heinrichs, K.; La Bouchardiere, D. Damage Index For Stone Monuments. **2002**.

48. Sabbioni, C.; Cassar, M.; Brimblecombe, P.; Lefèvre, R.-A. Vulnerability Of Cultural Heritage To Climate Change. *Pollution Atmospherique* **2009**, 157–169.
49. Fatorić, S.; Seekamp, E. Are Cultural Heritage And Resources Threatened By Climate Change? A Systematic Literature Review. *Climatic Change* **2017**, 142, 227–254, Doi:10.1007/S10584-017-1929-9.
50. Orr, S.A.; Richards, J.; Fatorić, S. Climate Change And Cultural Heritage: A Systematic Literature Review (2016–2020). *The Historic Environment: Policy & Practice* **2021**, 12, 434–477, Doi:10.1080/17567505.2021.1957264.
51. Daly, C. Climate Change And The Conservation Of Archaeological Sites: A Review Of Impacts Theory. *Conservation And Management Of Archaeological Sites* **2011**, 13, 293–310, Doi:10.1179/175355212X13315728646058.
52. Sesana, E.; Gagnon, A.S.; Ciantelli, C.; Cassar, J.; Hughes, J.J. Climate Change Impacts On Cultural Heritage: A Literature Review. *Wires Climate Change* **2021**, 12, E710, Doi:10.1002/Wcc.710.
53. Coletti, C. Climate Change Threats To Stone Cultural Heritage: State Of The Art Of Quantitative Damage Functions And New Challenges For A Sustainable Future. *Heritage* **2024**, 7, 3276–3290, Doi:10.3390/Heritage7060154.
54. Tringa, E.; Kavroudakis, D.; Tolika, K. Microclimate-Monitoring: Examining The Indoor Environment Of Greek Museums And Historical Buildings In The Face Of Climate Change. *Heritage* **2024**, 7, 1400–1418, Doi:10.3390/Heritage7030067.
55. Abate, N.; Violante, C.; Masini, N. A Semi-Automatic-Based Approach To The Extraction Of Underwater Archaeological Features From Ultra-High-Resolution Bathymetric Data: The Case Of The Submerged Baia Archaeological Park. *Remote Sens.* **2024**, 16, Doi:10.3390/Rs16111908.
56. Giglio, F.; Frontera, P.; Malara, A.; Armocida, F. Materials And Climate Change: A Set Of Indices As The Benchmark For Climate Vulnerability And Risk Assessment For Tangible Cultural Heritage In Europe. *Sustainability* **2024**, 16, 2067, Doi:10.3390/Su16052067.
57. Bardeschi, C.D. *Abbecedario Minimo Ananke: Cento Voci Per Il Restauro*; Altralinea Edizioni, 2017; ISBN 978-88-948691-9-4.
58. ICOM-CC | Terminology For Conservation (2008) Available Online: <https://www.icom-cc.org/en/terminology-for-conservation> (Accessed On 27 August 2024).

59. Codice Dei Beni Culturali E Del Paesaggio Available Online: <https://www.altalex.com/documents/codici-altalex/2014/11/20/codice-dei-beni-culturali-e-del-paesaggio> (Accessed On 27 August 2024).
60. *Normal 20/85 : Interventi Conservativi : Progettazione Esecuzione E Valutazione Preventiva*; 1985;
61. Price, C.; Amoroso, G.; Fassina, V. Stone Decay And Conservation: Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation And Protection. *Studies In Conservation* **1984**, 29, 158, Doi:10.2307/1506020.
62. Memorie Di Scienze Fisiche E Naturali. Rendiconti Della Accademia Nazionale Delle Scienze Detta Dei XL Con Spedizione Gratuita - 9788854845985 In Filosofia Della Scienza | Libreria Universitaria Available Online: https://www.libreriauniversitaria.it/Memorie-Scienze-Fisiche-Naturali-Rendiconti/Libro/9788854845985?srsltid=Afmboorlbilj2xfgt2etioeni8atei_Tp9fnu05scknor10nhj_Fyd (Accessed On 27 August 2024).
63. Baglioni, R.; Villegas Sánchez, R.; Sameño Puerto, M. 1. Tipología De Materiales Para Tratamiento. In *Proceedings Of The Metodología De Diagnóstico Y Evaluación De Tratamiento Para La Conservación De Los Edificios Históricos*, 2003, ISBN 84-8266-370-4, Págs. 168-193; Instituto Andaluz Del Patrimonio Histórico, 2003; Pp. 168–193.
64. Praticò, Y.; Caruso, F.; Rodrigues, J.D.; Girardet, F.; Sassoni, E.; Scherer, G.W.; Vergès-Belmin, V.; Weiss, N.R.; Wheeler, G.; Flatt, R.J. Stone Consolidation: A Critical Discussion Of Theoretical Insights And Field Practice. *RILEM Technical Letters* **2019**, 4, 145–153, Doi:10.21809/Rilemtechlett.2019.101.
65. Daehne, A.; Herm, C. Calcium Hydroxide Nanosols For The Consolidation Of Porous Building Materials - Results From EU-STONECORE. *Heritage Science* **2013**, 1, 11, Doi:10.1186/2050-7445-1-11.
66. Baglioni, P.; Chelazzi, D. How Science Can Contribute To The Remedial Conservation Of Cultural Heritage. *Chemistry – A European Journal* **2021**, 27, 10798–10806, Doi:10.1002/Chem.202100675.
67. UNI EN 12390-5:2009 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://conto.uni.com/uni-en-12390-5-2009> (Accessed On 27 August 2024).
68. EN 14579:2004 - Natural Stone Test Methods - Determination Of Sound Speed Propagation Available Online: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/d1c8d210-32e8->

- 48ff-8476-9e3a9e25151c/En-14579-2004 (Accessed On 20 October 2023).
69. Standard Test Method For Evaluation Of Durability Of Rock For Erosion Control Under Freezing And Thawing Conditions Available Online: https://www.astm.org/D5312_D5312m-12r13.html (Accessed On 20 June 2024).
 70. UNI 11432:2011 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://store.uni.com/uni-11432-2011> (Accessed On 27 August 2024).
 71. UNI EN 1015-19:2008 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://store.uni.com/uni-en-1015-19-2008> (Accessed On 27 August 2024).
 72. UNI EN 15886:2010 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://store.uni.com/uni-en-15886-2010> (Accessed On 15 January 2024).
 73. Mokrzycki, W.S.; Tatol, M. Color Difference ΔE : A Survey. *Machine Graphics And Vision* **2011**, 383–411.
 74. UNI EN 12370:2001 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://store.uni.com/uni-en-12370-2001> (Accessed On 20 June 2024).
 75. UNI EN 14617-5:2012 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://store.uni.com/uni-en-14617-5-2012> (Accessed On 27 August 2024).
 76. Faria, P.; Henriques, F.; Rato, V. Comparative Evaluation Of Lime Mortars For Architectural Conservation. *Journal Of Cultural Heritage - J CULT HERIT* **2008**, 9, 338–346, Doi:10.1016/J.Culher.2008.03.003.
 77. Price, C.; Ross, K.; White, G. A Further Appraisal Of The ‘Lime Technique’ For Limestone Consolidation, Using A Radioactive Tracer. *Studies In Conservation* **1988**, 33, 178–186, Doi:10.1179/Sic.1988.33.4.178.
 78. Brajer, I.; Kalsbeek, N. Limewater Absorption And Calcite Crystal Formation On A Limewater-Impregnated Secco Wall Painting. *Studies In Conservation* **1999**, 44, 145–156, Doi:10.1179/Sic.1999.44.3.145.
 79. Bracci, S.; Sacchi, B.; Ferreira Pinto, A.P.; Delgado Rodrigues, J. Inorganic Consolidants On Stone Artefacts: Optimisation Of Application Procedures For Marble And Limestones. In *Proceedings Of The International Symposium On Stone Consolidation In Cultural Heritage—Research And Practice*, J. Delgado Rodrigues And JM Mimoso (Eds.), Lisbon; 2008; Pp. 81–90.

80. Chelazzi, D.; Poggi, G.; Jaidar, Y.; Toccafondi, N.; Giorgi, R.; Baglioni, P. Hydroxide Nanoparticles For Cultural Heritage: Consolidation And Protection Of Wall Paintings And Carbonate Materials. *J Colloid Interface Sci* **2013**, *392*, 42–49, Doi:10.1016/J.Jcis.2012.09.069.
81. Favaro, M.; Mendichi, R.; Ossola, F.; Russo, U.; Simon, S.; Tomasin, P.; Vigato, P. Evaluation Of Polymers For Conservation Treatments Of Outdoor Exposed Stone Monuments. Part I: Photo-Oxidative Weathering. *Polymer Degradation And Stability - POLYM DEGRAD STABIL* **2006**, *91*, 3083–3096, Doi:10.1016/J.Polymdegradstab.2006.08.012.
82. Zendri, E.; Biscontin, G.; Gazerla, R.; Storaro, L. Caratterizzazione E Reattività Di Consolidanti Di Natura Silicatica. In; ITA, 2002.
83. Khitab, A.; Ahmad, S.; Munir, M.J.; Kazmi, S.M.S.; Arshad, T.; Khushnood, R.A. Synthesis And Applications Of Nano Titania Particles: A Review. *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE* **2018**, *53*, 90–105, Doi:10.1515/Rams-2018-0007.
84. Giorgi, R.; Dei, L.; Baglioni, P. A New Method For Consolidating Wall Paintings Based On Dispersions Of Lime In Alcohol. *Studies In Conservation* **2000**, *45*, 154–161, Doi:10.2307/1506761.
85. Rodriguez-Navarro, C.; Ruiz-Agudo, E. Nanolimes: From Synthesis To Application. *Pure And Applied Chemistry* **2018**, *90*, 523–550, Doi:10.1515/Pac-2017-0506.
86. Ambrosi, M.; Dei, L.; Giorgi, R.; Neto, C.; Baglioni, P. Colloidal Particles Of Ca(OH)₂: Properties And Applications To Restoration Of Frescoes. *Langmuir* **2001**, *17*, 4251–4255, Doi:10.1021/La010269b.
87. David, M.E.; Ion, R.-M.; Grigorescu, R.M.; Iancu, L.; Andrei, E.R. Nanomaterials Used In Conservation And Restoration Of Cultural Heritage: An Up-To-Date Overview. *Materials* **2020**, *13*, 2064, Doi:10.3390/Ma13092064.
88. Becerra, J.; Zaderenko, A.P.; Gómez-Morón, M.A.; Ortiz, P. Nanoparticles Applied To Stone Buildings. *International Journal Of Architectural Heritage* **2021**, *15*, 1320–1335, Doi:10.1080/15583058.2019.1672828.
89. Borsoi, G.; Lubelli, B.; Van Hees, R.; Veiga, R.; Santos Silva, A. Evaluation Of The Effectiveness And Compatibility Of Nanolime Consolidants With Improved Properties. *Construction And Building Materials* **2017**, *142*, 385–394, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2017.03.097.
90. Rodriguez-Navarro, C.; Suzuki, A.; Ruiz-Agudo, E. Alcohol Dispersions Of Calcium Hydroxide Nanoparticles For Stone

- Conservation. *Langmuir* **2013**, 29, 11457–11470, Doi:10.1021/La4017728.
91. Costa, D.; Rodrigues, J. *Consolidation Of A Porous Limestone With Nanolime*; 2012;
 92. Taglieri, G.; Otero, J.; Daniele, V.; Gioia, G.; Macera, L.; Starinieri, V.; Charola, A.E. The Biocalcarenite Stone Of Agrigento (Italy): Preliminary Investigations Of Compatible Nanolime Treatments. *Journal Of Cultural Heritage* **2018**, 30, 92–99, Doi:10.1016/J.Culher.2017.11.003.
 93. Borsoi, G.; Lubelli, B.; Hees, R. Van; Veiga, R.; Silva, A.S. Application Protocol For The Consolidation Of Calcareous Substrates By The Use Of Nanolimes: From Laboratory Research To Practice. *Restoration Of Buildings And Monuments* **2016**, 22, 99–109, Doi:10.1515/Rbm-2016-0008.
 94. Borsoi, G.; Lubelli, B.; Van Hees, R.; Veiga, R.; Silva, A.S.; Colla, L.; Fedele, L.; Tomasin, P. Effect Of Solvent On Nanolime Transport Within Limestone: How To Improve In-Depth Deposition. *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects* **2016**, 497, 171–181, Doi:10.1016/J.Colsurfa.2016.03.007.
 95. Ferreira Pinto, A.P.; Delgado Rodrigues, J. Consolidation Of Carbonate Stones: Influence Of Treatment Procedures On The Strengthening Action Of Consolidants. *Journal Of Cultural Heritage* **2012**, 13, 154–166, Doi:10.1016/J.Culher.2011.07.003.
 96. Pinto, A.P.F.; Rodrigues, J.D. Stone Consolidation: The Role Of Treatment Procedures. *Journal Of Cultural Heritage* **2008**, 9, 38–53, Doi:10.1016/J.Culher.2007.06.004.
 97. Nanolime Consolidation Of The Main Building Stone Of The Archaeological Site Of Volubilis (Morocco). *Journal Of Cultural Heritage* **2020**, 43, 98–107, Doi:10.1016/J.Culher.2019.12.006.
 98. Borsoi, G. Nanostructured Lime-Based Materials For The Conservation Of Calcareous Substrates. *A+BE | Architecture And The Built Environment* **2017**, 1–200, Doi:10.7480/Abe.2017.8.1842.
 99. Otero, J.; Pozo-Antonio, J.S.; Montojo, C. Influence Of Application Method And Number Of Applications Of Nanolime On The Effectiveness Of The Doulting Limestone Treatments. *Mater Struct* **2021**, 54, 41, Doi:10.1617/S11527-020-01607-4.
 100. Badreddine, D.; Beck, K.; Brunetaud, X.; Chaaba, A.; Al-Mukhtar, M. Nanolime Consolidation Of The Main Building Stone Of The Archaeological Site Of Volubilis (Morocco). *Journal Of Cultural Heritage* **2020**, 43, Doi:10.1016/J.Culher.2019.12.006.

101. Taglieri, G.; Daniele, V.; Re, G.D.; Volpe, R. A New And Original Method To Produce $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Nanoparticles By Using An Anion Exchange Resin. *Advances In Nanoparticles* **2015**, *4*, 17–24, Doi:10.4236/Anp.2015.42003.
102. Lopez-Arce, P.; Zornoza-Indart, A. Carbonation Acceleration Of Calcium Hydroxide Nanoparticles: Induced By Yeast Fermentation. *Appl. Phys. A* **2015**, *120*, 1475–1495, Doi:10.1007/S00339-015-9341-7.
103. Licchelli, M.; Malagodi, M.; Weththimuni, M.; Zanchi, C. Nanoparticles For Conservation Of Bio-Calcarene Stone. *Appl. Phys. A* **2014**, *114*, 673–683, Doi:10.1007/S00339-013-7973-Z.
104. Zornoza-Indart, A.; Lopez-Arce, P.; Leal, N.; Simão, J.; Zoghalmi, K. Consolidation Of A Tunisian Bioclastic Calcarene: From Conventional Ethyl Silicate Products To Nanostructured And Nanoparticle Based Consolidants. *Construction And Building Materials* **2016**, *116*, 188–202, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2016.04.114.
105. Rodriguez-Navarro, C.; Ruiz-Agudo, E.; Ortega-Huertas, M.; Hansen, E. Nanostructure And Irreversible Colloidal Behavior Of $\text{Ca}(\text{OH})_2$: Implications In Cultural Heritage Conservation. *Langmuir* **2005**, *21*, 10948–10957, Doi:10.1021/La051338f.
106. Gomez-Villalba, L.S.; Salcines, C.; Fort, R. Application Of Inorganic Nanomaterials In Cultural Heritage Conservation, Risk Of Toxicity, And Preventive Measures. *Nanomaterials* **2023**, *13*, 1454, Doi:10.3390/Nano13091454.
107. Tesser, E.; Lazzarini, L.; Ganzerla, R.; Antonelli, F. The Decay Of The Polysiloxane Resin Sogesil XR893 Applied In The Past Century For Consolidating Monumental Marble Surfaces. *Journal Of Cultural Heritage* **2017**, *27*, Doi:10.1016/J.Culher.2017.03.001.
108. De Ferri, L.; Lottici, P.P.; Lorenzi, A.; Montenero, A.; Salvioli-Mariani, E. Study Of Silica Nanoparticles - Polysiloxane Hydrophobic Treatments For Stone-Based Monument Protection. *Journal Of Cultural Heritage* **2011**, *12*, 356–363, Doi:10.1016/J.Culher.2011.02.006.
109. Kim, E.K.; Won, J.; Do, J. Young; Kim, S.D.; Kang, Y.S. Effects Of Silica Nanoparticle And GPTMS Addition On TEOS-Based Stone Consolidants. *Journal Of Cultural Heritage* **2009**, *10*, 214–221, Doi:10.1016/J.Culher.2008.07.008.
110. Iucolano, F.; Colella, A.; Liguori, B.; Calcaterra, D. Suitability Of Silica Nanoparticles For Tuff Consolidation. *Construction And Building*

- Materials* **2019**, *202*, 73–81, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2019.01.002.
111. Capasso, I.; Colella, A.; Iucolano, F. Silica-Based Consolidants: Enhancement Of Chemical-Physical Properties Of Vicenza Stone In Heritage Buildings. *Journal Of Building Engineering* **2023**, *68*, 106124, Doi:10.1016/J.Job.2023.106124.
 112. Colella, A.; Capasso, I.; Iucolano, F. Comparison Of Latest And Innovative Silica-Based Consolidants For Volcanic Stones. *Materials* **2021**, *14*, 2513, Doi:10.3390/Ma14102513.
 113. Stucchi, N.M.E.; Tesser, E. *Experimental Silica Nanoparticles Products For The Consolidation Of Silicate Stones.*; 2020;
 114. Stucchi, N.M.E.; Tesser, E.; Antonelli, F.; Benedetti, A. *Synthesis And Characterization Of Nanosilica Products For The Consolidation Of Stones*; 2020;
 115. Stucchi, N.M.E.; Tesser, E.; Zaccariello, G.; Antonelli, F.; Benedetti, A. Evaluating Two Nanosilica Dimensional Range For The Consolidation Of Degraded Silicate Stones. *Construction And Building Materials* **2022**, *329*, 127191.
 116. Han, Y.; Lu, Z.; Teng, Z.; Liang, J.; Guo, Z.; Wang, D.; Han, M.-Y.; Yang, W. Unraveling The Growth Mechanism Of Silica Particles In The Stöber Method: In Situ Seeded Growth Model. *Langmuir* **2017**, *33*, 5879–5890, Doi:10.1021/Acs.Langmuir.7b01140.
 117. Green, D.L.; Lin, J.S.; Lam, Y.-F.; Hu, M.Z.-C.; Schaefer, D.W.; Harris, M.T. Size, Volume Fraction, And Nucleation Of Stober Silica Nanoparticles. *J Colloid Interface Sci* **2003**, *266*, 346–358, Doi:10.1016/S0021-9797(03)00610-6.
 118. Mecca, I. In Situ Experimentations For The Compatibility And Durability Of The Restorations: The Case Study Of The Sassi Of Matera. *VITRUVIO - International Journal Of Architectural Technology And Sustainability* **2016**, *1*, 35, Doi:10.4995/Vitruvio-Ijats.2016.5686.
 119. Ridola, D. *Le Grandi Trincee Preistoriche Di Matera: La Ceramica E La Civiltà Di Quel Tempo*; S.L., 1926;
 120. Fonseca, C.D. *La Civiltà Rupestre Medioevale Nel Mezzogiorno d'Italia. Ricerche E Problemi*; Genova, 1975;
 121. LE CHIESE RUPESTRI DI MATERA(1966) Available Online: <https://Invitoallalettura.Com/Libri/555-Le-Chiese-Rupestri-Di-Matera1966.Html> (Accessed On 10 September 2024).
 122. Fonseca, C.D.; Demetrio, R.; Guadagno, G. *Matera*; Laterza.; 2003;
 123. Levi, C. *Cristo Si È Fermato A Eboli*; Einaudi Editore, 1945;

124. Rota, L.; Conese, F.; Tommaseli, M. *Matera. Storia Di Una Città*; Editrice BMG, 1990;
125. Colonna, A. Cattedra UNESCO, Piano Di Gestione E Osservatorio Sassi. In; ITA, 2019 ISBN 978-88-943694-1-0.
126. Margottini, C.; Gigli, G.; Ruther, H.; Spizzichino, D. Advances In Sustainable Conservation Practices In Rupestrian Settlements Inscribed In The UNESCO's World Heritage List. *Procedia Earth And Planetary Science* **2016**, 16, 52–60, Doi:10.1016/J.Proeps.2016.10.006.
127. Pomar, L.; Tropeano, M. The Calcarenite Di Gravina Formation In Matera (Southern Italy): New Insights For Coarse-Grained, Large-Scale, Cross-Bedded Bodies Encased In Offshore Deposits. *AAPG Bulletin* **2001**, 85, 661–689, Doi:10.1306/8626C979-173B-11D7-8645000102C1865D.
128. BACCELLE SCUDELER, L.; Lazzarini, L.; Antonelli, F.; Cancelliere, S.; Dessandier, D. La Pietra Del Tempio: Caratterizzazione Mineropetrografica E Geochimica E Determinazione Delle Cave Di Origine. In *Il Tempio Di Hera (Tavole Palatine) Di Metaponto. Archeologia, Archeometria, Conservazione. AGNANO PISANO (PI)*; FABRIZIO SERRA, 2010; Pp. 37–78 ISBN 88-6227-176-X.
129. Iannone, A.; Pieri, P. Considerazioni Critiche Sui “Tufi Calcarei” Delle Murge. Nuovi Dati Litostratigrafici E Paleoambientali: Critical Considerations And New Lithostratigraphical-Paleoecological Data On The “Tufi Calcarei” Of The Murge, Apulia, Italy. *Geografia Fisica E Dinamica Quaternaria* **1979**, 2, 173–186.
130. Bonomo, A.E. COMPOSITIONAL, TEXTURAL, PETROPHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF THE CALCARENITE DI GRAVINA FROM THE MATERA AREA: CONNECTION WITH GEOLOGICAL FEATURES AND DEGRADATION PROCESSES. **2020**, Doi:10.19276/Plinius.2020.01002.
131. Bonomo, A.E.; Lezzerini, M.; Prosser, G.; Munnecke, A.; Koch, R.; Rizzo, G. Matera Building Stones: Comparison Between Bioclastic And Lithoclastic Calcarenites. *Materials Science Forum* **2019**, 972, 40–49, Doi:10.4028/Www.Scientific.Net/MSF.972.40.
132. Andriani, G.F.; Walsh, N. Petrophysical And Mechanical Properties Of Soft And Porous Building Rocks Used In Apulian Monuments (South Italy). *Geological Society Special Publication* **2010**, 333, 129–141, Doi:10.1144/SP333.13.
133. Bonomo, A.; Lezzerini, M.; Prosser, G.; Munnecke, A.; Koch, R.; Rizzo, G. MATERA BUILDING STONES: CHEMICAL, MINERALOGICAL AND

PETROPHYSICAL CHARACTERIZATION OF THE CALCARENITE DI GRAVINA FORMATION. **2021**.

134. Andriani, G.F.; Walsh, N. Physical Properties And Textural Parameters Of Calcarenitic Rocks: Qualitative And Quantitative Evaluations. *Engineering Geology* **2002**, *67*, 5–15, Doi:10.1016/S0013-7952(02)00106-0.
135. Andriani, G.; Walsh, N. Fabric, Porosity And Water Permeability Of Calcarenites From Apulia (SE Italy) Used As Building And Ornamental Stone. *Bull Eng Geol Environ* **2003**, *62*, 77–84, Doi:10.1007/S10064-002-0174-1.
136. Andriani, G.F.; Tropeano, M. Geological Model And Exploitation Of Natural Materials Used As Building Stones: Tha Case Study Of Plio-Pleistocene Calcarenites At Matera. *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana* **2009**, *6*, 15–16.
137. UNI 11182:2006 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://store.uni.com/uni-11182-2006> (Accessed On 9 April 2024).
138. Danese, M.; DEMŠAR, U.; Masini, N.; Charlton, M. Investigating Material Decay Of Historic Buildings Using Visual Analytics With Multi-Temporal Infrared Thermographic Data. *Archaeometry* **2009**, *52*, 482–501, Doi:10.1111/J.1475-4754.2009.00485.X.
139. Sileo, M.; Gizzi, F.T.; Donvito, A.; Lasaponara, R.; Fiore, F.; Masini, N. Multi-Scale Monitoring Of Rupestrian Heritage: Methodological Approach And Application To A Case Study. *International Journal Of Architectural Heritage* **2022**, *16*, 469–484, Doi:10.1080/15583058.2020.1799261.
140. Gizzi, F.T.; Sileo, M.; Biscione, M.; Danese, M.; Alvarez De Buergo, M. 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* **2016**, *17*, 61–74, Doi:10.1016/J.Culher.2015.05.002.
141. Fioretti, G.; Andriani, G.F. Ultrasonic Wave Velocity Measurements For Detecting Decay In Carbonate Rocks. *Quarterly Journal Of Engineering Geology And Hydrogeology* **2018**, *51*, 179–186, Doi:10.1144/Qjagh2016-110.
142. Amoroso, G.G.; Fasina, V. Stone Decay And Conservation; Atmospheric Pollution, Cleaning; And Consolidation. **1983**.
143. Calia, A.; Sileo, M.; Matera, L. Provenance, Characterization And Decay Of A Porous Calcarenite Of The Puglia Region ('Pietra Gentile'). In *Stone In Historic Buildings: Characterization And Performance*; Cassar, J., Winter, M.G., Marker, B.R., Walton, N.R.G., Entwisle, D.C.,

- Bromhead, E.N., Smith, J.W.N., Eds.; Geological Society Of London, 2014; Vol. 391, P. 0 ISBN 978-1-86239-376-9.
144. Fitzner, B.; Heinrichs, K. Damage Diagnosis At Stone Monuments - Weathering Forms, Damage Categories And Damage Indices. *Understanding And Managing Stone Decay* **2001**, 45.
 145. Germinario, L.; Andriani, G.F.; Laviano, R. Decay Of Calcareous Building Stone Under The Combined Action Of Thermoclastism And Cryoclastism: A Laboratory Simulation. *Construction And Building Materials* **2015**, 75, 385–394, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2014.11.035.
 146. Quarta, G.; Calia, A.; D., M.; Sileo, M. *Soft Calcarenes As Materials In The Baroque Architectural Heritage Of Southern Italy: Factors Influencing Decay Response*; 2008;
 147. Sitzia, F.; Lisci, C.; Mirão, J. Building Pathology And Environment: Weathering And Decay Of Stone Construction Materials Subjected To A Csa Mediterranean Climate Laboratory Simulation. *Construction And Building Materials* **2021**, 300, 124311, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2021.124311.
 148. Bonomo, A.E.; Minervino Amodio, A.; Prosser, G.; Sileo, M.; Rizzo, G. Evaluation Of Soft Limestone Degradation In The Sassi UNESCO Site (Matera, Southern Italy): Loss Of Material Measurement And Classification. *Journal Of Cultural Heritage* **2020**, 42, 191–201, Doi:10.1016/J.Culher.2019.07.017.
 149. Bonomo, A.E.; Prosser, G.; Rizzo, G.; Maria, S. Degradation Diagnosis On Gravina Calcarene: Classification And Damage Indexes On The Sassi Di Matera Site (Southern Italy).; 2017.
 150. Cartwright, T.A.; Bourguignon, E.; Bromblet, P.; Cassar, J.; Charola, A.E.; De Witte, E.; Delgado-Rodriguez, J.; Fassina, V.; Fitzner, B.; Fortier, L.; Et Al. *ICOMOS-ISCS: Illustrated Glossary On Stone Deterioration Patterns*; International Council Of Monuments And Sites, 2008;
 151. Strlič, M.; Thickett, D.; Taylor, J.; Cassar, M. Damage Functions In Heritage Science. *Studies In Conservation* **2013**, Doi:10.1179/2047058412Y.0000000073.
 152. Lipfert, F.W. Atmospheric Damage To Calcareous Stones: Comparison And Reconciliation Of Recent Experimental Findings. *Atmospheric Environment* **1989**, 23, 415–429.
 153. Grossi, C.M.; Bonazza, A.; Brimblecombe, P.; Harris, I.; Sabbioni, C. Predicting Twenty-First Century Recession Of Architectural

- Limestone In European Cities. *Environ Geol* **2008**, 56, 455–461, Doi:10.1007/S00254-008-1442-6.
154. Bonazza, A.; Messina, P.; Sabbioni, C.; Grossi, C.M.; Brimblecombe, P. Mapping The Impact Of Climate Change On Surface Recession Of Carbonate Buildings In Europe. *Science Of The Total Environment* **2009**, 407, 2039–2050, Doi:10.1016/J.Scitotenv.2008.10.067.
 155. Franzoni, E.; Sassoni, E. Correlation Between Microstructural Characteristics And Weight Loss Of Natural Stones Exposed To Simulated Acid Rain. *Science Of The Total Environment* **2011**, 412–413, 278–285, Doi:10.1016/J.Scitotenv.2011.09.080.
 156. Baedeker, P.A.; Reddy, M.M. The Erosion Of Carbonate Stone By Acid Rain: Laboratory And Field Investigations. *Journal Of Chemical Education* **1993**, 70, 104–108, Doi:10.1021/Ed070p104.
 157. Baedeker, P.A.; Reddy, M.M.; Reimann, K.J.; Sciammarella, C.A. Effects Of Acidic Deposition On The Erosion Of Carbonate Stone — Experimental Results From The U.S. National Acid Precipitation Assessment Program (NAPAP). *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere* **1992**, 26, 147–158, Doi:10.1016/0957-1272(92)90018-N.
 158. Gauri, K.L.; Holdren, G.C. Pollutant Effects On Stone Monuments. *Environ Sci Technol* **1981**, 15, 386–390, Doi:10.1021/Es00086a001.
 159. Searle, D.E.; Mitchell, D.J. The Effect Of Coal And Diesel Particulates On The Weathering Loss Of Portland Limestone In An Urban Environment. *Sci Total Environ* **2006**, 370, 207–223, Doi:10.1016/J.Scitotenv.2006.07.005.
 160. Brimblecombe, P.; Grossi, C.M. Millennium-Long Damage To Building Materials In London. *Sci Total Environ* **2009**, 407, 1354–1361, Doi:10.1016/J.Scitotenv.2008.09.037.
 161. Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F. World Map Of The Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift* **2006**, 259–263, Doi:10.1127/0941-2948/2006/0130.
 162. Brimblecombe, P. Heritage Climatology. In *Climate Change And Cultural Heritage*; Lefevre, R.-A., Sabbioni, C., Eds.; Edipuglia: Bari, 2010; Pp. 57–64.
 163. Amani, M.; Ghorbanian, A.; Ahmadi, S.A.; Kakooei, M.; Moghimi, A.; Mirmazloumi, S.M.; Moghaddam, S.H.A.; Mahdavi, S.; Ghahremanloo, M.; Parsian, S.; Et Al. Google Earth Engine Cloud Computing Platform For Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal Of Selected Topics In Applied*

- Earth Observations And Remote Sensing* **2020**, *13*, 5326–5350, Doi:10.1109/JSTARS.2020.3021052.
164. Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis For Everyone. *Remote Sensing Of Environment* **2017**, *202*, 18–27, Doi:10.1016/J.Rse.2017.06.031.
 165. Gorelick, N. Google Earth Engine.; American Geophysical Union: Vienna, Austria, 2013; P. 11997.
 166. Mutanga, O.; Kumar, L. Google Earth Engine Applications. *Remote Sensing* **2019**, *11*, 591, Doi:10.3390/Rs11050591.
 167. Kumar, L.; Mutanga, O. Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, And Potential. *Remote Sensing* **2018**, *10*, 1509, Doi:10.3390/Rs10101509.
 168. Cleveland, R.B.; Cleveland, W.S.; Terpenning, I. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based On Loess. **1990**.
 169. Ashkenazy, Y.; Smith, N.R. Data-Driven Analysis Of Annual Rain Distributions. *Phys. Rev. Res.* **2024**, *6*, 023187, Doi:10.1103/Physrevresearch.6.023187.
 170. Gowri, L.; Manjula, K.R.; Sasireka, K.; Deepa, D. Assessment Of Statistical Models For Rainfall Forecasting Using Machine Learning Technique. *J. Soft Comput. Civ. Eng.* **2022**, *6*, Doi:10.22115/Scce.2022.304260.1363.
 171. Modeling And Predicting Rainfall Time Series Using Seasonal-Trend Decomposition And Machine Learning. *Knowledge-Based Systems* **2022**, *251*, 109125, Doi:10.1016/J.Knosys.2022.109125.
 172. Schär, C.; Ban, N.; Fischer, E.M.; Rajczak, J.; Schmidli, J.; Frei, C.; Giorgi, F.; Karl, T.R.; Kendon, E.J.; Tank, A.M.G.K.; Et Al. Percentile Indices For Assessing Changes In Heavy Precipitation Events. *Climatic Change* **2016**, *137*, 201–216, Doi:10.1007/S10584-016-1669-2.
 173. Fuente, D.; Vega, J.; Viejo, F.; Díaz, I.; Morcillo, M. City Scale Assessment Model For Air Pollution Effects On The Cultural Heritage. *Atmospheric Environment* **2011**, *45*, 1242–1250, Doi:10.1016/J.Atmosenv.2010.12.011.
 174. Spilotro, G.; Fidelibus, M.; Pellicani, R.; Qeraxhiu, L.; Argentiero, I.; Pergola, G. *La Salvaguardia Del Patrimonio Architettonico Di Matera: I Materiali Naturali Da Costruzione, Nel Tufo E Col Tufo. Caratterizzazione Tecnica Delle Calcareniti E Variazioni Per Condizioni Ambientali*; 2016;

175. Bonomo, A.E.; Acito, A.; Prosser, G.; Rizzo, G.; Munnecke, A.; Koch, R.; Bentivenga, M. Matera's Old Quarries: Geological And Historical Archives That Need Protection And Valorization. *Geoheritage* **2019**, *11*, Doi:10.1007/S12371-019-00413-X.
176. Calamita, G.; Gallipoli, M.R.; Gueguen, E.; Sinisi, R.; Summa, V.; Vignola, L.; Stabile, T.A.; Bellanova, J.; Piscitelli, S.; Perrone, A. Integrated Geophysical And Geological Surveys Reveal New Details Of The Large Montescaglioso (Southern Italy) Landslide Of December 2013. *Engineering Geology* **2023**, *313*, 106984, Doi:10.1016/J.Enggeo.2023.106984.
177. Mosquera, M.J.; Zarzuela, R.; Luna, M. Advanced Smart Materials For Preserving Concrete Heritage Buildings. *Nat Rev Mater* **2023**, *8*, 74–76, Doi:10.1038/S41578-022-00531-Z.
178. Otero, J.; Charola, A.E.; Grissom, C.A.; Starinieri, V. An Overview Of Nanolime As A Consolidation Method For Calcareous Substrates. *Ge-Conservación* **2017**, *1*, 71–78.
179. Sena Da Fonseca, B. Current Trends In Stone Consolidation Research: An Overview And Discussion. *Buildings* **2023**, *13*, 403, Doi:10.3390/Buildings13020403.
180. Zhu, J.; Zhang, P.; Ding, J.; Dong, Y.; Cao, Y.; Dong, W.; Zhao, X.; Li, X.; Camaiti, M. Nano Ca(OH)₂: A Review On Synthesis, Properties And Applications. *Journal Of Cultural Heritage* **2021**, *50*, 25–42, Doi:10.1016/J.Culher.2021.06.002.
181. Berto, T.; Godts, S.; De Clercq, H. The Effects Of Commercial Ethyl Silicate Based Consolidation Products On Limestone. In Proceedings Of The Science And Art: A Future For Stone : Proceedings Of The 13th International Congress On The Deterioration And Conservation Of Stone; 2016; Vol. 1, Pp. 271–279.
182. Vitry, V.; Dagrain, F.; Delaunois, F.; Van Parys, L. *Characterization Of The Consolidation Effect Of Ethyl Silicate On Maastricht Limestone*; 2011;
183. Cao, Y.; Camaiti, M.; Endrizzi, M.; Forti, G.; Vergani, E.; Forti, I. Enhanced Consolidation Efficacy And Durability Of Highly Porous Calcareous Building Stones Enabled By Nanosilica-Based Treatments. *Sci. China Technol. Sci.* **2023**, *66*, 2197–2212, Doi:10.1007/S11431-022-2343-Y.
184. Delgado Rodrigues, J.; Ferreira Pinto, A.P.; Nogueira, R.; Gomes, A. Consolidation Of Lime Mortars With Ethyl Silicate, Nanolime And Barium Hydroxide. Effectiveness Assessment With Microdrilling Data.

- Journal Of Cultural Heritage* **2018**, 29, 43–53, Doi:10.1016/J.Culher.2017.07.006.
185. Grissom, C.A.; Charola, A.E.; Boulton, A.; Mecklenburg, M.F. Evaluation Over Time Of An Ethyl Silicate Consolidant Applied To Ancient Lime Plaster. **1999**, Doi:10.1179/Sic.1999.44.2.113.
 186. Randazzo, L.; Venuti, V.; Paladini, G.; Crupi, V.; Majolino, D.; Ott, F.; Ricca, M.; Rovella, N.; La Russa, M.F. Evaluating The Protecting Effects Of Two Consolidants Applied On Pietra Di Lecce Limestone: A Neutronographic Study. *Journal Of Cultural Heritage* **2020**, 46, 31–41, Doi:10.1016/J.Culher.2020.06.013.
 187. Dunham, R.J. Classification Of Carbonate Rocks According To Depositional Textures. **1962**, 38, 108–121.
 188. Embry, A.F.; Klovan, J.E. A LATE DEVONIAN REEF TRACT ON NORTHEASTERN BANKS ISLAND, N.W.T.1. *Bulletin Of Canadian Petroleum Geology* **1971**, 19, 730–781, Doi:10.35767/Gscpgbull.19.4.730.
 189. Flügel, E. (1982) Microfacies Analysis Of Limestone. Springer-Verlag, New York, 633. - References - Scientific Research Publishing Available Online: <https://www.scirp.org/Reference/Referencespapers?Referenceid=1849763> (Accessed On 28 May 2024).
 190. Chipera, S.J.; Bish, D.L. Multireflection RIR And Intensity Normalizations For Quantitative Analyses: Applications To Feldspars And Zeolites. *Powder Diffraction* **1995**, 10, 47–55, Doi:10.1017/S0885715600014305.
 191. Anovitz, L.M.; Cole, D.R. Characterization And Analysis Of Porosity And Pore Structures. *Reviews In Mineralogy And Geochemistry* **2015**, 80, 61–164, Doi:10.2138/Rmg.2015.80.04.
 192. Salvini, S.; Coletti, C.; Maritan, L.; Massironi, M.; Balsamo, F.; Mazzoli, C. Exploring The Pore System Of Carbonate Rocks Through A Multi-Analytical Approach. *Environ Earth Sci* **2023**, 82, 564, Doi:10.1007/S12665-023-11234-1.
 193. UNI EN 14579:2005 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://store.uni.com/uni-en-14579-2005> (Accessed On 15 January 2024).
 194. Vasanelli, E.; Colangiuli, D.; Calia, A.; Sileo, M.; Aiello, M.A. Ultrasonic Pulse Velocity For The Evaluation Of Physical And Mechanical Properties Of A Highly Porous Building Limestone. *Ultrasonics* **2015**, 60, 33–40, Doi:10.1016/J.Ultras.2015.02.010.

195. Vasanelli, E.; Sileo, M.; Calia, A.; Aiello, M.A. Non-Destructive Techniques To Assess Mechanical And Physical Properties Of Soft Calcarene Stones. *Procedia Chemistry* **2013**, *8*, 35–44, Doi:10.1016/J.Proche.2013.03.006.
196. Ruedrich, J.; Seidel, M.; Rothert, E.; Siegesmund, S. Length Changes Of Sandstones Caused By Salt Crystallization. *Geological Society, London, Special Publications* **2007**, *271*, 199–209, Doi:10.1144/GSL.SP.2007.271.01.20.
197. UNI 11432:2011 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://Store.Uni.Com/Uni-11432-2011> (Accessed On 15 January 2024).
198. Durán-Suárez, J.; García-Beltrán, A.; Rodríguez-Gordillo, J. Colorimetric Cataloguing Of Stone Materials (Biocalcarene) And Evaluation Of The Chromatic Effects Of Different Restoring Agents. *Science Of The Total Environment* **1995**, *167*, 171–180, Doi:10.1016/0048-9697(95)04578-O.
199. Otero, J.; Starinieri, V.; Charola, A.E. Influence Of Substrate Pore Structure And Nanolime Particle Size On The Effectiveness Of Nanolime Treatments. *Construction And Building Materials* **2019**, *209*, 701–708, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2019.03.130.
200. Otero, J.; Starinieri, V.; Charola, A.E. Nanolime For The Consolidation Of Lime Mortars: A Comparison Of Three Available Products. *Construction And Building Materials* **2018**, *181*, 394–407, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2018.06.055.
201. Fernandez, F.; Germinario, S. ALTERATION AND DETERIORATION OF NATURAL STONE MATERIALS: ARTIFICIAL AGING AS A TOOL OF KNOWLEDGE.; January 29 2019.
202. UNI EN 14066:2013 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://Store.Uni.Com/Uni-En-14066-2013> (Accessed On 20 June 2024).
203. UNI EN 14147:2005 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://Store.Uni.Com/Uni-En-14147-2005> (Accessed On 20 June 2024).
204. UNI EN 12371:2010 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://Store.Uni.Com/Uni-En-12371-2010> (Accessed On 20 June 2024).
205. Experimental Testing Of The Durability Of Lime-Based Mortars Used For Rendering Historic Buildings. *Construction And Building Materials* **2012**, *28*, 807–818, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2011.10.059.

206. Sitzia, F.; Lisci, C.; Mirão, J. Accelerate Ageing On Building Stone Materials By Simulating Daily, Seasonal Thermo-Hygrometric Conditions And Solar Radiation Of Csa Mediterranean Climate. *Construction And Building Materials* **2021**, 266, 121009, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2020.121009.
207. UNI EN ISO 4892-2:2013 - UNI Ente Italiano Di Normazione Available Online: <https://Store.Uni.Com/Uni-En-Iso-4892-2-2013> (Accessed On 23 April 2024).
208. Warr, L. IMA-CNMNC Approved Mineral Symbols. *Mineralogical Magazine* **2021**, 1–35, Doi:10.1180/Mgm.2021.43.
209. Chaki, S.; Takarli, M.; Agbodjan, W.P. Influence Of Thermal Damage On Physical Properties Of A Granite Rock: Porosity, Permeability And Ultrasonic Wave Evolutions. *Construction And Building Materials* **2008**, 22, 1456–1461.
210. Cantisani, E.; Pecchioni, E.; Fratini, F.; Garzonio, C.; Malesani, P.; Molli, G. Thermal Stress In The Apuan Marbles: Relationship Between Microstructure And Petrophysical Characteristics. *International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences* **2009**, 46, 128–137, Doi:10.1016/J.ljrmms.2008.06.005.
211. Cantisani, E.; Garzonio, C.; Ricci, M.; Vettori, S. Relationships Between The Petrographical, Physical And Mechanical Properties Of Some Italian Sandstones. *International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences* **2013**, 60, 321–332, Doi:10.1016/J.ljrmms.2012.12.042.
212. Freire-Lista, D.M.; Fort, R.; Varas-Muriel, M.J. Freeze–Thaw Fracturing In Building Granites. *Cold Regions Science And Technology* **2015**, 113, 40–51, Doi:10.1016/J.Coldregions.2015.01.008.
213. Crystallization In Pores. *Cement And Concrete Research* **1999**, 29, 1347–1358, Doi:10.1016/S0008-8846(99)00002-2.
214. Salvador, O.; Fort, R.; Del-Cura, M.Á. Pore Size Distribution And The Durability Of A Porous Limestone. *Quarterly Journal Of Engineering Geology And Hydrogeology - Q J ENG GEOL HYDROGEOL* **1997**, 30, 221–230, Doi:10.1144/GSL.QJEG.1997.030.P3.04.
215. Pore Structure And The Disruptive Or Cementing Effect Of Salt Crystallization In Various Types Of Stone On JSTOR Available Online: <https://www.jstor.org/stable/1506452> (Accessed On 30 July 2024).
216. Molina, E.; Cultrone, G.; Sebastián, E.; Alonso, F.J.; Carrizo, L.; Gisbert, J.; Buj, O. The Pore System Of Sedimentary Rocks As A Key Factor In The Durability Of Building Materials. *Engineering Geology* **2011**, 118, 110–121, Doi:10.1016/J.Enggeo.2011.01.008.

217. Molina, E.; Cultrone, G.; Sebastián, E.; Alonso, F.J. Evaluation Of Stone Durability Using A Combination Of Ultrasound, Mechanical And Accelerated Aging Tests. *Journal Of Geophysics And Engineering* **2013**, *10*, 035003, Doi:10.1088/1742-2132/10/3/035003.
218. Classification Of Rocks And Soils For Engineering Geological Mapping Part I: Rock And Soil Materials. *Bulletin Of The International Association Of Engineering Geology* **1979**, *19*, 364–371, Doi:10.1007/BF02600503.
219. Dessandier, D.; Antonelli, F.; Rasplus, L. Relationships Between Mineralogy And Porous Medium Of The Craie Tuffeau (Paris Basin, France). *Bulletin De La Societe Geologique De France* **1997**, *168*, 741–749.
220. Vasanelli, E.; Calia, A.; Luprano, V.A.M.; Micelli, F. Ultrasonic Pulse Velocity Test For Non-Destructive Investigations Of Historical Masonries: An Experimental Study Of The Effect Of Frequency And Applied Load On The Response Of A Limestone. *Materials And Structures* **2016**, Accepted For Publication IN PRESS, Doi:10.1617/S11527-016-0892-7.
221. Pinto, A.P.F.; Rodrigues, J.D. Stone Consolidation: The Role Of Treatment Procedures. *Journal Of Cultural Heritage* **2008**, *9*, 38–53, Doi:10.1016/J.Culher.2007.06.004.
222. An Innovative Phosphate-Based Consolidant For Limestone. Part 1: Effectiveness And Compatibility In Comparison With Ethyl Silicate. *Construction And Building Materials* **2016**, *102*, 918–930, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2015.04.026.
223. López-Arce, P.; Zornoza-Indart, A.; Gomez-Villalba, L.S.; Fort, R. Short- And Longer-Term Consolidation Effects Of Portlandite (CaOH)₂ Nanoparticles In Carbonate Stones. *Journal Of Materials In Civil Engineering* **2013**, *25*, 1655–1665, Doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000740.
224. Rodriguez-Navarro, C.; Ruiz-Agudo, E. Nanolimes: From Synthesis To Application. *Pure And Applied Chemistry* **2018**, *90*, 523–550, Doi:10.1515/Pac-2017-0506.
225. Navarro-Moreno, D.; Martínez-Arredondo, A.; García-Vera, V.E.; Lourdes Gutiérrez-Carrillo, M.; Antonio Madrid, J.; Lanzón, M. Nanolime, Ethyl Silicate And Sodium Silicate: Advantages And Inconveniences In Consolidating Ancient Bricks (XII-XIII Century). *Construction And Building Materials* **2021**, *277*, 122240, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2020.122240.

226. He, J.; Otero, J.; Crespo-López, L.; Monasterio-Guillot, L.; Benavides-Reyes, C.; Elert, K.; Rodriguez-Navarro, C. Ethyl Silicate–Nanolime Treatment For The Consolidation Of Calcareous Building Materials. *Construction And Building Materials* **2024**, *418*, 135437, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2024.135437.
227. Massa, S. Il Deperimento Delle Opere D'arte : Cause, Evoluzione, Possibilità Di Valutazioni Quantitative. **1982**, 16.
228. Pocobelli, D.P.; Boehm, J.; Bryan, P.; Still, J.; Grau-Bové, J. BIM For Heritage Science: A Review. *Herit Sci* **2018**, *6*, 1–15, Doi:10.1186/S40494-018-0191-4.
229. Yang, X.; Grussenmeyer, P.; Koehl, M.; Macher, H.; Murtiyoso, A.; Landes, T. Review Of Built Heritage Modelling: Integration Of HBIM And Other Information Techniques. *Journal Of Cultural Heritage* **2020**, *46*, 350–360, Doi:10.1016/J.Culher.2020.05.008.
230. Morero, L.; Visone, F.; Abate, N.; Minervino Amodio, A.; Prodomo, M.; Sileo, M.; Masini, N. The Use Of A Heritage Building Information Model As An Effective Tool For Planning Restoration And Diagnostic Activities: The Example Of The Troia Cathedral Rose Window. *Acta IMEKO* **2023**, *12*, 1–8, Doi:10.21014/Actaimeko.V12i4.1511.
231. Antonelli, F.; Piovesan, R.; Tesser, E.; Tosato, M.; Sorbo, E. Original Or Post-War Paintings? The Fixed Wooden Scenery Of The Teatro Olimpico In Vicenza: A Guided Multidisciplinary Approach Based On Scientific Analyses And HBIM. *Heritage Science* **2024**, *12*, Doi:10.1186/S40494-024-01307-0.

Appendice A

ID	Massa (g)	Dimensioni x,y,z (cm)	Trattamento applicato	Osservazione macroscopica	Massa	MOP	XRPD	MIP	SEM- EDS	UCS	WAC	UPV	Colorimetria
FBC_2	209,933	4,6x5,0x5,0	NT	t ₀	t ₀	t ₀	t ₀	t ₀		t ₀	t ₀	t ₀	t ₀
FBC_3	211,859	5,0x5,0x5,0	NT	t ₀	t ₀	t ₀	t ₀	t ₀		t ₀	t ₀	t ₀	t ₀
FBC_4	203,909	5,0x5,0x4,8	NT	t ₀	t ₀						t ₀	t ₀	t ₀
				t ₂	t ₂						t ₂	t ₂	t ₂
FBC_5	199,398	5,0x5,0x5,0	NANORESTORE	t ₀ t ₁	t ₀ t ₁			t ₀ t ₁	t ₀ t ₁		t ₀ t ₁	t ₀ t ₁	t ₀ t ₁
FBC_6	196,418	4,4x5,0x5,0	NANO ESTEL	t ₀ t ₁	t ₀ t ₁			t ₀ t ₁	t ₀ t ₁		t ₀ t ₁	t ₀ t ₁	t ₀ t ₁
FBC_7	177,28	4,5x5,0x4,4	CALOSIL	t ₀ t ₁	t ₀ t ₁			t ₀ t ₁	t ₀ t ₁		t ₀ t ₁	t ₀ t ₁	t ₀ t ₁
FBC_8	166,083	4,9x5,0x4,5	KSE 100	t ₀ t ₁	t ₀ t ₁			t ₀ t ₁	t ₀ t ₁		t ₀ t ₁	t ₀ t ₁	t ₀ t ₁
FBC_11	188,161	4,6x4,6x5,0	NT	t ₀	t ₀						t ₀	t ₀	t ₀
				t ₂	t ₂						t ₂	t ₂	t ₂
FBC_13	194,604	4,9x5,1x4,9	NT	t ₀	t ₀						t ₀	t ₀	t ₀
				t ₂	t ₂						t ₂	t ₂	t ₂
FBC_14	183,591	5,1x5,2x4,7	NANORESTORE	t ₀ t ₁ t ₂	t ₀ t ₁ t ₂						t ₀ t ₁ t ₂	t ₀ t ₁ t ₂	t ₀ t ₁ t ₂
FBC_15	193,995	4,9x5,1x5,1	NANORESTORE	t ₀ t ₁ t ₂	t ₀ t ₁ t ₂						t ₀ t ₁ t ₂	t ₀ t ₁ t ₂	t ₀ t ₁ t ₂
FBC_16	205,624	4,9x5,2x5,1	NANORESTORE	t ₀ t ₁	t ₀ t ₁						t ₀ t ₁	t ₀ t ₁	t ₀ t ₁

SC_1	158,35	4,8x4,8x4,9	t_0	t_0	t_0	t_0	t_0	t_0	t_0	t_0	t_0
SC_2	151,247	4,7x4,7x4,7	t_0	t_0					t_0	t_0	t_0
FM_1	179,426	5,0x5,0x5,0	t_0	t_0					t_0	t_0	t_0
FM_2	181,869	5,0x5,0x4,8	t_0	t_0					t_0	t_0	t_0
FM_3	172,499	5,0x5,0x5,0	t_0	t_0					t_0	t_0	t_0
FM_4	169,269	5,0x5,1x5,0	t_0	t_0	t_0	t_0	t_0	t_0	t_0	t_0	t_0

NT= provino non trattato

t_0 = analisi condotta a *tempo zero*, caratterizzazione iniziale

t_1 = analisi condotta post applicazione dei trattamenti

t_2 = analisi condotta post invecchiamento artificiale, sia per provini trattati che non trattati

Appendice B



C.T.S. S.R.L.
vIA PIAVE, 20/22 - 31077 ALTAVILLA VICENTINA (VICENZA)
TEL. +39 0444 340088 (4 linee r.a.) - FAX +39 0444 340039
www.ctsconsorzi.com - E-mail: cts@ctsconsorzi.com - I. 04112247461000
- FILIALI -
vIA G. BANCOLI, 55 - 00143 ROMA - TEL. 06 86381770 (5 linee r.a.) - FAX 06 86382801
vIA L. GIORGIANI, 54 RI. AI. A2 - 50127 FIRENZE - TEL. 055 2643094 (2 linee r.a.) - FAX 055 2643078
vIA B. CROCE, 129 - 80126 CASORIA (NA) - TEL. 081 5846634 (2 linee r.a.) - FAX 081 5844865
vIA POPOLI, 15 - 00095 S. MARIA IN VALLE - TREVISI (TV) - TEL. 0423 391007 - FAX 0423 391413
vIA A. P. STELLA, 5 - 20125 MILANO - TEL. 02 57493255 (2 linee r.a.) - FAX 02 57493253
vIA A. GRAMSCI, 5/A - 95030 GRAVINA DI CATANIA (CT) - TEL. 095 7441585 - FAX 095 7442554



NANORESTORE®

Dispersioni di nanocalce in alcool isopropilico denaturato
Brevetto Italiano Consorzio CSGI-Università degli Studi di Firenze
n° FI/96/A/000255, 31/10/1996

CARATTERISTICHE

Data la natura assolutamente innovativa del prodotto, il Consorzio CSGI, inventore della formulazione, offre consulenza tecnica a scopo scientifico per l'individuazione delle migliori condizioni applicative (per informazioni contattare il personale CSGI al seguente indirizzo: direttore@csgi.unifi.it).

Nanorestore® si presenta come il consolidante compatibile per eccellenza per gli affreschi e i lapidei a matrice carbonatica, essendo costituito da particelle di calce spenta con dimensioni nel dominio dei materiali nanostrutturati disperse in alcool isopropilico.

L'alcool garantisce un'ottima penetrazione nei materiali porosi (grazie alla sua bassa tensione superficiale) per suzione capillare; e penetrando nella matrice porosa trasporta dietro di sé le particelle nano-strutturate che si insinuano negli interstizi e nelle porosità da consolidare immediatamente al di sotto della superficie.

Una volta trasformatesi in carbonato di calcio per azione dell'anidride carbonica atmosferica, originano un *network* di micro-cristalli di calcite che conferiscono al manufatto nuove ed elevate proprietà meccaniche senza introdurre materiali estranei alla natura chimica originale dell'opera. Gli spessori di consolidamento sono strettamente superficiali, dell'ordine di alcune centinaia di micron.

Il prodotto **Nanorestore®** si presta ottimamente all'applicazione come pre-consolidante di superfici prima di qualsiasi operazione preliminare di pulitura.

CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE

aspetto:	liquido bianco opalescente
viscosità a 25° C:	2,75 cP
residuo secco:	0,5 %
peso specifico:	ca. 0,8 g/cm ³

MODALITÀ DI APPLICAZIONE

Prima dell'uso agitare vigorosamente il recipiente per almeno 2 minuti. La dispersione, per impiego su affreschi, può essere diluita nel caso si evidenzino, dopo test applicativi, effetti di velatura bianca, che può comunque essere facilmente rimossa con semplici impacchi ad acqua.

Nel caso di lapidei a matrice carbonatica può anche non essere necessaria la diluizione. Il rapporto di diluizione va deciso in relazione alla capacità assorbente della superficie da trattare e dal livello di porosità del manufatto.

Si suggeriscono le seguenti diluizioni:

da 80 a 500 cc portati a 1 litro

Il rapporto di diluizione va deciso volta per volta in relazione alla capacità assorbente delle matrici porose. E' evidente che tanto più è diluita la dispersione tanto più numerose possono essere le applicazioni necessarie. Il solvente da aggiungere per diluire è l'alcool isopropilico denaturato CTS, tale quale o anche, per particolari applicazioni, in miscela con acqua demineralizzata fino ad un contenuto massimo di acqua pari al 50 % in volume. L'impiego di quantità più o meno rilevanti di acqua dipende dalle condizioni di umidità della muratura e dell'ambiente: più queste sono basse maggior quantità di acqua può essere aggiunta e viceversa. Una volta eseguita la diluizione agitare nuovamente il recipiente che contiene la dispersione diluita e procedere all'applicazione mediante pennello o per nebulizzazione, con protezione delle superfici con carta giapponese.

Applicare fino a saturazione della muratura ("a rifiuto") ed attendere la completa asciugatura prima di operare l'eventuale applicazione successiva. Effetti apprezzabili di consolidamento si acquisiscono normalmente dopo un numero di applicazioni che è ovviamente legato alla concentrazione selezionata: più la dispersione è diluita, maggiore è il numero di applicazioni richieste. Si va normalmente da 1-2 applicazioni per la più concentrata a 10-12 per la più diluita. Terminata l'ultima applicazione attendere 5-7 giorni prima delle prove di pulitura e verifica delle proprietà meccaniche della superficie.

Prima di ogni applicazione il recipiente contenente la dispersione deve essere agitato e altrettanto cura deve essere messa nel tenere in agitazione i recipienti d'utilizzo durante le applicazioni.

La superficie trattabile con 1 litro di prodotto non è a priori definibile poiché dipende sia dalla concentrazione d'uso che dalla capacità assorbente della matrice muraria. Premesso ciò si stima che il prodotto a concentrazione standard consenta di trattare circa 5-10 m² di superficie pittorica di media porosità a grado medio di decoesione superficiale.



C.T.S. S.r.l.

via PIAVE, 29/32 - 36077 **ALTAVILLA VICENTINA (VICENZA)**
TEL. +39 0444 340088 (4 linee r.a.) - FAX +39 0444 340039

www.cts-veco.com - E-mail: cts@cts-veco.com - I.V.A. 11224740409

-FILIALI:-

VIA G. BANTUCCI, 55 - 00143 **ROMA** - TEL. 06 85381770 (5 linee r.a.) - FAX 06 8502801

VIA L. GIORGIANNI, 54 RI. AI. 42 - 50127 **FIRENZE** - TEL. 055 2242094 (2 linee r.a.) - FAX 055 2242078

VIA B. CROCE, 129 - 80126 **CABORIA (NA)** - TEL. 081 5846634 (2 linee r.a.) - FAX 081 5844865

VIA POPOLI, 13 - 06095 S. MARIA IN VALLE - **TREVI (PG)** - TEL. 0742 391027 - FAX 0742 393413

VIA A. P. STELLA, 5 - 20125 **MILANO** - TEL. 02 67493255 (2 linee r.a.) - FAX 02 67493253

VIA A. GRAMSCI, 3/A - 95130 **GRAVINA DI CATANIA (CT)** - TEL. 095 7441585 - FAX 095 7442554



E' opportuno evitare l'uso di Nanorestore® in quelle situazioni in cui la porosità superficiale è del tutto annullata per la presenza di fissativi polimerici, depositi consistenti di sporco o tenaci scialbature.

L'impiego del prodotto non come semplice pre-consolidante, bensì come consolidante finale in presenza di solfatazione deve prevedere il preventivo impiego di un trattamento desolfatante con impacchi di soluzioni di carbonato di ammonio o resina a scambio ionico Amberlite 4400 OH. Il prodotto Nanorestore® può a questo punto essere impiegato secondo le modalità consuete anche in alternativa agli impacchi di soluzione di idrato di bario, sebbene in questo caso sia consigliabile contattare il Consorzio CSGL.

Si segnalano invece possibili problemi in caso di presenza di quantità molto elevata di sali di magnesio. Si raccomanda, in ogni caso, di eseguire una minima campagna di indagine diagnostica, prima dell'intervento, finalizzata alla determinazione della tecnica pittorica e alla valutazione del degrado.

Si sottolinea infine che il materiale è preferenzialmente adatto per le parti dipinte "a fresco".

PRECAUZIONI DI SICUREZZA

Nanorestore® non presenta particolari pericoli per gli utilizzatori.

Nelle applicazioni a nebulizzazione proteggersi con maschera dai vapori di alcool isopropilico e in ambienti molto chiusi agevolare la dispersione dei vapori con aspiratori.

Il prodotto Nanorestore® è infiammabile. Esso va pertanto manipolato e immagazzinato con le normali precauzioni relative a questo tipo di prodotti.

STABILITÀ E STOCCAGGIO

Può formarsi sedimento sul fondo, si raccomanda una vigorosa agitazione manuale prima dell'uso.

Le confezioni tenute ben sigillate ed esenti da aria ed umidità hanno una durata di 12 mesi.

CONFEZIONI

Nanorestore® è disponibile nelle confezioni da 1 lt.

Le indicazioni ed i dati riportati nel presente opuscolo sono basati sulle nostre attuali esperienze, su prove di laboratorio e su corretta applicazione.

Queste informazioni non devono in alcun caso sostituirsi alle prove preliminari che è indispensabile effettuare per accertarsi dell'idoneità del prodotto ad ogni caso determinato.

La C.T.S. S.r.l. garantisce la qualità costante del prodotto ma non risponde di eventuali danni causati da un uso non corretto del materiale. Inoltre, può variare in qualsiasi momento i componenti e le confezioni senza obbligo di comunicazione alcuna.



C.T.S. S.R.L.
vIA PIAC. 29/22 - 36077 ALTAVILLA VICENTINA (VICENZA)
TEL. +39 0444 343088 (4 linee r.a.) - FAX +39 0444 343039
www.cts-veneto.com - E-mail: info@cts-veneto.com - I. IVA 11224740409
- FILIALI:
vIA G. BANCOLI, 55 - 00143 ROMA - TEL. 06 85381770 (5 linee r.a.) - FAX 06 8502801
vIA L. GIORGIANI, 54 RI. AI. A2 - 50127 FIRENZE - TEL. 055 3243094 (2 linee r.a.) - FAX 055 3243078
vIA B. CROCE, 129 - 80126 CAGORIA (NA) - TEL. 081 5846634 (2 linee r.a.) - FAX 081 5844865
vIA POPOLI, 15 - 06095 S. MARIA IN VALLE - TREVISO (TS) - TEL. 0422 391027 - FAX 0422 393413
vIA A. P. STELLA, 5 - 20125 MILANO - TEL. 02 67493255 (2 linee r.a.) - FAX 02 67493253
vIA A. GRAMSCI, 5/A - 95130 GRAVINA DI CATANIA (CT) - TEL. 095 7441585 - FAX 095 7442554



Vi riportiamo, di seguito, alcune referenze relative ad applicazioni di Nanorestore®:

Nome del monumento/opera/cantiere	Località – Provincia (Nazione)	Anno
Pitture murali del Cappellone degli Spagnoli nella Chiesa di Santa Maria Novella	Firenze (Italia)	1997
Pitture murali della controfacciata della Cattedrale di Santa Maria del Fiore	Firenze (Italia)	1999
Pitture murali di Filippo Lippi nella Cattedrale di Prato	Prato (Italia)	2002-3
Pitture murali medievali (XIII e XIV secolo) nella cripta di San Zeno	Verona (Italia)	2005
Pitture murali in Santa Maria delle Grazie	Gravedona-Como (Italia)	2005
Pitture murali del sito Maya di Calakmul (dichiarato dall'UNESCO World Heritage Site)	Calakmul (Messico)	2005-2008
Affreschi della cappella del podestà al museo del Bargello	Firenze (Italia)	2006
"La leggenda della Vera Croce" di Agnolo Gaddi, Chiesa di Santa Croce	Firenze (Italia)	2007
Pitture murali in Villa del Bene	Volargne-Verona (Italia)	2007
Bassorilievi in pietra d'Angera in Ca' Granda-Università Statale di Milano	Milano (Italia)	2007
Pitture nella chiesa di Vendel	Vendel (Svezia)	2007-2008
Pitture murali del sito Azteca di Tlatelolco	Città del Messico (Messico)	2007-2008
Pitture murali nella cappella dell'Annunciazione	Nazareth (Israele)	2008
Pitture murali del sito Azteca di Cholula	Cholula (Messico)	2008

Appendice C



BRESCIANI
Materiali ed Attrezzature
per il Restauro e la Conservazione

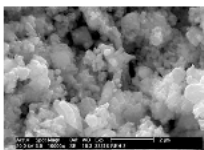


SCHEDA TECNICA

ver.1/18

NANOCALCE CaLoSiL® I25

Art.25703



Consolidante a base di
nano-particelle di calce
colloidale raccomandato
per consolidamento malte
porose, intonaci e pietra



Proprietà

CaLoSiL® contiene nano-particelle di calce idrata $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ sospesa in alcool propilico in concentrazioni 25 g/l. La dimensione media delle particelle è di 50-250 nm. Le dimensioni estremamente fine della nano-calce sintetica sono il risultato dalla sua preparazione, che si basa sulla sintesi chimica. A causa delle dimensioni delle particelle si forma un prodotto colloidale stabile che non sedimenta per lungo tempo.

CaLoSiL® è un prodotto pronto all'uso per consolidare pietra e intonaci. Il risultato del trattamento di pietra, malta o gesso con CaLoSiL® dopo l'evaporazione dell'alcool, si ha la formazione di idrossido di calcio solido che si converte poi in carbonato di calcio in modo simile alle tradizionali malte di calce per reazione con l'anidride carbonica atmosferica. Tutti gli alcoli evaporano senza lasciare residui. Non si formano prodotti chimici o residui di deterioramento sulla pietra o malta.

CaLoSiL® può essere applicato utilizzando procedimenti di pennellatura, per immersione, spruzzatura o iniezione. E' importante che la zona di trattamento sia al riparo dalle intemperie.

Formazione dell'idrossido di calcio e del calcio carbonato

Le particelle di idrossido di calcio formate dopo evaporazione dell'alcool coprono le superfici trattate nelle crepe, pori o giunti. Si forma una densa pellicola di idrossido di calcio, a seconda del numero dei cicli di trattamento e la concentrazione della soluzione utilizzata. Le dimensioni tipiche delle particelle sono dell'ordine di poche centinaia di nanometri. Il loro rilievo mediante microscopia ottica standard può essere difficile, è raccomandato l'uso del SEM (microscopio a scansione elettronica). Il carbonato di calcio si forma per reazione con l'anidride carbonica atmosferica e richiede la presenza di umidità. A seconda delle condizioni e della quantità di idrossido di calcio portato nella pietra, malta o gesso, la carbonatazione si svolge in tempi compresi tra qualche giorno a qualche settimana. In alcuni casi, dopo il trattamento, per accelerare il processo di carbonatazione si può utilizzare nebulizzare acqua sulla superficie.

BRESCIANI s.r.l. - via Breda 142 - 20126 Milano - tel. 02.27002121 r.a. - fax 02.2576184
www.brescianisrl.it - e-mail: info@brescianisrl.it

Pag.1/3



BRESCIANI
Materiali ed Attrezzature
per il Restauro e la Conservazione



SCHEDA TECNICA

ver.1/18

Penetrazione del prodotto

La penetrazione nella malta, pietra o intonaco dipende da molti fattori, di particolare importanza sono:

- Struttura e superficie caratteristiche dei materiali da trattare,
- Porosità e risalita capillare,
- Contenuto di umidità del materiale
- Temperatura e umidità dell'aria durante l'applicazione

Sono soprattutto le presenze di strati superficiali densi (per esempi croste di gesso su malte, intonaci) ad impedire una penetrazione di CaLoSil® in zone più profonde. La penetrazione in materiali con elevato contenuto di umidità è generalmente più difficile che in sostanze asciutte. Quando necessario una pre-bagnatura con etanolo può contribuire a ridurre il contenuto di umidità del materiale. Dopo evaporazione dell'etanolo, dovrebbe essere possibile applicare il CaLoSil® senza problemi.

Eventuali formazione di patine biancastre

La formazione di una patina bianca sulla superficie del materiale trattato non dipende solo sul comportamento di penetrazione CaLoSil® ma anche dalle condizioni di evaporazione dell'alcool. Una rapida evaporazione causa, nella maggior parte dei casi, una migrazione delle nano-particelle sulla superficie. In questo caso non c'è abbastanza tempo perché le particelle di idrossido di calcio si fissino all'interno dei materiali trattati. Regole generali per prevenire/ridurre la formazione di patina bianca sono:

- Iniziare il trattamento con prodotti a bassa concentrazione, aumentare la concentrazione dell'idrossido di calcio passo a passo.
- Evitare il trattamento di materiali umidi, ridurre il contenuto di umidità con un pretrattamento usando miscele etanolo o etanolo-acqua (1:1).
- Nel caso di superfici sensibili cercare di utilizzare CaLoSil® grigio, che ha una speciale formulazione che permette la penetrazione in profondità senza formazione di patina bianca.
- Evitare di "sovra-saturare" la pietra trattata, intonaco o malta. Rimuovere tutto il CaLoSil® che non è penetrato nel materiale trattato, ad esempio, con una spugna.
- Verificare il risultato dell'aggiunta di piccole quantità di acetone o eptani.

Tempi di lavorazione

Gli alcoli evaporano entro poche ore. Per il processo di carbonatazione si richiede tra qualche giorno a qualche settimana, a seconda della quantità di idrossido di calcio formatosi e delle condizioni ambientali (umidità, possibilità di migrazione dell'anidride carbonica).



BRESCIANI
Materiali ed Attrezzature
per il Restauro e la Conservazione



SCHEDA TECNICA

ver.1/18

CaLoSiL[®] e gli esteri dell'acido silicico

La combinazione di CaLoSiL[®] con gli esteri dell'acido silicico permettono di condurre con successo il consolidamento ed il rinforzo dei materiali con il quale il solo impiego degli esteri dell'acido silicico non funzionano in modo soddisfacente.

Si raccomanda di trattare i materiali in questione prima con CaLoSiL[®] e poi, dopo l'evaporazione dell'alcool, applicare gli esteri dell'acido silicico. L'idrossido di calcio formato da CaLoSiL[®] agisce come un promotore d'adesione e come catalizzatore accelerando l'idrolisi dell'estere dell'acido silicico. La resistenza finale è in molti casi molto superiore a quella che può essere raggiunta mediante il singolo trattamento con esteri dell'acido silicico. Possono essere utilizzati tutti gli esteri dell'acido silicico disponibili in commercio.

Miscibilità con altri materiali

CaLoSiL[®] può essere mescolato con etanolo, n- o iso-propanolo senza alcuna difficoltà. In contrapposizione l'aggiunta maggiore del 10% in peso di acqua comporta come risultato la formazione di soluzioni caratterizzate da una consistenza leggermente gelatinosa.

Quantità d'acqua più alte creano flocculazione ed il calcio idrossido precipita.

Stoccaggio

Tutti i materiali devono essere conservati tra +5°C e +30°C. Il prodotto si conserva stabile per almeno 3 mesi se rimane nel contenitore originali non aperto.

Dopo questo tempo, si possono verificarsi fenomeni di agglomerazione e sedimentazione.

Tuttavia, le particelle possono essere ri-disperse agitando il flacone chiuso o utilizzando una vasca ad ultrasuoni. Le proprietà delle nano-particelle rimangono inalterate.

Sicurezza

CaLoSiL[®] è infiammabile / combustibile. Tenere lontano da ossidanti, fonti di calore, scintille e fiamme. Dopo il versamento evitare il contatto con la pelle ed occhi. Ventilare bene, evitare di respirare i vapori. CaLoSiL[®] ha una reazione fortemente alcalina. Non respirare i vapori o la nebbia. Non fumare. Tenere il contenitore chiuso. Usare con ventilazione adeguata. Lavare accuratamente dopo l'uso.

Tenere lontano da fonti di accensione

Conservare in luogo fresco, asciutto e in un contenitore ermeticamente chiuso, ulteriori informazioni riguardanti la sicurezza durante il trasporto, lo stoccaggio e la manipolazione e per lo smaltimento e ecologia può essere trovato nella nostra ultima scheda di sicurezza.

Prima di utilizzare in larga scala si consiglia di trattare una piccola porzione di prova con CaLoSiL[®]. Per trovare il metodo di applicazione più favorevole e calcolare i consumi totali, di CaLoSiL[®].

Le informazioni fornite in questa scheda sono elaborate in base alle nostre conoscenze attuali e nel caso di variazioni dovute a nuove tecnologie e/o sviluppi del settore saranno modificate.

Prodotto destinato ad uso professionale

BRESCIANI s.r.l. - via Breda 142 - 20126 Milano - tel. 02.27002121 r.a. - fax 02.2576184
www.brescianisrl.it - e-mail: info@brescianisrl.it

Pag.3/3

Appendice D



C.T.S. S.R.L.

Via Piave, 20/22 - 36077 **Altavilla Vicentina (VI)** - Italy
Tel. +39 0444 349088 - Fax +39 0444 349039
www.ctseurope.com - cts.italia@ctseurope.com

SINCERT



Milano	Firenze	Roma	Napoli
Via F.lli Sforza, 9 - 20126 Tel. +39 02 5140525 Fax +39 02 5140523 cts.milano@ctseurope.com	Via L. Guicciardini, 54 - 50137 Tel. +39 055 349014 Fax +39 055 349019 cts.firenze@ctseurope.com	Via D. Parodi, 25 - 00198 Tel. +39 06 5550774 Fax +39 06 5550881 cts.roma@ctseurope.com	Via S. Maria Pigna, 22B/100 - 80145 Tel. +39 081 748307 Fax +39 081 7022116 cts.napoli@ctseurope.com

Nano ESTEL

PRODOTTO CONSOLIDANTE E FISSATIVO PER PIETRE NATURALI, MATTONI,
TERRACOTTA, MALTE E INTONACI.

CARATTERISTICHE

Nano ESTEL è una dispersione acquosa colloidale di silice di dimensioni nanometriche, attorno ai 10-20 nm. Queste dimensioni sono inferiori a quelle delle microemulsioni acriliche (40-50 nm), e a quelle della nanocalce (200 nm).

Si presenta come un liquido molto fluido, anche se ha un residuo secco del 30%, ed essendo stabilizzato con Idrossido di Sodio (NaOH < 0,5%) presenta un pH alcalino (pH = 9,8-10,4).

A seguito dell'evaporazione dell'acqua, le particelle si legano tra sé formando un gel di silice, analogamente a quanto avviene per il silicato d'etile, e determinando così l'effetto consolidante.

VANTAGGI

Rispetto al silicato d'etile **ESTEL 1000**, la dispersione di silice può essere applicata in ambienti umidi, e presenta un tempo di presa ridotto (3-4 giorni).

Essendo una dispersione acquosa, **Nano ESTEL non è infiammabile e non presenta simboli di tossicità**, con conseguente riduzione dei fattori di rischio in laboratorio e su cantiere, e riduzione dei costi di trasporto e stoccaggio.

A differenza dei silicati alcalini non provoca formazione di sottoprodotti secondari dannosi (con i silicati di sodio e potassio si formano rispettivamente soda e potassa, che carbonatano all'aria formando sali solubili).

Data la natura del gel di silice formatosi, la riduzione di permeabilità al vapore d'acqua è minima.

L'azione consolidante dovuta alla formazione della silice permette l'impiego di **Nano ESTEL** anche come legante di inerti per la realizzazione di malte per piccole stuccature, o con pigmenti, ottenendo una superficie opaca e chimicamente stabile.

LIMITI

La capacità di penetrazione è ridotta rispetto al silicato d'etile, ed il livello del potere consolidante è ancora oggetto di studio. Anche la resistenza nel tempo delle malte così ottenute è da valutare.

IMPIEGO

Nano ESTEL è un prodotto concentrato, al 30% di residuo secco, da diluire con 1-2 parti di acqua demineralizzata, portando così la percentuale di materia attiva al 10-15%. Si consiglia di effettuare dei test di prova per determinare l'esatto rapporto di diluizione, che può essere diverso da quanto indicato, in base al supporto ed all'effetto che si vuole ottenere.

La superficie da trattare deve essere pulita e risanata da eventuali sali efflorescibili presenti.

La temperatura atmosferica e delle superfici trattate deve essere compresa tra 5°C e 35°C. Al di sotto dei 5°C la reazione non avviene.

Il prodotto può essere applicato anche in presenza di elevati valori di umidità, o anche su superfici umide (anche se questo rende difficoltosa la penetrazione).



C.T.S. S.R.L.

Via Piave, 20/22 - 36077 Altavilla Vicentina (VI) - Italy
Tel. +39 0444 349088 - Fax +39 0444 349039
www.ctseurope.com - cts.italia@ctseurope.com

SINCERT



Milano	Firenze	Roma	Napoli
Via F. Sforza, 9 - 20126 Tel. +39 02 5140525 Fax +39 02 5140523 cts.milano@ctseurope.com	Via L. Guicciardini, 54 - 50137 Tel. +39 055 304014 Fax +39 055 304019 cts.firenze@ctseurope.com	Via O. Farini, 25 - 00146 Tel. +39 06 5530774 Fax +39 06 5530811 cts.roma@ctseurope.com	Via M. Poma, 22B/10 - 80145 Tel. +39 081 746307 Fax +39 081 746310 cts.napoli@ctseurope.com

Nano ESTEL può essere applicato per immersione, mediante pennello o anche a spruzzo con irroratori a bassa pressione, ed infine iniettato tramite siringhe nelle fessurazioni.

La sua reazione si completa dopo circa **tre-quattro giorni** con temperatura ambiente di 20°C ca.

Per velocizzare la presa si applica prima alcool etilico o Solvanol, poi **Nano ESTEL** diluito in acqua demineralizzata.

A causa della eterogeneità dei materiali esistenti, è indispensabile eseguire dei test preliminari su un campione del materiale che si vuol trattare in modo da poter verificare:

- il grado dell'effetto consolidante che si ottiene;
- la quantità di materiale da impiegare;
- l'assenza di variazioni cromatiche sul materiale lapideo trattato.

AVVERTENZE

La gelificazione di **Nano ESTEL** si può ottenere con uno dei seguenti sistemi

- Facendo evaporare l'acqua (metodo normale)
- Cambiando il pH (per esempio mescolato con calce si cementa improvvisamente)
- Miscelandolo con solventi idrosolubili (alcool, acetone)
- Aggiungendo un sale (metodo sconsigliato per il settore restauro)

E' quindi necessario valutare l'influenza di questi parametri prima di procedere all'applicazione.

Nel caso di sovradosaggio è possibile asportarne l'eccesso, prima dell'indurimento, con tamponi imbevuti in acqua demineralizzata.

Dato il pH alcalino l'effetto su alcune tipologie di pellicole pittoriche può essere negativo: verificare con cura prima dell'applicazione.

DATI FISICI

Principi attivi	Biossido di silicio di dimensioni nanometriche
Contenuto principi attivi (%)	30
Viscosità dinamica (mPas a 20°C)	6-8
Densità (g/cm ³ a 20°C)	1,1-1,3
Tensione di vapore (hPa a 25°C)	32
Dimensione delle particelle (nm)	<20
Superficie specifica (m ² /g)	260
pH	9,5-10,4

CONFEZIONI

Nano ESTEL è disponibile in confezioni da 1 - 5 - 25 kg.

STOCCAGGIO

Mesi 12 in recipienti originali ermeticamente chiusi. Conservare tra i 5 ed i 40°C.

Le informazioni contenute in questa scheda si basano sulle nostre conoscenze e prove di laboratorio alla data dell'ultima versione. L'utilizzatore deve assicurarsi della idoneità del prodotto in relazione allo specifico uso tramite prove preliminari, ed è tenuto ad osservare le leggi e le disposizioni vigenti in materia di igiene e sicurezza.

C.T.S. S.R.L. garantisce la qualità costante del prodotto ma non risponde di eventuali danni causati da un uso non corretto del materiale. Prodotto destinato esclusivamente **ad uso professionale**. Inoltre, possono variare in qualsiasi momento i componenti e le confezioni senza obbligo di comunicazione alcuna.



C.T.S. S.R.L.

Via Piave, 20/22 - 36077 **Altavilla Vicentina (VI) - Italy**
Tel. +39 0444 349088 - Fax +39 0444 349039
www.ctseurope.com - cts.italia@ctseurope.com

SINCERT



Milano Via F.lli. S. 1-12126 Tel. +39 02 5140525 Fax +39 02 5140523 cts.milano@ctseurope.com	Firenze Via L. Guicciardini 54-43107 Tel. +39 055 3248214 Fax +39 055 3248218 cts.firenze@ctseurope.com	Roma Via O. Farini, 25-00198 Tel. +39 06 5531074 Fax +39 06 5531081 cts.roma@ctseurope.com	Napoli Via della Pace 22B166-80145 Tel. +39 081 748257 Fax +39 081 748218 cts.napoli@ctseurope.com
---	---	---	---

Vi riportiamo, di seguito, alcune **referenze** raccolte sul prodotto “NANO ESTEL” :

Nome del monumento/opera/cantiere	Località – Provincia (Nazione)
Calcestruzzo dell'acquedotto romano	Sesto Fiorentino (I)
Cimborrio della Cattedrale di Barcellona	Barcellona (E)
Capilla de los Sastres – Cattedrale di Terragona	Terragona (E)
Portale in arenaria Galleria Ricci Oddi	Piacenza (I)
Ritocco pittorico sull'orologio del Campanile di Lavis	Lavis – Trento (I)
Concotti in terracotta provenienti dal sito palafitticolo di Lucone di Polpenazze	Lucone – Brescia (I)

Studi scientifici condotti da Università

Università di Pavia

Licchelli M., Weththimuni M., Zanchi C.; “Nanopartides For the consolidation of Lecce Stone”, Atti del XXIV Congresso Nazionale della Società Chimica Italiana, Lecce, 11-16 settembre 2011.

Università degli Studi di Napoli

Angelici E., Grassini S., Fulginiti D., Parvis M., Segimiro A.; “Compatibilità and efficacy of restoration products for artefacts in neapolitan yellow tuff” Scienza e Beni Culturali XXIX, Bressanone, 2013.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbona

G. Borsol, R. Veiga, A. Santos Silva; “Effect of nanostructured lime-based and silica-based products on the consolidation of historical renders”, 3rd Historic Mortars Conference 11-14 September 2013, Glasgow, Scotland

Appendice E

Safety data sheet

according to 1907/2006/EC, Article 31

Printing date 06.12.2022

Version number 6 (replaces version 5)

Revision: 06.12.2022

SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking

1.1 Product identifier

Trade name KSE 100

Article number: 0719

1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

No further relevant information available.

Application of the substance / the mixture

Coating compound/ Surface coating/ paint

Coating

1.3 Details of the supplier of the safety data sheet

Manufacturer/Supplier:

Remmers GmbH
Bernhard-Remmers-Str. 13
D-49624 Lönningen / Germany
Tel.: +49(0)5432/83-0
Fax: +49(0)5432/3985

Remmers (UK) Limited
Unit 4, Lloyds Court
Manor Royal, Crawley – West Sussex RH10 9QU
fon +44 (0) 1293 594 010
fax +44 (0) 1293 594 037

Information department:

Product Safety department: Phone: +44 (0) 1293 594 010
Email: sales@remmers.co.ukk

1.4 Emergency telephone number:

National Poisons Information Service (NPIS):

In England and Wales: NHS 111 - dial 111

In Scotland: NHS 24 - dial 111

24h-Transport Emergency Contact Phone Number:

within USA and Canada: 1-800-424-9300

outside USA and Canada: 001-703-527-3887

SECTION 2: Hazards identification

2.1 Classification of the substance or mixture

Classification according to Regulation (EC) No 1272/2008

Flam. Liq. 3 H226 Flammable liquid and vapour.

Asp. Tox. 1 H304 May be fatal if swallowed and enters airways.

Aquatic Chronic 4 H413 May cause long lasting harmful effects to aquatic life.

2.2 Label elements

Labelling according to Regulation (EC) No 1272/2008

The product is classified and labelled according to the GB CLP regulation.

Hazard pictograms



GHS02 GHS08

Signal word Danger

Hazard-determining components of labelling:

hydrocarbons, C11-C12, isoalkanes, <2% aromatics

hydrocarbons, C12-C15, n-alkanes, isoalkanes, cyclics, < 2% aromatics

Hazard statements

H226 Flammable liquid and vapour.

(Contd. on page 2)

