UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

LAUREA MAGISTRALE

in Ingegneria Edile

VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO DI INTONACI NATURALI SOTTOPOSTI A INVECCHIAMENTO ARTIFICIALE

EVALUATION OF THE BEHAVIOUR OF NATURAL PLASTERS SUBJECTED TO ARTIFICIAL AGING

Relatrice:

Prof.ssa Francesca Stazi

Laureando:

Nicolò Bruscantini

Correlatori:

Prof. Costanzo Di Perna
Prof.ssa Francesca Tittarelli

INDICE

INDICE ..... **I**

ABSTRACT **1**

1 INTRODUZIONE **3**

1.1 MOTIVAZIONI DELLA TESI 3

1.2 STATO DELL'ARTE 4

1.2.1 GLI INTONACI A BASE DI CALCE E BIOCALCE 4

1.2.2 UTILIZZO DELLE NANOPARTICELLE NEGLI INTONACI 8

1.3 OBIETTIVI DELLA TESI 10

2 FASI **12**

3 MATERIALI **14**

3.1 CODICE IDENTIFICATIVO DEI MATERIALI 18

4 ARTICOLAZIONE **20**

4.1 INVECCHIAMENTO ARTIFICIALE 20

4.2 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI DEGLI INTONACI 22

4.2.1 ANALISI PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLE MALTE MEDIANTE MICROSCOPIA ELETTRONICA A SCANSIONE (SEM) 23

4.2.2 PROVE DI TAGLIO PER LA VALUTAZIONE DELL'ADERENZA AL SUPPORTO 25

4.2.3 PROVE A STRAPPO PER VALUTARE L'ADERENZA AL SUPPORTO 28

4.2.4 DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO DINAMICO E PROVE DI FLESSIONE E COMPRESSIONE 32

4.2.5 ANALISI POROSIMETRICHE A MERCURIO 38

4.2.6 PROVE DI ASSORBIMENTO D'ACQUA PER CAPILLARITÀ CON IL METODO DEL TUBO DI KARSTEN 40

4.2.7 PROVE DI CONDUCIBILITÀ TERMICA 43
4.2.8 PROVE DI EROSIONE CON IL METODO A SPRUZZO 48
5 RISULTATI 53
5.1 ANALISI PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLE MALTE MEDIANTE MICROSCOPIA ELETTRONICA A SCANSIONE (SEM) 53
5.2 PROVE DI TAGLIO PER LA VALUTAZIONE DELL'ADERENZA AL SUPPORTO 56
5.3 PROVE A STRAPPO PER VALUTARE L'ADERENZA AL SUPPORTO 60
5.4 DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO DINAMICO E PROVE DI FLESSIONE E COMPRESSIONE 64
5.5 ANALISI POROSIMETRICHE A MERCURIO 74
5.6 PROVE DI ASSORBIMENTO D'ACQUA PER CAPILLARITÀ CON IL METODO DEL TUBO DI KARSTEN 78
5.7 PROVE DI CONDUCIBILITÀ TERMICA 81
5.8 PROVE DI EROSIONE CON IL METODO A SPRUZZO 85
6 DISCUSSIONE 89
7 CONCLUSIONI 105
***BIBLIOGRAFIA* 107**
ALLEGATI 112

ABSTRACT

L'oggetto della tesi è lo studio degli intonaci a base di biocalce usati per la protezione delle superfici storiche in terra cruda, in particolare si è sviluppato il confronto tra intonaci appena posti in opera e intonaci sottoposti a invecchiamento artificiale.

L'obiettivo consiste in:

- valutare l'incidenza dell'invecchiamento dell'intonaco sull'adesione con il supporto murario in terra cruda;
- valutare la durabilità di intonaci naturali puri e con l'addizione di nanoparticelle, rispetto alla resistenza all'erosione, resistenza meccanica e alle prestazioni termoigrometriche.

Sono state testate tre tipologie di malte da intonaco: una malta di riferimento a base di biocalce, una malta additivata con Nanoclay e una malta additivata con Nanolime + etanolo. Le nanoparticelle sono state aggiunte in ragione del 2% sul peso secco di biocalce, mentre l'etanolo del 4%.

L'utilizzo della biocalce per la realizzazione degli intonaci su muratura in terra cruda rappresenta un'alternativa all'uso di intonaci a base di terra: questi ultimi sono economici e hanno un'elevata permeabilità al vapore, ma sono anche molto vulnerabili all'acqua, sia dal punto di vista dell'assorbimento che dell'erosione

L'attività sperimentale può essere suddivisa in due fasi distinte:

- la prima fase è stata dedicata all'invecchiamento artificiale degli intonaci già realizzati in un precedente lavoro di tesi;
- la seconda fase è stata caratterizzata dallo svolgimento delle prove sperimentali sugli intonaci con lo scopo di determinarne i parametri e valutarne la conseguente efficacia protettiva su un supporto di muratura in terra cruda.

Le prove sperimentali svolte sono state analoghe a quelle eseguite in un precedente lavoro di tesi, al fine di confrontare come cambia il comportamento dei materiali in esame dopo l'invecchiamento.

Tali prove possono essere raggruppate in quattro gruppi:

- Analisi per la caratterizzazione delle malte mediante la microscopia elettronica a scansione (SEM);
- Prove meccaniche e di aderenza: prove di taglio e a strappo per valutare l'aderenza al supporto, determinazione del modulo elastico dinamico e prove di flessione e compressione;
- Prove per valutare le prestazioni termoigrometriche: analisi porosimetriche a mercurio, prove di assorbimento d'acqua (tubo di Karsten) e di conducibilità termica;
- Prove di erosione con il metodo a spruzzo.

Le prove hanno permesso di dimostrare che l'aggiunta delle nanoparticelle in massa, determina una diminuzione della resistenza meccanica, tuttavia, i valori sono rientrati nei limiti previsti dalle norme; sia prima che dopo l'invecchiamento il modulo elastico di queste malte si avvicina a quello del supporto murario in terra cruda più di una comune malta a base cementizia o di calce idraulica.

L'aggiunta di nanoparticelle determina un aumento dell'assorbimento d'acqua rispetto all'intonaco di base; questo fenomeno si ripete anche dopo l'invecchiamento, con valori superiori.

Per quanto riguarda l'erosione, l'aggiunta di nanoparticelle e in particolare di Nanoclay ha determinato risultati positivi anche dopo l'invecchiamento, dimostrando una resistenza maggiore rispetto all'intonaco base.

Complessivamente, si manifesta una maggiore durabilità nel tempo dell'intonaco additivato con nanoparticelle; inoltre quest'ultima rappresenta una soluzione più compatibile con il supporto in terra cruda, avendo un modulo elastico più vicino ad essa.

1 INTRODUZIONE

1.1 MOTIVAZIONI DELLA TESI

Attualmente è crescente l'interesse nell'ambito della ricerca di soluzioni adatte alla tutela e alla conservazione degli edifici storici garantendone la conservazione del valore materico, in particolare mediante l'uso materiali naturali, sostenibili e soprattutto compatibili con il supporto su cui si andrà a lavorare.
I manufatti in terra cruda rappresentano un valido esempio di edificio dal valore storico, in quanto sono la testimonianza di tradizioni costruttive antiche e di valori sociali del passato.
Tuttavia, la conservazione di tali edifici, a parte rari casi, è ben lontano da quello che meritano: spesso sono stati volutamente abbandonati perché ritenuti sinonimo di povertà e trascurandoli si è lasciato che la pioggia avesse la meglio su queste particolari strutture.
In passato si è privilegiato lo studio verso l'utilizzo di intonaci con una composizione analoga a quella del supporto (in terra), aggiungendo degli additivi stabilizzanti naturali; tuttavia questa soluzione presenta le problematiche tipiche di questi materiali nei confronti degli agenti atmosferici ed in particolare della pioggia. Inoltre agendo come superficie di sacrificio, si rendono necessari frequenti interventi di manutenzione affinché l'intonaco di terra mantenga la sua funzione protettiva.

Al fine di portare un contributo a questi problemi aperti, è stata sviluppata una sperimentazione sull'utilizzo di intonaci a base di biocalce, considerando l'effetto dell'aggiunta di additivi consolidanti naturali (nanoparticelle) in massa con composizione analoga a quella dei materiali di base.

L'applicazione di tali intonaci è avvenuta su supporti murari costituiti da blocchi Krioton in terra cruda assemblati.

1.2 STATO DELL'ARTE

1.2.1 GLI INTONACI A BASE DI CALCE E BIOCALCE

L'intonaco che viene applicato sulla superficie esterna di un manufatto in terra cruda ha lo scopo di proteggere il substrato dall'erosione provocata dalla pioggia e di ridurre il conseguente assorbimento di acqua.
Se viene utilizzato un intonaco a base di terra si parla di superficie di sacrificio che si erode al posto del muro, si evince quindi che sono necessarie manutenzioni periodiche [1].
Tuttavia è possibile ridurre questi problemi realizzando ad esempio un intonaco a base di calce o di biocalce in cui vengono inseriti in massa delle piccole quantità di additivi inorganici o organici. In questo modo è possibile ottenere una malta con resistenza meccanica e all'acqua maggiore [2].

La calce, fin dai tempi antichi, è stata utilizzata come legante in malte e intonaci. In particolare, l'"invenzione" dell'intonaco di calce risale almeno all'Epi-Paleolitico geometrico Kebariano (circa 12.000 a.C.) ed il suo utilizzo in architettura natufiana (circa 10.000 a.C) [3].
Tra i diversi fattori che hanno portato al disuso nel tempo delle malte a base di calce si elencano: l'uso massiccio del cemento Portland nelle costruzioni; le basse resistenze attribuite alle malte a base di calce; il tempo elevato di indurimento che impiegano le malte a base di calce e non ultima l'assenza di approfonditi studi sulle proprietà e le caratteristiche di queste malte [4].
Tuttavia, si è vista la tendenza, nel restauro delle strutture in muratura, di sostituire malte a base cementizia con altre a base di calce dato che, recentemente, è stato stabilito un importante danno alla muratura antica a causa del contenuto elevato di sali solubili delle malte a base di cemento e della loro incompatibilità con i vecchi materiali, come la terra cruda nel nostro caso [5].

La durabilità a lungo termine delle malte dipende principalmente dal fenomeno di trasporto dell'umidità, dalle trasformazioni di fase e dalla deformabilità sotto l'azione di carichi meccanici o idrotermici. Inoltre, si afferma che la longevità di molti monumenti è attribuita all'uso di una malta a base di calce porosa che permette all'umidità intrappolata nella muratura di fuoriuscire. [6], [7].

Con il processo di carbonatazione che comporta l'assorbimento di anidride carbonica atmosferica da parte della calce spenta, la quale viene poi convertita in carbonato di calcio, si riesce a fissare la malta a base di calce. Se si parla di calce idraulica, oltre alla reazione di

carbonatazione, vi è anche una reazione di idratazione e man mano che le due procedono, si ha un'evoluzione della struttura fisica della malta [6], [7].

In riferimento al miglior rapporto legante/aggregato da adoperare nel caso delle riparazioni ed il resturo sono stati fatti vari studi. Quello condotto da Cazalla et al. [8] ha dimostrato che con un rapporto legante/aggregato ≤ 1:4 si ottiene una malta più rigida e con meno fessure rispetto al rapporto 1:3; nonostante, lo studio condotto da Moropoulou et al. [5] afferma che al rapporto 1:3 potrebbe essere selezionato come base per il restauro.
Inoltre, con uno studio successivo si è appurato che con un aumento del contenuto di legante, entro un certo limite, si può avere un aumento della resistenza della malta. Tuttavia, non si deve superare il rapporto 2:1, altrimenti si avrebbe una grande riduzione della resistenza stessa. Un altro aspetto importante è legato all'aumento della porosità dato dal legante che semplifica la carbonatazione, migliorando la resistenza, purchè non se ne introduca una quantità eccessiva all'interno della malta in modo da non avere troppi vuoti. Tuttavia, si necessita di una migliore distribuzione granulometrica dell'aggregato in maniera tale da conferire maggiore resistenza alla malta [4].

La calce viene solitamente classificata come calce aerea (in grado di indurire solo all'aria) e calce idraulica (in grado di indurire anche sott'acqua) che può essere naturale o artificiale.
Ai giorni d'oggi si sta diffondendo sempre più l'utilizzo dei materiali naturali ed in particolar modo della biocalce (che storicamente prende il nome di calce idraulica naturale) con il quale si riesce ad ottenere un indurimento più rapido, una resistenza più elevata e una maggiore durabilità rispetto alla calce aerea [9], [10], [11].
Secondo a normativa europea UNI EN 459-1:2015 [12], la NHL incluse NHL2, NHL3.5 e NHL5 è una calce che viene prodotta dalla combustione di calcari più o meno argillosi o silicei (compreso il gesso), con riduzione in polvere mediante lo schiacciamento, con o senza macinazione. La classificazione e le proprietà delle diverse NHL dipendono principalmente dalla composizione delle materie prime.

La biocalce si ricava dalla calcinazione dei calcari marnosi (cioè composti, come già detto, da una miscela naturale di calcare e argilla) a temperatura di circa 1100-1250°C.
Quindi, dopo aver raccolto le materie prime, costituite da scarti di lavorazione della pietra o sassi da calce estratti in cave, avviene la calcinazione in forni tradizionali detti calchere o in impianti più moderni di tipo industriale. Dopo una settimana, terminata la calcinazione, si

ottiene la calce viva, ossia un materiale molto caustico che si presenta in zolle friabili e che non viene utilizzato nell'edilizia per la sua pericolosità. In seguito, dopo un adeguato raffreddamento, si procede con lo spegnimento della calce viva con abbondante acqua.
Nel caso in cui si parli di calce aerea, si ottiene il grassello, una pasta cremosa di calce idrata pronta per la confezione di malte o intonaci. In questo caso, per avere un buon grassello, si deve adottare una stagionatura che vada dai 3 mesi ai 2 anni. La biocalce invece, essendo una calce idraulica naturale, fa presa in presenza di acqua e risulta impossibile riuscire a mantenere stabile il grassello e a tal proposito viene commercializzata sotto forma di polvere di calce idrata, ottenuta dalla macinazione della calce spenta indurita [13].

Tra i numerosi vantaggi legati all'utilizzo della biocalce, si evidenziano i seguenti:

- È un materiale naturale, quindi sano ed ecosostenibile (minori emissioni di CO_2 in fase di produzione);
- Risulta essere perfettamente compatibile con i materiali e le tecniche costruttive tradizionali, perciò può essere utilizzata per gli interventi di manutenzione e restauro degli edifici storici;
- Ha una buona resistenza all'umidità e alle intemperie;
- È molto porosa ed igroscopica e mantiene asciutto l'ambiente grazie alla traspirazione con l'esterno migliorando il comfort degli ambienti indoor;
- Possiede un discreto potere disinfettante che la rende utile anche per prevenire infestazioni di muffe;
- Presenta un color nocciola chiaro (Fig. 1.1) ed una superficie piacevole al tatto e alla vista;

Una buona malta a base di biocalce (Fig. 1.2) prevede un rapporto tra legante ed aggregato di 1:2 e risulta composta di 25 kg di calce idraulica naturale NHL3.5, 80 litri di sabbia di fiume ben lavata e 28 litri d'acqua.
Con questa tipologia di malta si possono eseguire risarciture di importanti lesioni con lo scuci-cuci, iniezioni consolidanti, ristilatura profonda dei giunti (con possibilità di inserimento di barre o cavi di rinforzo in acciaio), fissaggio di parti distaccate di elementi di pietra e consolidamento di fondazioni con la tecnica della sottomurazione [13].

Fig. 1.1: Polvere di calce idraulica naturale [13]

Fig. 1.2: Malta a base di calce idraulica naturale [13]

1.2.2 UTILIZZO DELLE NANOPARTICELLE NEGLI INTONACI

Per ottenere dei migliori risultati in termini di resistenza meccanica e di resistenza all'acqua, sono state aggiunte, come additivo nell'intonaco a base di biocalce, delle piccole quantità di nanoparticelle.

In passato veniva utilizzato l'idrossido di calce (calce spenta) per stabilizzare il terreno, le malte e gli intonaci a base di calce, le vernici ed il calcare poroso. Ad oggi invece si stanno diffondendo sempre più le sospensioni di nanoparticelle ed in particolare di idrossido di calcio (nanocalce) per il consolidamento e la conservazione di pietre, adobe, stucchi, malte ed intonaci presenti in vecchie murature [16], [17], [18], [19].

L'ossido di calcio può essere applicato in dispersioni acquose (noto come acqua di calce) o alcoliche. Nel caso delle dispersioni acquose ci sono alcuni inconvenienti, come ad esempio l'incompleta conversione dell'idrossido di calcio in carbonato di calcio, l'alterazione cromatica post-trattamento e la scarsa profondità di penetrazione se applicato superficialmente [20], [21], [22].

Nel momento in cui il solvente è l'etanolo o l'alcol isopropilico, le dispersioni di particelle di idrossido di calcio hanno un tasso di agglomerazione molto lento che riduce la tendenza della formazione di un film bianco sulle superfici da consolidare [23].

Allo scopo di ottenere migliori prestazioni da questo tipo di prodotto, anche su supporti a bassa porosità, si è sviluppato un innovativo percorso sintetico che ha permesso una grande riduzione della dimensione media delle particelle esagonali di idrossido di calcio fino alla scala nanometrica [21], [24], [25].

Oltre a ciò, tenendo conto dell'aspetto conservativo, di primaria importanza risulta essere la somiglianza fisico-chimica tra la fase di consolidamento (rivestimento) ed il materiale che viene trattato [20], [23].

In questi casi si è parlato di nanoparticelle disperse in un solvente, ma obiettivo di questa tesi è di testare i diversi effetti che le diverse nanoparticelle, ovvero Nanoclay e Nanolime, conferiscono alle malte a base di calce naturale se inserite in massa, analizzando il comportamento dei materiali dopo l'invecchiamento artificiale.

In merito alla scelta effettuata nel lavoro di tesi precedente della percentuale di nanoparticelle da inserire come additivo all'interno delle malte a base di biocalce è stato fatto riferimento a

diversi studi che sono stati condotti sia per migliorare le caratteristiche delle malte a base di calce idraulica naturale stesse, ma anche per stabilizzare i terreni, per incrementare le prestazioni delle paste cementizie e delle schiume poliuretaniche.

Inizialmente si è considerato lo studio svolto da Kai Luo et al. [9] basato sul miglioramento delle proprietà meccaniche e della durata delle malte a base di calce idraulica naturale aggiungendo in massa diversi quantitativi di nanosilice (0%, 1%, 2%, 3% in peso).

I migliori risultati, soprattutto in termini di resistenza a compressione, si sono ottenuti con i maggiori contributi di nanoparticelle (2% e 3% in peso).

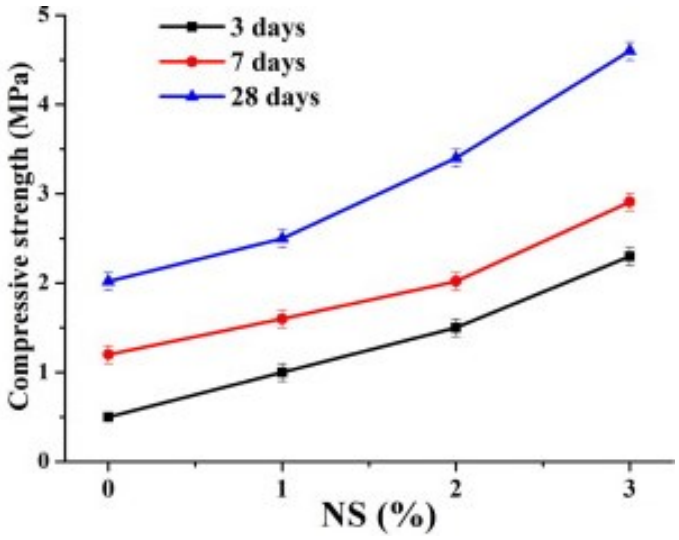


Fig. 1.3: Resistenza a compressione delle malte a base di NHL al variare del contenuto di NS e di stagionatura [9]

Riguardo l'esperienza condotta da Tabarsa et al. [26] invece, gli effetti della stabilizzazione di un terreno naturale sono basati sull'aggiunta in massa di differenti quantitativi di nanoclay (dal 0,2% al 3%). La migliore percentuale adottata risulta quella del 2% sul peso secco di terreno, la quale ha conferito principalmente una maggiore resistenza a compressione, ma anche una maggiore resistenza all'erosione.

In merito allo studio svolto da Varela et al. [27] si è svolta un'analisi comparativa sulla reologia e la fluidità delle paste cementizie SCC miscelate con riempitivo calcareo ed il 2% in peso di cemento di quattro differenti tipi di nanoclay (attapulgite, bentonite e sepiolite in polvere e dispersa in acqua). L'aggiunta di bentonite, tra tutte, ha evidenziato una grande scorrevolezza, facendo sì che la soglia di saturazione di questa tipologia di nanoclay fosse superata.

Un differente utilizzo della nanoclay si è avuto con lo studio svolto da Stazi et al. [28]. In questo caso, le nanoparticelle sono state inserite in due schiume poliuretaniche (spruzzate) termoisolanti aventi differente densità, con lo scopo garantire migliori prestazioni termiche e meccaniche. Tali schiume sono state utilizzate per il riempimento delle cavità delle pareti e per realizzare gli strati dell'isolamento esterno. I campioni sono stati testati con due diversi quantitativi di nanoclay in massa; in particolare, con il 2% in peso e con il 4% in peso.
Entrambe le tipologie di schiume hanno migliorato la resistenza igroscopica per la riduzione del diametro dei pori e si è anche manifestato un aumento della conduttività termica. Dal punto di vista meccanico invece, si è incrementata sia la resistenza a compressione (per le schiume a bassa densità) che la resistenza a trazione fino al 138%. Tuttavia, la soluzione migliore si è avuta con l'aggiunta del 4% di nanoclay in peso.

1.3 OBIETTIVI DELLA TESI

La tesi si inserisce in un filone di ricerca più ampio che mira allo sviluppo di soluzioni basso impatto ambientale per la tutela e conservazione degli edifici storici, nel rispetto dei supporti materici. In particolare l'obiettivo del presente lavoro è di verificare la durabilità di intonaci naturali con nanoadditivi, attraverso il confronto delle performance, meccaniche e termo-igrometriche e di resistenza all'erosione, in condizioni iniziali e post-invecchiamento.

Per raggiungere tale obiettivo sono stati analizzati intonaci a base di biocalce, valutando le prestazioni a 30 giorni di invecchiamento artificiale su un supporto in terra cruda, confrontandole con le prestazioni di stesso materiale non invecchiato e considerando l'effetto dell'aggiunta di additivi consolidanti naturali (nanoparticelle) in massa con composizione analoga a quella dei materiali di base. Sembra che gli additivi possano essere uno dei modi ideali per migliorare le caratteristiche meccaniche e le proprietà della biocalce [9].

La scelta della *Nanoclay*, come additivo, è stata fatta con la consapevolezza che il suo utilizzo è avvenuto già in molti campi, come ad esempio per la stabilizzazione dei terreni, per incrementare le prestazioni delle paste cementizie e per migliorare le prestazioni termiche e meccaniche delle schiume poliuretaniche termoisolanti.
Tuttavia, manca ancora uno studio mirato alla valutazione degli effetti di questa tipologia di nanoparticella nel tempo se la si dovesse aggiungere in massa nella malta da intonaco a base di calce idraulica naturale.

La scelta della *Nanolime*, come additivo, è stata fatta considerando che in letteratura si sono trovati vari articoli dedicati all'utilizzo, mediante spruzzatura, di questa nanoparticella con il fine di consolidamento superficiale; ma non si sono ancora valutati gli effetti relativi all'aggiunta in massa in una malta da intonaco a base di calce idraulica naturale.
L'aggiunta di tale nanoparticella è stata assunta uguale a quella prevista per la Nanoclay.
L'inconveniente che potrebbe verificarsi è legato al possibile innesco della reazione di carbonatazione, il quale può essere evitato aggiungendo nell'impasto anche una piccola quantità di etanolo (4% sul peso secco di biocalce, come specificato nella sezione relativa ai Materiali).

L'obiettivo della tesi consiste nel:

- valutare come l'effetto dell'invecchiamento sulla compatibilità intonaco-supporto in terra cruda;
- valutare l'incidenza dell'invecchiamento sul comportamento degli intonaci con aggiunta di nanoparticelle; sono stati considerati gli aspetti di resistenza all'erosione, di resistenza meccanica e le prestazioni termoigrometriche.

2 FASI

L'attività sperimentale eseguita può essere suddivisa in due fasi distinte. La prima fase è stata dedicata al processo di invecchiamento artificiale dei materiali già applicati ai supporti nel laboratorio del DIISM. La seconda fase è stata caratterizzata dallo svolgimento di prove sperimentali sugli intonaci con lo scopo di determinarne i parametri e valutarne l'efficacia protettiva a seguito della caratterizzazione (SEM) ed in termini di resistenza meccanica, prestazioni termoigrometriche e resistenza all'erosione.

Prima fase:

I componenti già realizzati nel precedente lavoro di tesi sono stati posizionati davanti a lampade riscaldanti che hanno realizzato in un apposito ciclo l'invecchiamento artificiale.

Il processo ha avuto una durata complessiva di 30 giorni.

Seconda fase:

Sono state effettuate delle prove scelte in funzione delle prestazioni che un intonaco dovrebbe garantire per proteggere le superfici in terra cruda massimizzando sostenibilità e durabilità dell'intervento

In particolare sono state eseguite le seguenti le prove:

- Analisi per la caratterizzazione delle malte mediante la microscopia elettronica a scansione (SEM) seguendo le indicazioni riportate da Collepardi et al. [29];
- Prove meccaniche e di aderenza:
    - Prove di taglio per la valutazione dell'aderenza al supporto (Shear Test), con riferimento all'articolo sperimentale di Erwan Hamard et al. [30];
    - Prove a strappo per valutare l'aderenza al supporto (Pull off Test), secondo la norma UNI EN 1015-12:2016 [31];
    - Determinazione del modulo elastico dinamico considerando la normativa UNI EN 12504-4:2005 [32] e prove di flessione e compressione seguendo la normativa UNI EN 1015-11:2019 [33].
- Prove termoigrometriche:
    - Analisi porosimetriche a mercurio seguendo le indicazioni riportate da Collepardi et al. [29];

- Prove di assorbimento d'acqua per capillarità con il metodo del tubo di Karsten, secondo la norma UNI EN 16302:2013 [34] e con riferimento alle raccomandazioni RILEM II.4 [35], agli studi sperimentali di Vandervoorde et al. [36] e di Mattone et al. [37];
- Prove di conducibilità termica, seguendo le procedure e le specifiche delle normative ISO 8301:1991 [38], UNI EN 12664:2002 [39] ed UNI EN 12667:2002 [40].

- Prove di erosione con il metodo a spruzzo (Pressure spray test), secondo la normativa neozelandese NZS 4298:1998 - Appendice D [41] e seguendo gli studi sperimentali di Mattone [37] e Stazi et al. [1].

3 MATERIALI

Il materiale utilizzato per la realizzazione dei muretti è:

Blocco semipieno Krioton

Per realizzare murature di tamponamento in speciale miscela di terra cruda composta di argilla italiana e fibre vegetali naturali (paglia, canapa, pula di riso), di dimensioni 21.5 x 23 x 11.5 cm ed una percentuale di foratura del 22%. Tale blocco (Fig. 3.1) risulta essere schermante contro i campi elettromagnetici, ecosostenibile e riciclabile, regolatore termoigrometrico e viene posto in opera a giunti verticali e orizzontali con boiacca d'argilla ottenendo blocchi rettificati. La boiacca si ottiene miscelando argilla in polvere (ottenuta dalla frantumazione dei blocchi) con acqua e viene applicata con uno strato sottile a cazzuola.

Il lato nervato va utilizzato per migliorare l'aggrappo dell'intonaco esterno. Il blocco può essere tagliato e lavorato in maniera precisa con utensili quali seghe manuali e a nastro, punte e frese. Lo smaltimento inoltre non è causa di inquinamento poichè il materiale può essere rimesso in natura e non rappresenta un rifiuto.

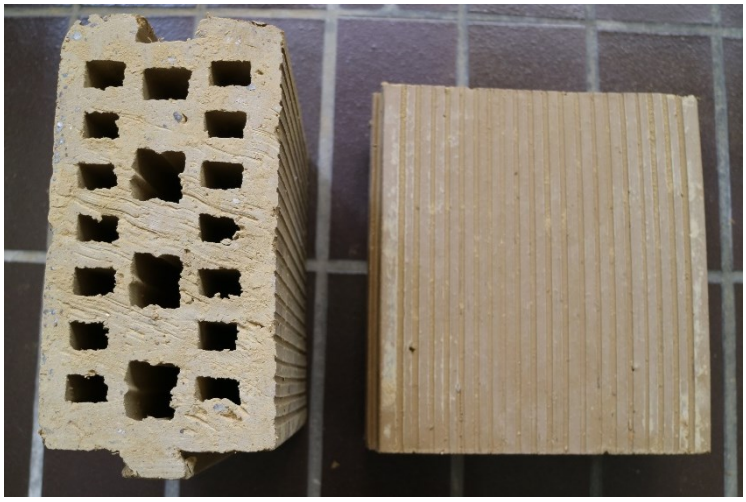


Fig. 3.1: Blocchi semipieni Krioton

Per quanto riguarda gli intonaci, essi sono stati realizzati a partire da un componente principale:

Biocalce (intonaco)

Intonaco naturale certificato, eco-compatibile, di pura calce naturale NHL 3.5 a norma UNI EN 459-1 [12], per un'intonacatura altamente traspirante e protettiva di murature portanti e di

tamponamento interne ed esterne, ideale nel GreenBuilding e nel Restauro Storico. Contiene solo materie prime di origine naturale e minerali ricilati. Tra gli aspetti positivi vi sono le ridotte emissioni di CO_2 e di sostanze organiche volatili. Inoltre risulta essere riciclabile una volta compiuto il suo ciclo di vita.

Tale prodotto è stato fornito in sacchi da 25 kg (Fig. 3.2).

Le informazioni relative la preparazione e l'applicazione della malta al supporto sono riportate in seguito, mentre ulteriori dati tecnici possono essere visionabili nella relativa scheda tecnica in allegato.

Fig. 3.2: Biocalce (intonaco)

A questo prodotto base sono state aggiunte singolarmente diverse tipologie di nanoparticelle attualmente reperibili in commercio. Le schede tecniche sono disponibili in Allegato alla tesi.

Tali prodotti sono di seguito illustrati in base al nome commerciale, al quale segue una breve descrizione:

Nanoclay, hydrophilic bentonite

Sono nanoparticelle di silicati minerali stratificati facenti parte della classe relativa alla montmorillonite/bentonite. Proprio come per i tradizionali minerali di argilla, uno strato è l'unità strutturale di base dei nanoclay, con i singoli strati composti da fogli tetraedrici e/o ottaedrici e con la disposizione dei fogli che svolgono un ruolo fondamentale nella distinzione dei vari minerali nanoclay. Tali nanoparticelle sono state fornite in contenitori da 500g e sono state inserite nell'impasto per un quantitativo pari al 2% del peso secco di biocalce. La quantità

di nanoparticelle aggiunta in massa nell'intonaco è stata scelta sulla base delle sperimentazioni svolte in passato (come riportato nel capitolo relativo alla Discussione).
Per avere ulteriori informazioni è possibile visionare la relativa scheda tecnica in allegato.

Fig. 3.3: Nanoclay, hydrophilic bentonite

Nanolime, CaLoSil E25

Contiene nanoparticelle di idrato di calce [$Ca(OH)_2$] sospese in alcol. Le concentrazioni tipiche sono comprese tra 5 g/L e 50 g/L, ed è stata scelta quella che si è trovata più facilmente in commercio di 25 g/L (Fig. 3.4). La dimensione media delle particelle è di 150 nm, con la quale si formano solidi stabili. Le lettere dietro il nome CaLoSiL indicano il solvente usato, i numeri danno la concentrazione totale di idrossido di calcio in g/L. "E" sta per etanolo, il quale funge da solvente, infatti E25 significa, 25 g/L di idrossido di calcio disperso in etanolo.
CaLoSiL è un consolidante usato per il trattamento di malta o intonaco, il quale si traduce nella formazione di idrossido di calcio solido dopo l'evaporazione dell'alcol che si converte in carbonato di calcio dalla reazione con anidride carbonica atmosferica. Questo prodotto può essere applicato tramite immersione, aspirazione capillare, spruzzatura o iniezione.
Tale prodotto è stato sottoposto ad un processo di distillazione semplice adoperando il riscaldamento della soluzione e mantenendo una temperatura costante di 78,4°C in modo da far evaporare gran parte dell'etanolo. L'obiettivo è stato quello di trattenerne una piccola quantità (nota) necessaria per evitare l'innesco della reazione di carbonatazione.

A tal proposito, per avere un confronto realistico tra le diverse malte, anche in questo caso si sono inserite le nanoparticelle nell'impasto per un quantitativo pari al 2% del peso secco di biocalce.

Fig. 3.4: Nanolime, CaLoSil E25

3.1 CODICE IDENTIFICATIVO DEI MATERIALI

Ai materiali della sperimentazione sono stati assegnati dei codici identificativi allo scopo di rendere immediato il richiamo a un determinato materiale.
In particolare, per le malte da intonaco sono state assegnate delle abbreviazioni tenendo conto della struttura di base.

In sequenza:
- la prima lettera "C" indica che si tratta di un intonaco a base di biocalce;
- la seconda lettera indica la tipologia di nanoparticella che è stata inserita nell'impasto (con "A" si indica che non vi è stata alcuna aggiunta);
- la terza lettera se presente è una A e sta per "aged" a significare che il provino è stato invecchiato;
- gli eventuali numeri (1, 2, 3, 4 o 5) che seguono le lettere stanno ad indicare un preciso campione di malta da intonaco che è stato testato per una determinata prova.

Di seguito si riportano due tabelle:
- una contenete le corrispondenze tra materiali e codici identificativi;
- una riportante il numero di campioni che si sono realizzati per effettuare le diverse prove.

CA	Malta da intonaco a base di Biocalce
CC	Malta da intonaco a base di Biocalce + 2% Nanoclay
CL	Malta da intonaco a base di Biocalce + 2% Nanolime + 4% etanolo

Tab. 3.1: Corrispondenze materiali e codici identificativi

	Sigla di base	Numero dei campioni
Analisi per la caratterizzazione delle malte mediante la miscroscopia elettronica a scansione (SEM)	CA / CAA	1 / 1
	CC / CCA	1 / 1
	CL / CLA	1 / 1
Prove di taglio per la valutazione dell'aderenza al supporto	CA / CAA	5 / 5
	CC / CCA	5 / 5
	CL / CLA	5 / 5
Prove a strappo per valutare l'aderenza al supporto	CA / CAA	5 / 5
	CC / CCA	5 / 5
	CL / CLA	5 / 5
Determinazione del modulo elastico dinamico e prove di flessione e compressione	CA / CAA	3 / 3
	CC / CCA	3 / 3
	CL / CLA	3 / 3
Analisi porosimetriche a mercurio	CA / CAA	1 / 1
	CC / CCA	1 / 1
	CL / CLA	1 / 1
Prove di assorbimento d'acqua per capillarità con il metodo del tubo di Karsten	CA / CAA	1 / 1
	CC / CCA	1 / 1
	CL / CLA	1 / 1
Prove di conducibilità termica	CA / CAA	1 / 1
	CC / CCA	1 / 1
	CL / CLA	1 / 1
Prove di erosione con il metodo a spruzzo	CA / CAA	1 / 1
	CC / CCA	1 / 1
	CL / CLA	1 / 1

Tab. 3.2: Numero dei campioni per ogni prova

4 ARTICOLAZIONE

4.1 INVECCHIAMENTO ARTIFICIALE

I materiali sono stati sottoposti ad invecchiamento artificiale nel laboratorio del Dipartimento DIISM mediante un ciclo ad alta temperatura della durata di un mese.

Per il ciclo di invecchiamento si è fatti riferimento alla pubblicazione di Bochen [49]: adottando delle lampade riscaldanti i campioni sono stati portati e mantenuti per un'ora a una temperatura di 60°C per cinque volte al giorno.

Operativamente la sperimentazione è stata svolta combinando il lavoro di una termocoppia e di un temporizzatore collegato ad un relè: inizialmente si è proceduto a tentativi aumentando e diminuendo il numero e cambiando la posizione delle lampade, variando la distanza delle lampade dagli intonaci e misurando il tempo necessario al raggiungimento della temperatura prefissata.

Una volta testato e calibrato il sistema, è stato impostato il temporizzatore affinché garantisse agli intonaci la temperatura di set point e il sistema è stato lasciato funzionare per 30 giorni, controllando cinque volte a settimana con la termocoppia che la temperatura fosse quella giusta.

Fig. 4.1: Sistema di lampade riscaldanti

Fig.4.2: Termocoppia per misurazione della temperatura

Fig.4.3: Postazione allestita nel laboratorio per l'invecchiamento

4.2 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI DEGLI INTONACI

Gli intonaci sono stati sottoposti ad invecchiamento artificiale per un periodo di 30 giorni prima di svolgere le prove.

Con le seguenti prove si è studiato sia il semplice intonaco in biocalce, preso a riferimento. Biointonaco (Biocalce, CA),; altri provini sono stati realizzati con l'aggiunta di nanoparticelle: Biointonaco + Nanoclay (CC) ed il Biointonaco + Nanolime + etanolo (CL). Si ricorda che le nanoparticelle sono state inserite all'interno dell'impasto per un quantitativo pari al 2% del peso secco di biocalce, mentre l'etanolo, dove previsto, è stato aggiunto in quantità pari al 4%.

Le prove eseguite sono state le seguenti:

- Analisi per la caratterizzazione delle malte mediante la miscroscopia elettronica a scansione (SEM) seguendo le indicazioni riportate da Collepardi et al. [29];
- Prove meccaniche e di aderenza:
    - Prove di taglio per la valutazione dell'aderenza al supporto (Shear Test), con riferimento all'articolo sperimentale di Erwan Hamard et al. [30];
    - Prove a strappo per valutare l'aderenza al supporto (Pull off Test), secondo la norma UNI EN 1015-12:2016 [31];
    - Determinazione del modulo elastico dinamico considerando la normativa UNI EN 12504-4:2005 [32] e prove di flessione e compressione seguendo la normativa UNI EN 1015-11:2019 [33].
- Prove termoigrometriche:
    - Analisi porosimetriche a mercurio seguendo le indicazioni riportate da Collepardi et al. [29];
    - Prove di assorbimento d'acqua per capillarità con il metodo del tubo di Karsten, secondo la norma UNI EN 16302:2013 [34] e con riferimento alle raccomandazioni RILEM II.4 [35], agli studi sperimentali di Vandervoorde et al. [36] e di Mattone et al. [37];
    - Prove di conducibilità termica, seguendo le procedure e le specifiche delle normative ISO 8301:1991 [38], UNI EN 12664:2002 [39] ed UNI EN 12667:2002 [40].

- Prove di erosione con il metodo a spruzzo (Pressure spray test), secondo la normativa neozelandese NZS 4298:1998 - Appendice D [41] e seguendo gli studi sperimentali di Mattone [37] e Stazi et al. [1].

4.2.1 ANALISI PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLE MALTE MEDIANTE MICROSCOPIA ELETTRONICA A SCANSIONE (SEM)

Le analisi per la caratterizzazione delle malte sono state condotte utilizzando il miscroscopio elettronico a scansione e seguendo le indicazioni riportate da Collepardi et al. [29] nel libro "Il calcestruzzo vulnerabile: prevenzione, diagnosi del degrado e restauro". Il microscopio a scansione è uno strumento elettro-ottico che permette, in seguito all'emissione di un fascio di elettroni ad alta energia nel vuoto, di analizzare i vari segnali prodotti dall'interazione degli elettroni del fascio con il campione in esame. Questi segnali sono acquisiti da opportuni rilevatori e vengono elaborati fino ad ottenere un'immagine a livelli di grigio. In questo modo si ottengono informazioni riguardo la microstruttura del materiale (forma/morfologia delle particelle) e la dimensione dei pori (sulla base dei vuoti che si vedono).
A contatto con il campione vengono rilasciati vari segnali, tre dei quali sono i più utilizzati e portatori di diverse informazioni:

- Elettroni secondari: sono quelli che vengono emessi sulla superficie del materiale e grazie ai quali viene visualizzata l'immagine (rappresenta la morfologia del campione);
- Elettroni retrodiffusi: danno informazioni sia legate alla composizione chimica che alla morfologia superficiale del campione in esame. Sono quelli che vengono diffratti dal materiale e grazie ai quali è possibile ottenere un'indicazione sulle dimensioni degli atomi. Dove l'immagine è più chiara, è presente un maggior accorpamento, nonché atomi più pesanti che rifraggono gli elettroni; nelle zone più scure gli atomi presentano un numero atomico minore e di conseguenza la rifrazione degli elettroni è minore;
- Raggi X: grazie a questi è possibile ottenere una mappa elementare che mostra la distribuzione spaziale di un particolare elemento individuato perché quando esso colpito dal fascio emette una radiazione caratteristica (l'elemento colpito dal fascio si eccita ed emette in seguito delle radiazioni caratteristiche legate al suo numero atomico).

Strumenti utilizzati:

- Microscopio elettronico a scansione (Fig. 4.2 a), costitutito da:
  - una colonna elettronica, dove viene creato il fascio di elettroni;
  - una camera da vuoto, dove il fascio di elettroni interagisce con il campione;
  - vari tipi di rilevatori, che acquisiscono i segnali dell'interazione fascio di elettroni-campione e li trasferiscono agli elaboratori;
  - uno schermo, in cui si ricostruisce l'immagine dal segnale.

Provini:

I campioni di malta che sono stati sottoposti alle analisi di caratterizzazione mediante la microscopia elettronica a scansione derivano dai frammenti dei provini (Fig. 4.2 b) che sono stati precedentemente sottoposti alle prove meccaniche di flessione e compressione.

In totale sono state analizzate 3 tipologie di malte (CA, CC e CL). Le caratteristiche materiche dei provini sperimentati e la preparazione delle malte sono descritte nella sezione di questa tesi relativa ai Materiali. Le dimensioni dei campioni sono di circa 1 cm x 1 cm x 1 cm.

a. Microscopio elettronico a scansione

b. Apertura deel microscopio per l'inserimento dei campioni

Fig. 4.2: Strumenti e campioni sottoposti alle analisi di caratterizzazione con il SEM

Procedimento:

La sorgente elettronica nella sommità della colonna genera un fascio di elettroni mediante un filamento metallico che, portato ad elevata temperatura, produce elettroni. Gli elettroni vengono quindi fatti accelerare ad energia variabile tra alcune centinaia ed alcune decine di migliaia di elettronvolt (da 200 eV a 30 keV) grazie ad un anodo posto sotto il filamento. Il fascio così

ottenuto risulta essere divergente e per questo deve essere fatto riconvergere e focalizzato da una serie di lenti elettromagnetiche e di fenditure all'interno della colonna. Nella parte inferiore della colonna, una serie di bobine di scansione deflette il fascio fornendogli un movimento alternato lungo linee parallele ed equidistanti, in modo che, una volta raggiunta la superficie del campione, vada a ricoprire un'area predefinita. Il fascio infine, focalizzato dalla lente finale, esce dalla colonna e va a colpire il campione all'interno della camera da vuoto. Nel momento in cui gli elettroni del fascio penetrano all'interno del campione perdono energia che viene riemessa dal campione sotto varie forme ed ogni tipo di emissione generata è potenzialmente un segnale dal quale creare un'immagine.

4.2.2 PROVE DI TAGLIO PER LA VALUTAZIONE DELL'ADERENZA AL SUPPORTO

Per lo svolgimento di tali prove è stata seguita la metodologia proposta da Hamard et al. [30], una procedura per determinare l'idoneità degli intonaci eseguiti in situ a proteggere le murature del patrimonio architettonico in terra cruda.

Lo scopo di queste prove è molteplice:

- Osservare come varia l'aderenza al supporto al variare della formulazione dell'intonaco e dopo l'azione dell'invecchiamento artificiale;
- Convalidare le formulazioni che possiedono un'aderenza al supporto sufficientemente elevata. Nel caso in questione deve avere un'aderenza tale da resistere ad una forza di taglio pari a 10 volte il peso proprio dell'intonaco (confronto in termini di tensioni tangenziali, deve essere verificato che la $\tau_{max} > \tau_{amm} = 3$ kPa).

Strumenti utilizzati:

- Dispositivo di carico, costruito appositamente, facendo riferimento al modello in legno proposto da E. Hamard et al. [30] utilizzato per caricare tutti i campioni fino a rottura. Tuttavia, a causa dei carichi maggiori (fino a 40 kg circa) si è adottando un telaio costituito di angolari metallici con una tavola in legno per appoggiare i carichi.

È stato importante che il dispositivo di carico abbia assicurato un buon contatto con la superficie del campione in modo tale da minimizzare la spinta contro il muro, così da ridurre l'attrito all'interfaccia. Il carico è stato applicato mediante incrementi di 0,50kg utilizzando dei secchi agganciati al dispositivo di carico e aggiungendo a ogni step mezzo litro d'acqua alla

precedente. All'inizio la durata di ciascun incremento di carico era di 30 secondi, ma dal momento che la rottura dei campioni è avvenuta nei primi 10 secondi, si è deciso di ridurre tale durata a 15 secondi.

Fig. 4.3: Dispositivo di carico (altezza 40 cm, larghezza 20 cm, spessore 2 cm)

Provini:

Sono state sperimentate 3 miscele, identificate con le sigle CA (Biocalce), CC (Biocalce + 2% Nanoclay) e CL (Biocalce + 2% Nanolime + 4% etanolo). Per queste ultime, alla biocalce sono state aggiunte nanoparticelle (proprietà visionabili al capitolo relativo i materiali) in piccole quantità per valutare la resistenza che ne deriva.

Fig. 4.6: Esempi di provini prima e dopo la prova a taglio

Analisi:

La massa per la quale avviene la rottura del campione, che è definita massa di rottura (m_f, kg), è stata registrata. Noti il carico e la superficie del campione (S, mm^2) si può calcolare lo sforzo di taglio medio a rottura (τ, N/mm^2) con la seguente formula:

$$\tau = m_f \cdot g / S$$

dove $g = 9.81$ m/s^2.

Si ipotizza che un intonaco con adeguata aderenza possa resistere ad una forza di taglio pari almeno a 10 volte il peso dell'intonaco stesso, per cui può essere determinata una tensione tangenziale ammissibile tale che:

$$\tau_{max} > \tau_{amm}$$

dove:

τ_{max}, è la resistenza a taglio del campione (kPa);

τ_{amm}, è la tensione tangenziale ammissibile data da:

$$\tau_{amm} = \rho \cdot d = 3 \text{ kPa}$$

dove:

ρ, è la densità dell'intonaco assunta pari a 1.6 kg/dm^3 = $1.6 \cdot 10^{-6}$ kg/mm^3;

d, è lo spessore del campione ed è pari a 20 mm.

4.2.3 PROVE A STRAPPO PER VALUTARE L'ADERENZA AL SUPPORTO

Per lo svolgimento delle prove a strappo sulle diverse tipologie di malte si sono seguite le specifiche della normativa UNI EN 1015-12:2016 [31], "Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 12: Determinazione dell'aderenza al supporto di malte da intonaco esterno ed interno".

Lo scopo di tali prove è stato quello di determinare la forza di aderenza tra malta da intonaco esterno ed il supporto costituito dai bocchi krioton in terra cruda. Tale forza di aderenza è stata determinata come lo sforzo massimo di trazione applicato mediante un carico diretto

perpendicolare alla superficie della malta da intonaco esterno sul supporto, per mezzo di piastre con teste di trazione incollate all'area di prova della superficie delle malte.
La forza di aderenza f_u, in N/mm^2 è il quoziente tra il carico di rottura e l'area di prova.
In sintesi, lo scopo di queste prove è molteplice:

- Osservare come varia l'aderenza al supporto al variare della formulazione dell'intonaco;
- Convalidare le formulazioni che possiedono un'aderenza al supporto sufficientemente elevata.

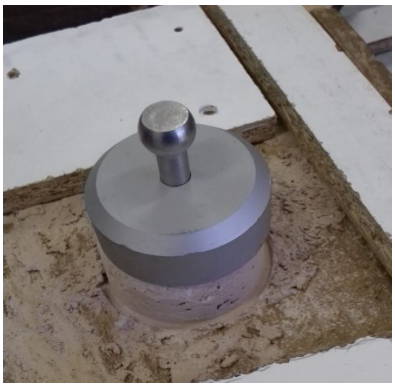
Un intonaco a base di biocalce è di qualità meccanica accettabile se l'intonaco ha un legame di aderenza abbastanza efficace con il supporto (≥ 0.2 N/mm^2, dalla scheda tecnica della biocalce).

Strumenti e materiali utilizzati:

- Piastre circolari con testa di trazione in metallo con diametro di 50 mm e spessore di 10 mm costituite da un accessorio centrale di raccordo all'apparecchiatura della forza di trazione diretta;
- Adesivo a base di resina epossidica bicomponente ;
- Macchina di prova per la prova di trazione diretta con capacità di applicare il carico alla piastra con testa di trazione tramite un raccordo appropriato che elimini qualsiasi forza di flessione.

1. Preparazione della resina epossidica

2. Macchina di prova



3. Applicazione della piastra sul campione

4. Applicazione del carico di trazione con la macchina

Fig. 4.7: Fasi salienti dell'esecuzione delle prove a strappo

Provini:

Sono state sperimentate 3 miscele, identificate con le sigle CA (Biocalce), CC (Biocalce + 2% Nanoclay) e CL (Biocalce + 2% Nanolime + 4% etanolo).

Le caratteristiche materiche dettagliate dei provini sperimentati e la preparazione delle malte sono descritte nella sezione di questa tesi relativa ai materiali.

Procedimento:

Una volta terminato l'invecchiamento si sono eseguite le prove di pull off:

- Incollaggio delle teste di trazione (delle piastre circolari in metallo) con adesivo epossidico in posizione centrale sulle aree di prova;
- Applicazione del carico di trazione a velocità uniforme (0.011 $N/mm^2 \cdot s$) per mezzo della macchina di prova in maniera perpendicolare all'area di prova tramite le piastre con testa di trazione, registrando i carichi di rottura;
- Calcolo delle singole aderenze f_u (in N/mm^2) dal rapporto tra il carico di rottura (N) e l'area di prova dei provini cilindrici (mm^2) con la formula

$$f_u = \frac{F_u}{A}$$

- Determinazione della forza di aderenza dalla media $f_{u,media}$, in N/mm^2, dei valori ottenuti dai 5 provini per ciascuna tipologia di malta (al più prossimo 0.1 N/mm^2).

dove:

f_u è la forza di aderenza (N/mm^2);

F_u è il carico di rottura (N);

A è l'area di prova dei provini cilindrici (mm^2).

Le rotture che si possono verificare con queste prove possono distinguersi in:

- Frattura di adesione che si verifica all'interfaccia tra la malta e il supporto (Fig. 4.). Il valore di prova equivale alla forza di aderenza;

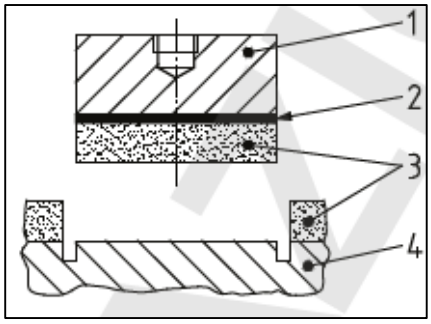


Fig. 4.8: Frattura all'interfaccia malta-supporto (1 Piastra con testa di trazione, 2 Strato adesivo, 3 Malta, 4 Supporto) [31]

- Frattura di coesione che si manifesta nella malta stessa (Fig. 4.). La forza di aderenza è maggiore del valore di prova;

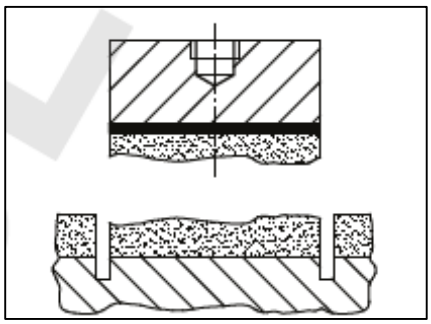


Fig. 4.9: Frattura nella malta stessa [31]

- Frattura di coesione che si verifica nel materiale di supporto (Fig. 4.). La forza di aderenza è maggiore del valore di prova.

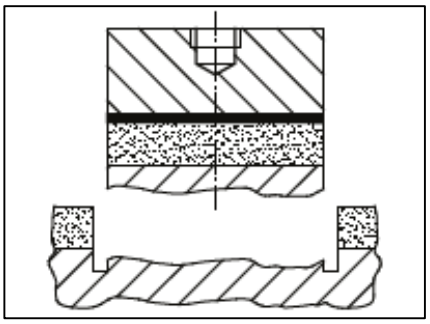


Fig. 4.10: Frattura nel materiale di supporto [31]

Per fare maggiore chiarezza, il procedimento può comunque essere riassunto nei seguenti punti:

- Incollaggio delle teste di trazione (delle piastre circolari in metallo) con adesivo epossidico in posizione centrale sulle aree di prova;
- Applicazione del carico di trazione a velocità uniforme (0.050 N/mm^2 x s) per mezzo della macchina di prova in maniera perpendicolare all'area di prova tramite le piastre con testa di trazione, registrando i carichi di rottura;
- Calcolo delle singole aderenze f_u (in N/mm^2) dal rapporto tra il carico di rottura (N) e l'area di prova dei provini cilindrici (mm^2);
- Determinazione della forza di aderenza dalla media $f_{u,media}$, in N/mm^2, dei valori ottenuti dai 5 provini per ciascuna tipologia di malta (al più prossimo 0.1 N/mm^2).

Fig. 4.11: Supporti dopo la prova di pull-off

4.2.4 DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO DINAMICO E PROVE DI FLESSIONE E COMPRESSIONE

Per eseguire le prove di flessione e compressione sulle diverse tipologie di malte si sono seguite le specifiche della normativa UNI EN 1015-11:2019 [33], "Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar". Tali prove sono state svolte solo dopo aver determinato il modulo elastico dinamico delle stesse malte indurite facendo riferimento alla norma UNI EN 12504-4:2005 [32], "Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity".
La conduzione di tali prove può essere suddivisa in tre fasi distinte:

- Determinazione preliminare del modulo elastico dinamico delle malte da intonaco, determinato utilizzando il Pundit, partendo dal tempo di attraversamento *t* degli ultrasuoni (in µs) dalla sonda emittente a quella ricevente dell'impulso nei campioni di malta;
- Determinazione della resistenza a flessione delle malte da intonaco, determinata mediante l'applicazione di un carico su tre punti dei provini di malta fino a rottura;
- Determinazione della resistenza a compressione delle malte da intonaco, determinata sulle due parti ottenute dalla prova di resistenza a flessione.

Provini:

Per queste prove si sono analizzati 3 provini prismatici per ogni formulazione per un totale di 12 provini, con dimensioni di 4 cm x 4 cm x 16 cm che sono stati sottoposti alle prove dopo invecchiamento artificiale di 30 giorni.

I provini sono identificati con le sigle CA (Biocalce), CC (Biocalce + 2% Nanoclay), CL (Biocalce + 2% Nanolime + 4% etanolo).

a. Provini CA invecchiati

b. Provini CC invecchiati

c. Provini CL invecchiati

Fig. 4.12: Provini a 30 giorni di invecchiamento

Rilevamento degli ultrasuoni e determinazione del modulo elastico dinamico:

Tali prove sono state svolte facendo riferimento alla normativa UNI EN 12504-4:2005 [32], *"Testing concrete Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity"*, basata sul principio di propagazione delle onde elastiche longitudinali.

Le prove a ultrasuoni fanno parte di quelle non distruttive, cioè delle prove che non alterano il materiale e sono finalizzate alla ricerca e all'identificazione delle sue caratteristiche; vengono usate frequenze comprese tra 20 kHz e fino a 1000 kHz, non percepibili dall'uomo.

Le onde ultrasoniche vengono facilmente trasmesse attraverso i materiali, mentre incontrando uno strato di aria (fessura, cavità, intercapedine) vengono quasi completamente riflesse: ciò rappresenta un limite nell'applicazione degli ultrasuoni in murature porose o discontinue, come quelle degli edifici storici.

Tuttavia, le onde ultrasoniche possono essere vantaggiose se applicate nella rilevazione di discontinuità provocate da degradi che non sono ancora visibili, presenti fin dall'origine [29].

Nel caso in esame, dopo aver determinato le densità rapportando il peso ed il volume dei campioni, si è utilizzato il Pundit (che lavora con frequenze di circa 50kHz) per misurare il tempo di attraversamento degli ultrasuoni (in μs) dalla sonda emittente a quella ricevente (preventivamente unto con grasso) nei campioni di malta da intonaco (CA, CC, CL) che sono stati sottoposti successivamente alle prove meccaniche di flessione e compressione.

Dopo aver misurato il tempo *t* impiegato dalle onde a percorrere un determinato cammino e pesato il provino, si è determinata la velocità *V*.

Si possono attuare tre tipi di rilevazioni a seconda delle circostanze: trasmissione diretta, semi-diretta ed indiretta, nel caso di questa tesi ci si è avvalsi di quella diretta.

La trasmissione diretta è da preferirsi perché consente una misura dello spessore *L* attraversato dalle onde e quindi, mediante il rilevamento del tempo *t* (in μs), anche della velocità *V* (in m/s) e quindi del modulo elastico dinamico E_d (MPa), una volta nota la densità ρ (kg/m^3).

$$V = \frac{L}{t}$$

$$E_d = \rho V^2$$

Taratura dello strumento

Esecuzione della misura

Applicazione del grasso

Fig. 4.13: Misurazione del modulo elastico dinamico

Determinazione della resistenza a flessione:

Una volta terminato l'invecchiamento artificiale e dopo aver determinato il modulo elastico dinamico delle tre tipologie di malte (CA, CC, CL), si sono eseguite le prove di resistenza a flessione.

Per compiere le suddette prove, oltre agli strumenti elencati precedentemente, si è utilizzata una macchina in grado di applicare un carico ad una velocità specifica. Questa macchina è composta di due rulli di appoggio in acciaio distanziati tra loro di 100 mm ed un terzo rullo di acciaio delle stesse dimensioni degli altri due, posizionato centralmente tra i rulli di appoggio.

Il terzo rullo (di carico) e uno dei rulli di appoggio devono essere in grado di inclinarsi leggermente per consentire una distribuzione uniforme del carico sulla larghezza del provino senza sottoporlo a sollecitazioni torsionali.

Il campione è stato posizionato con una delle facce (tra quelle che sono state a contatto con l'acciaio dello stampo) sui rulli di supporto; in seguito è stato applicato il carico ad una velocità uniforme di 10 N/s in modo da ottenere la rottura entro il periodo compreso tra 30 s e 90 s.

Dopo aver registrato il carico massimo applicato (in N), le due metà dei provini sono state sottoposte alla prova di resistenza a compressione.

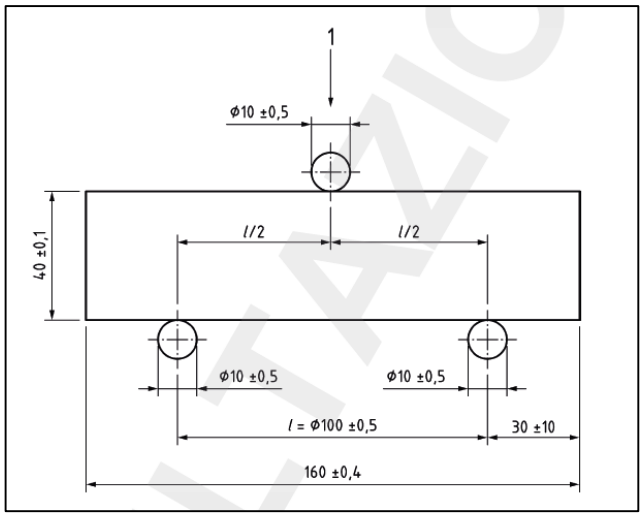


Fig. 4.14: Configurazione del provino all'interno della macchina di prova (1 Carico) [33]

Per quanto riguarda il calcolo della resistenza a flessione *f*, in N/mm^2 è stata utilizzata la formula seguente:

$$f = 1.5 \frac{F \text{ x } l}{b \text{ x } d^2}$$

dove:

F è il carico massimo applicato al provino (N);

l è la distanza compresa tra i rulli di appoggio (mm);

b è la larghezza del provino (mm);

d è la profondità del provino (mm).

1. Provino sottoposto alla prova di flessione

2. Rottura del provino per flessione

Fig. 4.15: Esecuzione della prova di resistenza a flessione

Determinazione della resistenza a compressione:

Dopo aver compiuto le prove di resistenza a flessione, le due metà dei provini ottenute sono state sottoposte alle prove di resistenza a compressione.

Per compiere le suddette prove, oltre agli strumenti elencati precedentemente, si è utilizzata una macchina di prova in grado di applicare un carico ad una velocità specifica. Questa macchina è costituita da una piastra in acciaio superiore in grado di allinearsi quando entra in contatto con il provino; inoltre, tali piastre (aventi dimensioni di 40 x 40 x 10 mm di spessore) devono essere trattenute dall'inclinarsi l'una rispetto all'altra durante l'applicazione del carico.

Il posizionamento del singolo provino è avvenuto solo dopo aver pulito la superficie di appoggio della macchina, poi si è applicato il carico su una delle facce che sono state a contatto con l'acciaio dello stampo. La disposizione di tali provini è avvenuta in modo che l'estremità formata fosse di circa 16 mm dal bordo più vicino delle piastre d'appoggio e facendo in modo che il carico venisse applicato su tutta la larghezza delle facce a contatto con le piastre stesse.

Il carico è stato aumentato continuamente di finchè non si è verificata la rottura; in particolare, per le malte da intonaco di categoria *CS II* (visionabile dalla scheda tecnica della Biocalce in allegato) la velocità di applicazione del carico è stata assunta pari a 100 N/s. Per ogni provino si è registrato il carico massimo applicato in N.

Infine, la resistenza a compressione, espressa in N/mm^2, è stata ottenuta dal rapporto tra il carico massimo sopportato dal singolo provino e la sua area della sezione trasversale (nominalmente 1600 mm^2). Si sono registrate le resistenze dei provini al più prossimo 0.05 N/mm^2, calcolando poi la media al più prossimo 0.1 N/mm^2 e si è verificata la categoria della malta indurita secondo la UNI EN 998-1:2016 [43].

1. Provino sottoposto alla prova di compressione

2. Rottura del provino per compressione

Fig. 4.16: Esecuzione della prova di resistenza a compressione (esempio tipologia CL)

4.2.5 ANALISI POROSIMETRICHE A MERCURIO

Le analisi porosimetriche a mercurio rientrano nella valutazione delle prestazioni termoigrometriche delle diverse tipologie di malte da intonaco (CAA, CCA e CLA). Tali analisi sono state svolte in conformità di quanto riportato da Collepardi et al. [29] nel libro "Il calcestruzzo vulnerabile: prevenzione, diagnosi del degrado e restauro", per valutare la porosità aperta totale e la distribuzione dimensionale dei pori.

Il mercurio, a differenza dell'acqua, non ha alcuna affinità con i prodotti presenti nei materiali da costruzione e non viene assorbito dal materiale poroso come avviene per l'acqua.

Affinchè il mercurio penetri nei pori di un materiale poroso si deve applicare una pressione che è tanto maggiore quanto più piccolo è il raggio dei pori, come indicato nell'equazione di Washburn:

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

dove:

P è la pressione che occorre applicare per far entrare il mercurio entro i pori;

r è il raggio dei pori;

σ è la tensione superficiale del mercurio;

θ è l'angolo di contatto tra mercurio e materiale solido.

Poiché nel caso del sistema mercurio-malta, l'angolo θ è maggiore di 90°, risulta che P diventa negativa perchè cosθ è negativo. A tal proposito si può concludere che, quando si immerge un solido poroso in un bagno di mercurio, occorre applicare una pressione P dall'esterno (negativa) per far entrare il liquido nel solido (se il liquido fosse l'acqua, P sarebbe positiva).

Strumenti utilizzati:

- Porosimetro a mercurio.

Provini:

I campioni di malta da intonaco che sono stati sottoposti alle analisi porosimetriche a mercurio (Fig. 4.) derivano dai frammenti dei provini che sono stati precedentemente sottoposti alle prove meccaniche.

In totale sono state analizzate 3 tipologie di malte (CA, CC e CL). Le caratteristiche materiche dei provini sperimentati e la preparazione delle malte sono descritte nella sezione di questa tesi relativa ai Materiali. Le dimensioni dei campioni sono intorno al cm^3.

Fig. 4.17: Campioni di malta da intonaco sottoposti alle analisi porosimetriche a mercurio

Procedimento:

Per determinare la porosità delle diverse malte con un porosimetro a mercurio, si immerge il campione in un bagno di mercurio, si applica una pressione P crescente e si misura il volume di mercurio (V_{Hg}) che progressivamente penetra nei pori del solido. Al crescere della pressione saranno penetrati prima i pori di raggio maggiore e dopo quelli di minore dimensione. Pertanto si riporta in un diagramma il volume di mercurio (V_{Hg}) riferito ad un certo peso di campione che è penetrato in funzione della pressione P applicata (N/mm^2).

Poiché tra pressione applicata e raggio (o diametro) dei pori esiste la correlazione precedente (equazione di Washburn) è possibile esprimere sullo stesso grafico il volume di mercurio intruso (riferito per esempio a 100 g di materiale) in funzione del diametro dei pori *d* (in µm). In questo modo è possibile conoscere quale è il volume di mercurio penetrato (e quindi di pori presenti) fino ad una certa pressione *P*, oppure fino ad un certo diametro dei pori.
La curva che si ottiene rappresenta il volume cumulativo dei pori presenti fino ad un certo diametro. Il volume totale di mercurio intruso al massimo della pressione applicabile con lo strumento rappresenta il volume totale dei pori. La forma della curva ed in particolare il suo flesso indicano come sono distribuiti i pori: il diametro dei pori corrispondente al flesso indica la dimensione dei pori più frequente.
La porosimetria a mercurio è particolarmente indicata per valutare la distribuzione dei pori aventi dimensione compresa fra centesimi e centinaia di µm.

4.2.6 PROVE DI ASSORBIMENTO D'ACQUA PER CAPILLARITÀ CON IL METODO DEL TUBO DI KARSTEN

Per determinare le proprietà di assorbimento d'acqua per capillarità con il metodo del tubo di Karsten si è seguita la normativa UNI EN 16302:2013 [34] "Conservation of cultural heritage - Test methods - Measurement of water absorption by pipe method" e si è fatto riferimento alle raccomandazioni RILEM II.4 [35], agli studi sperimentali di Vandervoorde et al. [36] e di Mattone et al. [37].

Il metodo del tubo di Karsten è una tecnica non-distruttiva basata su misurazioni in situ dell'assorbimento di acqua dei materiali porosi e nel caso in esame è stato valutato per intonaci applicati su supporti di terra cruda. Tale metodo è stato utilizzato per valutare l'efficacia nell'utilizzo delle nanoparticelle nel rendere l'intonaco impermeabile all'acqua.
Un'importante caratteristica di questo metodo è la simulazione della pioggia battente, una pressione che potrebbe essere capace di eliminare temporaneamente l'effetto idrorepellente di un materiale trattato.
La prova consiste nell'applicare il tubo di Karsten sul campione, immettervi l'acqua fino al livello "0" ed effettuare letture di assorbimento dell'acqua ogni minuto per una durata di 15 minuti. Dopodiché, per ogni lettura viene calcolato l'assorbimento per unità di area e secondo le raccomandazioni RILEM II.4 la velocità di assorbimento utilizzando le letture a 5 e a 15

minuti. Per ogni tipologia di intonaco si riportano graficamente i valori di assorbimento in funzione del tempo.

Strumenti utilizzati:

- Tubo di Karsten è un tubo di vetro graduato, con le graduazioni che vanno da 0 a 4 ml, divise in sotto-graduazioni da 0.1 ml. La colonna d'acqua ha un'altezza di 9.2 cm misurata dall'inizio delle graduazioni fino al centro del corpo cilindrico orizzontale, esercitando una pressione sulla superficie del campione (intonaco o muro) di 902.52 Pa. Questa pressione corrisponde a quella esercitata dalla pioggia spinta da un vento di 140 km/h. L'area interna del corpo cilindrico orizzontale corrisponde all'area di contatto dell'acqua nella pipetta con il campione ed è pari a 5 cm^2;
- Mastice modellabile, utilizzato per attaccare e sigillare il tubo di Karsten alla superficie del campione.

Provini:

I campioni di intonaco che sono stati sottoposti alle prove di assorbimento d'acqua per capillarità sono stati quelli applicati sui muretti in terra cruda. In totale sono stati analizzati 3 campioni (CA, CC, CL) e per ognuno di questi si è eseguita la prova in due punti differenti.
Le prove sono state effettuate dopo aver atteso il tempo necessario per completare la stagionatura di 28 giorni.
Le caratteristiche materiche dei provini sperimentati e la preparazione delle malte sono descritte nella sezione di questa tesi relativa ai Materiali.
Si ricorda che ciascun campione ha una superficie di 25 cm x 25 cm ed è costituito da un unico strato di spessore pari a 2 cm.

Procedimento:

Il procedimento può essere riassunto nelle seguenti fasi:

- Applicazione del tubo di Karsten sulla superficie del campione, utilizzando il mastice per attaccare e sigillare, facendo attenzione che il mastice non si espanda dentro il tubo in modo da non ridurre l'area di contatto;
- Riempimento della pipetta fino al livello "0" con acqua demineralizzata;

- Esecuzione delle letture di assorbimento dell'acqua ogni minuto per una durata di 15 minuti;
- Calcolo dell'assorbimento per unità di area per ogni minuto;
- Rappresentazione a livello di grafico dei valori di assorbimento in funzione del tempo;
- Calcolo della velocità di assorbimento utilizzando le letture a 5 e a 15 minuti.

a. Applicazione della pipetta sulla superficie dell'intonaco

b. Riempimento della pipetta fino al livello "0" con acqua

Fig. 4.18: Prove di assorbimento d'acqua per capillarità con il metodo del tubo di Karsten

Il calcolo parametri è riportato in seguito:

- Considerando che ad ogni lettura si legge l'entità del volume d'acqua assorbito per capillarità V_i, la massa d'acqua assorbita m_i al tempo di lettura t_i viene calcolata come:

$$m_i = \rho_w \cdot V_i \text{ (g)}$$

dove:

ρ_w è la densità dell'acqua demineralizzata (= 1 g/cm^3).

-L'assorbimento per unità di area, Q_i, al tempo di lettura t_i è espresso come:

$$Q_i = m_i / A \text{ (g/m}^2\text{)}$$

dove:

A è l'area di contatto tra acqua nel tubo e superficie del campione (m^2).

-La velocità di assorbimento o coefficiente di assorbimento, $C_{KB10min}$, viene calcolato secondo le raccomandazioni RILEM II.4:

$$C_{KB10min} = \frac{(m_{15min} - m_{5min})}{A \cdot t_{10min}} \left(\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{m^2 \cdot s}}\right)$$

dove:

m_{15min} è la massa d'acqua assorbita dopo 15 minuti (g);

m_{15min} è la massa d'acqua assorbita dopo 5 minuti (g);

A è l'area di contatto tra acqua nel tubo e superficie del campione (m^2);

t_{10min} equivale a 10 minuti (s).

4.2.7 PROVE DI CONDUCIBILITÀ TERMICA

Per eseguire le prove di conducibilità termica si è fatto riferimento alle specifiche delle normative:

- ISO 8301:1991 [38] *"Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus"*;
- UNI EN 12664:2002 [39] *"Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Dry and moist products of medium and low thermal resistance";*
- UNI EN 12667:2002 [40] *"Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Product of high and medium thermal resistance"*;

Lo scopo di tali prove è quello di valutare l'efficacia degli additivi a rendere l'intonaco isolante dal punto di vista termico, misurando il flusso termico medio scambiato in regime stazionario.

La misura della conducibilità termica del campione di prova si ottiene inserendolo nel mezzo di due bagni termostatici con temperature diverse T_A e T_B.
Per calcolare la quantità di calore scambiato si inseriscono fra i bagni termostatici ed il provino due termoflussimetri.

Con un'adeguata scala sullo strumento si può leggere il flusso termico da un dispositivo elettronico collegato. Si hanno quindi due valori di flusso, entrante ed uscente, ossia uno per ogni termoflussimetro, i quali vengono mediati per ottenere maggior precisione.
Ipotizzando la resistenza termica dei termoflussimetri trascurabile rispetto a quella del campione e trascurando gli effetti di bordo si ha:

$$q = \frac{\lambda}{s} (T_A - T_B)$$

dove:
q è la densità del flusso di calore misurato dai termoflussimetri, perciò si può ricavare il coefficiente λ della conducibilità termica.

La metodologia presa in esame e applicata sperimentalmente è il "metodo del termoflussimetro" ed è stata utilizzata per testare tre tipologie di malte (CA, CC e CL) a seguito di invecchiamento artificiale di 30 giorni in laboratorio.

Strumenti utilizzati:
In conformità delle normative precedentemente elencate, per lo svolgimento delle prove di conducibilità con il "metodo del termoflussimetro" si sono utilizzati:

- Termoflussimetri HFP01 Hukseflux: sono state utilizzate due piastre flussimetriche HFP01 in materiale ceramico-plastico (garantiscono bassa resistenza termica), con il compito di misurare il flusso di calore che attraversa il provino su cui sono applicate;
- Termoflussimetri mirco-foil heat flux sensor RDF: sono termoflussimetri che non hanno piastre e materiali che costituiscono una superficie di un determinato spessore che il flusso termico deve oltrepassare, ma i fili terminano e si connettono in un sottile foglio;
- Bagno termostatico LAUDA RC20: è costituito da una vasca in acciaio inossidabile che contiene acqua termostata ed è collegato a delle piastre in cui il liquido viene mandato attraverso una pompa ed attraversandole rimane costante. La temperatura del liquido può essere impostata e controllata attraverso un dispositivo collegato. Se ne usano due;
- Schede di acquisizione National Instruments.

Software utilizzati:

- Labview 8.5: è l'ambiente di sviluppo integrato per il linguaggio di programmazione visual di National Instruments. Il linguaggio di programmazione (Programmazione G) ha una forma grafica, la definizione di strutture dati e algoritmi, gli elementi della programmazione, sono rappresentati da icone ed altri oggetti grafici uniti da linee di collegamento. Tale linguaggio è definito data flow poiché la sequenza di esecuzione è definita e rappresentata dal flusso di dati stessi collegati da fili monodirezionali;
- Microsoft Excel: è stato associato a Labview per salvare i dati rilevati in tabelle con campi reimpostati.

Provini:

Per tutte le tipologie di malta (CAA, CCA e CLA) si sono realizzati campioni con dimensioni di 30 cm x 30 cm x 3 cm. Tali campioni sono stati sottoposti a queste prove in seguito a invecchiamento artificiale per 30 giorni.

Le caratteristiche materiche dei provini sperimentati e la preparazione delle malte sono descritte nella sezione di questa tesi relativa ai Materiali.

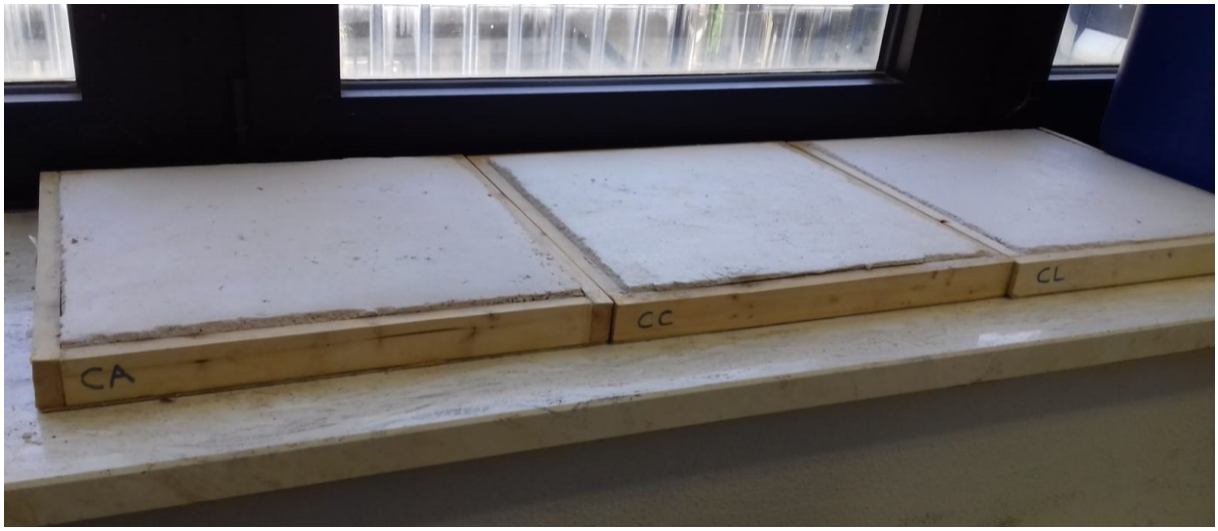


Fig. 4.19: Provini invecchiati da sottoporre alla prova di conducibilità

Questo test viene accreditato come prova di valutazione in cui le dimensioni e le caratteristiche di trasmissione del calore sono note.

Per eseguire il rilievo dei valori termici del campione, in particolare le temperature superficiali e il flusso termico, inizialmente sono stati posizionati simmetricamente dei sensori di rilevamento, eseguendo ed impostando la configurazione di prova secondo la normativa UNI EN 12667:2002 [40] per il "metodo dei temoflussimetri", per la configurazione simmetrica a provino singolo.

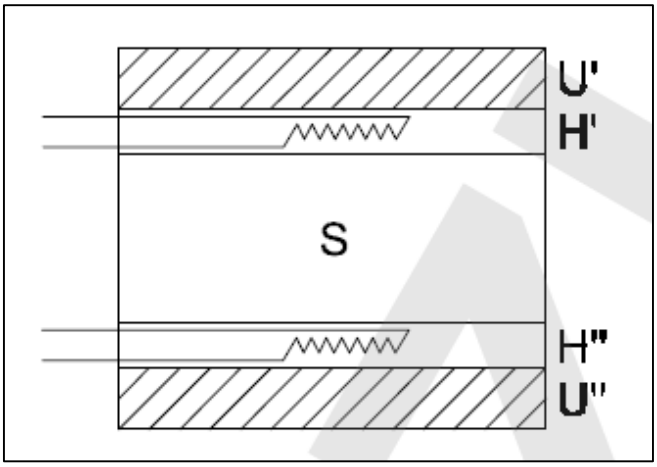


Fig. 4.20: Metodo dei termoflussimetri [40]

dove:

U', U'': unità di riscaldamento e raffreddamento;

H', H'': termo flussimetri;

S: provino.

Prova:

- Viene posizionata la lastra inferiore di materiale isolante (PE);
- Viene posizionata la piastra fredda, che lavora a una temperatura di 12°C;
- Viene posizionato il primo termoflussimetro attaccato a un foglio trasparente di materiale plastico conduttivo;
- Viene posizionato il campione di intonaco dello spessore di 3 cm;

- Il campione viene rivestito lateralmente con lana di roccia che funge da isolante e il flusso termico sia unidirezionale;
- Viene posizionato il secondo termoflussimetro attaccato a un foglio trasparente di materiale plastico conduttivo;
- Viene posizionata la piastra calda, che lavora a una temperatura di 25°C;
- Viene posizionata la lastra superiore di materiale isolante (PE);
- Vengono accesi e portati alla temperatura di set-point i due bagni termostatici collegati alle piastre;
- Quando entrambe le piastre hanno raggiunto la temperatura di prova viene avviato il sistema che legge attraverso i termoflussimetri il calore scmbiato e conoscendo lo spessore del campione arriva a determinarne la conducibilità.

$$q = \frac{\lambda}{s}\,(T_A - T_B) \;\rightarrow\; R = \frac{\Delta T}{q} \;\rightarrow\; \lambda = \frac{s}{R} \;\rightarrow\; \lambda = \frac{(s \cdot q)}{\Delta T}$$

dove:

s è lo spessore del campione [m],

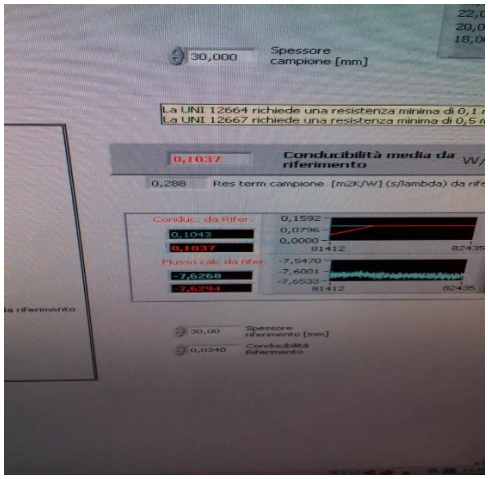
λ è la conducibilità termica del materiale [W/mK],

q è la densità del flusso di calore dai termoflussimetri [W/m^2],

ΔT è la differenza di temperatura tra le due superfici del materiale [K];

- La misurazione del flusso termico e quindi della conducibilità non è un processo istantaneo, ma si osserva che impiega del tempo per stabilizzarsi attorno a un valore, nel nostro caso trattandosi di un materiale conduttivo, con 18 ore si è arrivati a leggere un valore stabile.

1. Sistema in funzione



2. Lettura del valore della conducibilità

Fig. 4.21: Misura della conducibilità termica

4.2.8 PROVE DI EROSIONE CON IL METODO A SPRUZZO

Per determinare l'efficacia degli intonaci dal punto di vista della resistenza all'erosione da parte dell'acqua e di conseguenza l'effetto ottenuto aggiungendo gli additivi, si è fatto riferimento alla normativa neozelandese "New Zealand Standards, NZS 4298:1998, Materials and workmanship for earth buildings" [41]. Di questa norma in particolare ci si è basati su "Appendice D" in cui viene regolata la prova di erosione con il metodo *Pressure Spray* (a spruzzo).

Con questo metodo si riesce ad avere informazioni sulle caratteristiche di resistenza all'acqua dei diversi materiali studiati per mezzo di un indice di erosione. Tali indici, ottenuti dai diversi tipi di intonaci che sono stati realizzati possono essere oggetto di confronto.

Per le prove di erosione a spruzzo si è fatto riferimento anche all'esperienza di Mattone et al. [37] in cui si sono valutate le prestazioni di intonaci in terra stabilizzati con il gesso (con e senza trattamenti protettivi) e alla ricerca di Stazi et al. [1], basata sempre su intonaci in terra consolidati con materiali naturali sia in massa che superficialmente.

Con la suddetta prova si intende determinare l'erosione subita da una superficie simulando l'azione esercitata dalla pioggia battente, riprodotta mediante lo spruzzo, il quale riesce a simulare le condizioni reali dandoci informazioni molto approfondite.

In merito alle prescrizioni della normativa neozelandese NZS 4298:1998, la conduzione di tale prova prevede la misurazione dell'erosione dovuta all'azione prodotta da un getto d'acqua che viene proiettato da una distanza di 470 mm a una pressione pari a 0,5 bar. Il test ha la durata massima di un'ora, o fino a completa erosione del campione, e viene interrotto a intervalli regolari di 15 minuti per consentire la valutazione dell'entità dell'erosione.

Strumenti utilizzati:

- Sistema assemblato in grado di spruzzare acqua ad una pressione pari a 0.5 bar costituito da:
    - Tubo flessibile in PVC da ½", raccordato al rubinetto del laboratorio;
    - Raccordo rapido e pesa rubinetto in plastica;
    - Valvola, nel nostro caso un rubinetto antigelo, che viene usata per aprire, chiudere e regolare la pressione;
    - Manometro con attacco maschio da ¼";
    - Raccordi idraulici di metallo: raccordo a T femmina da ½" pollice, riduzione maschio femmina ½"- 3/8", riduzione maschio femmina 3/8"- 1/4", barilotto con doppio filetto da ½";
    - Ugello, che nel nostro caso è costituito da un soffione doccia che pur differenziandosi dal tipo di ugello previsto dalla normativa è il più simile che si è trovato in commercio;
- Mattoni di sostegno al sistema di erogazione dell'acqua;
- Schermo con foro da 15 cm di diametro, costituito da telo di plastica;
- Silicone;
- Strumento di misura della profondità di erosione, che secondo la normativa NZS deve essere una sonda cilindrica con diametro di testa pari a 10 mm, ma nel nostro caso si utilizza il calibro.

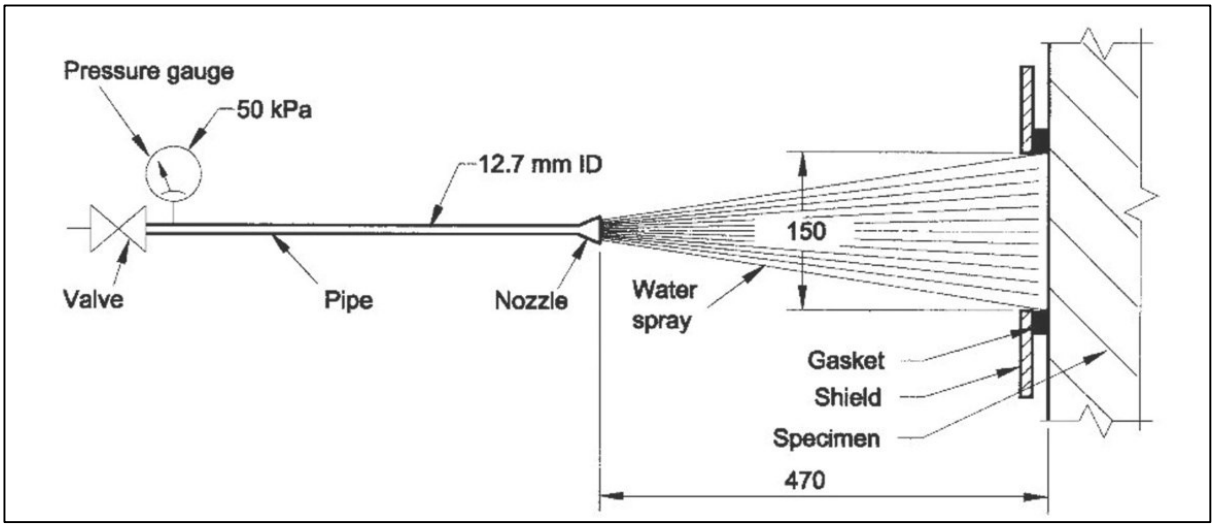


Fig. 4.22: Schema di prova [41]

Provini:

Le prove sono state effettuate dopo aver atteso il tempo necessario per completare l'invecchiamento di 30 giorni.

Si ricorda infine che ciascun campione ha una superficie di 25 cm x 25 cm ed è costituito da un unico strato di spessore pari a 2 cm.

Si è analizzato un campione di intonaco per ogni formulazione, per un totale di 3 campioni (CA, CC e CL).

Procedimento:

Il procedimento può essere riassunto nelle seguenti fasi:

- Attesa di un periodo di invecchiamento dei campioni per 30 giorni;
- Assemblaggio del sistema di erogazione dell'acqua, come nello schema di Fig. 4.;
- Individuazione della superficie circolare di spruzzo sull'intonaco tramite un balaustrone;
- Applicazione del silicone lungo il bordo del cerchio individuato;
- Fissaggio dello schermo con foro circolare, che viene premuto contro il silicone;
- Attesa del tempo di asciugatura del silicone;
- Sistemazione della struttura di sostegno per il sistema di erogazione dell'acqua;

- Esecuzione della prova di spruzzo, con getto d'acqua proiettato da una distanza di 470 mm a una pressione pari a 0.5 bar. La prova ha la durata massima di un'ora, o fino a completa erosione del campione;
- Misura della profondità di erosione "*D*" del campione a intervalli regolari di 15 minuti;
- Assegnazione di un indice di erosione "*I*" come nella tabella successiva;
-

PROPRIETÀ	CRITERI	INDICE DI EROSIONE
Velocità di erosione D' (mm/h)	$0 \leq D' < 20$	1
	$20 \leq D' < 50$	2
	$50 \leq D' < 90$	3
	$90 \leq D' < 120$	4
	$D' \geq 120$	5

Tab. 4.1: Indice di erosione della prova di erosione secondo il metodo Pressure Spray [41]

.

Ritaglio del telo per realizzare il foro

2

Applicazione del telo sull'intonaco con il silicone

Sistema di spruzzo

Getto spruzzato contro la superficie

Fig. 4.23: Fasi salienti dell'esecuzione delle prove di erosione con il metodo a spruzzo

5 RISULTATI

Lo scopo di questa tesi è valutare il comportamento degli intonaci sottoposti a invecchiamento artificiale e di confrontarne i risultati con il comportamento degli stessi non invecchiati ottenuti dal lavoro di tesi precedente del collega.

Pertanto vengono indicati sia i risultati dei campioni non invecchiati che i risultati dei campioni sottoposti ad invecchiamento artificiale.

5.1 ANALISI PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLE MALTE MEDIANTE MICROSCOPIA ELETTRONICA A SCANSIONE (SEM)

Lo scopo di queste analisi è duplice:

- Valutare come varia la microstruttura del materiale dopo l'invecchiamento (forma/morfologia delle particelle) se si aggiungono nanoparticelle in massa;
- Valutare in maniera qualitativa la dimensione dei pori sulla base dei vuoti che si vedono.

Criteri di valutazione:

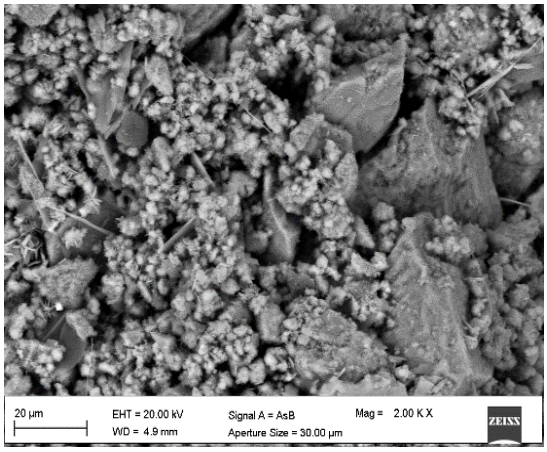
Le analisi per la caratterizzazione delle malte mediante il SEM permettono di valutare, osservando le immagini ottenute al microscopio, se la malta da intonaco presenta una microstruttura più omogenea o eterogenea, caratterizzata da zone con vuoti e altre con particelle più dense e compatte.

In questo modo, si riesce a capire dal punto di vista qualitativo come varia la distribuzione dei pori se vengono aggiunte nanoparticelle in massa nell'intonaco.

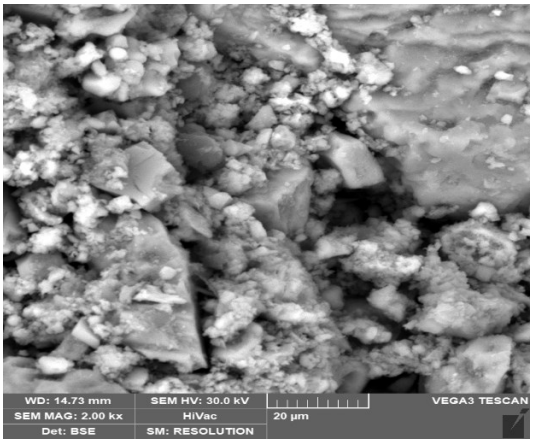
Il valore quantitativo viene riportato con le successive analisi porosimetriche a mercurio.

Si sono ottenute immagini prima e dopo l'invecchiamento, con diversi ingrandimenti (1000, 2000, 3000, 5000 X).

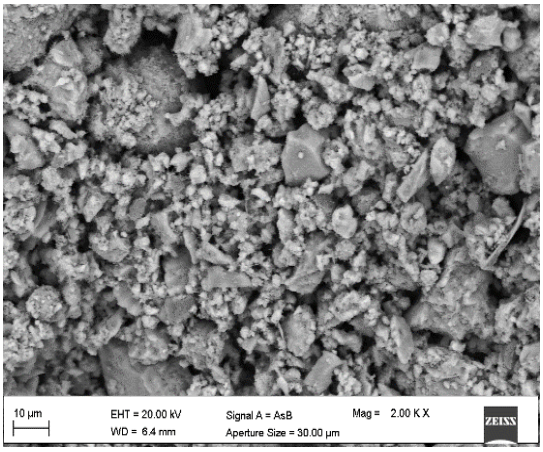
Le immagini sono state ottenute in tempi differenti e con microscopi elettroni diversi, quindi sono state combinate non solo in base all'ingrandimento effettuato, ma anche in base alla resa grafica.



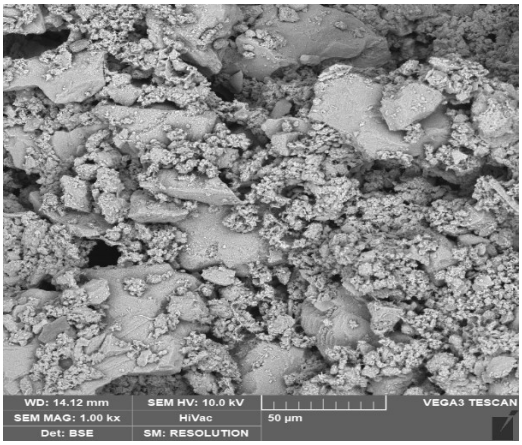
CA



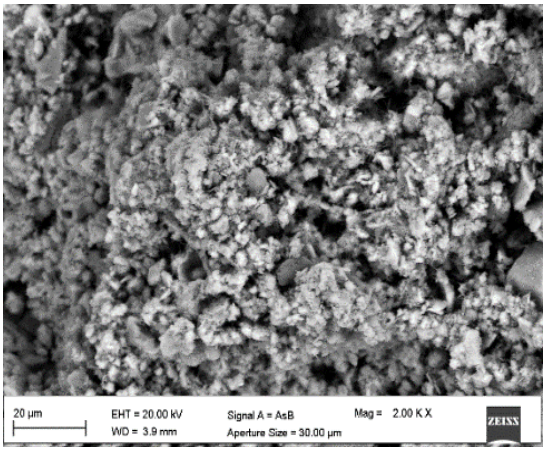
CAA



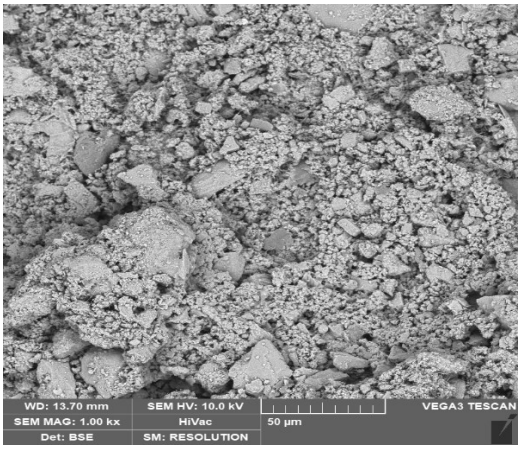
CC



CCA

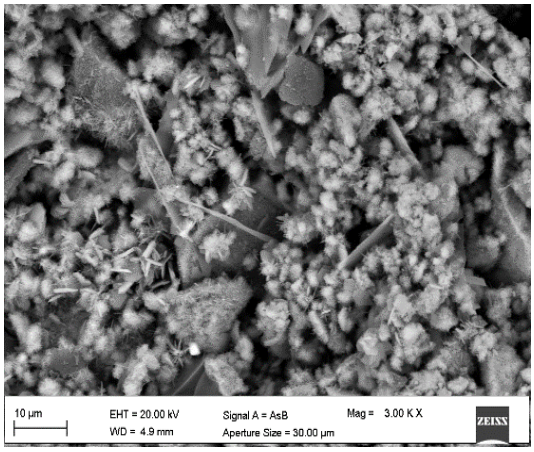


CL

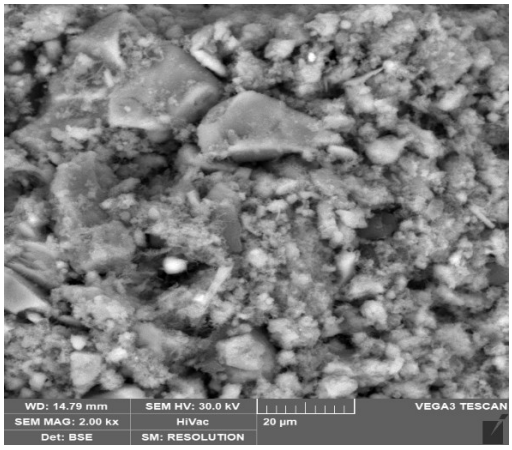


CLA

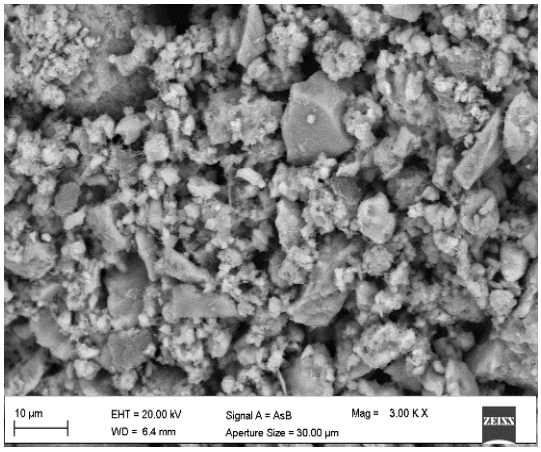
Fig.5.1: Immagini di confronto al microscopio elettronico a scansione



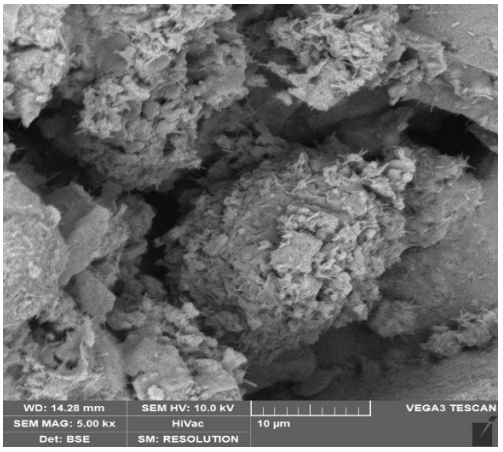
CA



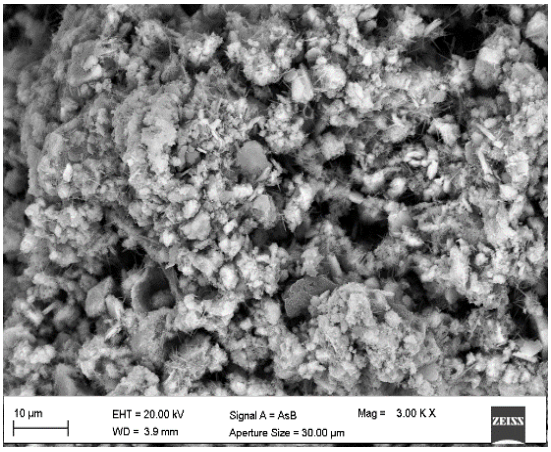
CAA



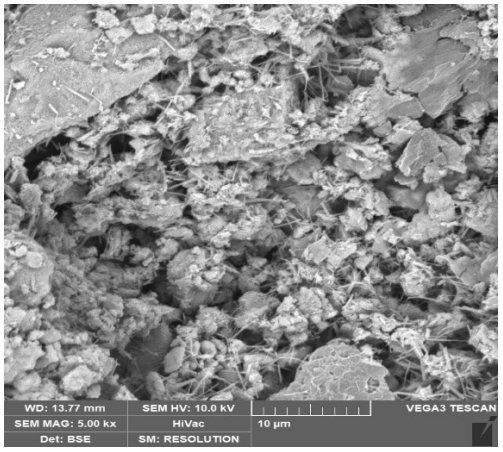
CC



CCA



CL



CLA

Fig.5.2: Immagini di confronto al microscopio elettronico a scansione

Si evidenzia che l'invecchiamento ha un effetto sulla microstruttura dei provini e si rimanda al capitolo "Dicussione" per approfondimenti.

5.2 PROVE DI TAGLIO PER LA VALUTAZIONE DELL'ADERENZA AL SUPPORTO

Lo scopo di queste prove è molteplice:

- Osservare come varia l'aderenza al supporto al variare della formulazione dell'intonaco;
- Convalidare le formulazioni che possiedono un'aderenza al supporto sufficientemente elevata.

Criteri di valutazione:

Nel caso in questione deve avere un'aderenza tale da resistere ad una forza di taglio pari a 10 volte il peso proprio dell'intonaco (confronto in termini di tensioni tangenziali, deve essere verificato che la $\tau_{max} > \tau_{amm} = 10 \text{ x } 20 \text{ mm x } 1.4 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3 \text{ x } 10 \text{ N/kg} = 3 \text{ kPa}$).

Più elevata è la resistenza a taglio, più elevata è la valutazione.

In seguito si riportano le tabelle e i grafici dei risultati dei campioni pre e post invecchiamento:

Pre invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo del campione	Massa di rottura M_f [kg]	Accelerazione di gravità g [m/s^2]	Superficie del campione S [mm^2]	Resistenza a taglio τ_{max} [kPa]
Biocalce	CA1	40.12	9.81	2000	197
	CA2	39.37			193
	CA3	40.48			199
	CA4	41.21			202
	CA5	40.12			197
Biocalce + Nanoclay	CC1	35.12	9.81	2000	172
	CC2	35.88			176
	CC3	36.24			178
	CC4	36.24			178
	CC5	35.48			174
Biocalce + Nanolime + etanolo	CL1	35.48	9.81	2000	174
	CL2	35.88			176
	CL3	35.12			172
	CL4	34.24			168
	CL5	35.88			176

Tab. 5.1: Valori di resistenza a taglio [kPa]dei campioni non invecchiati

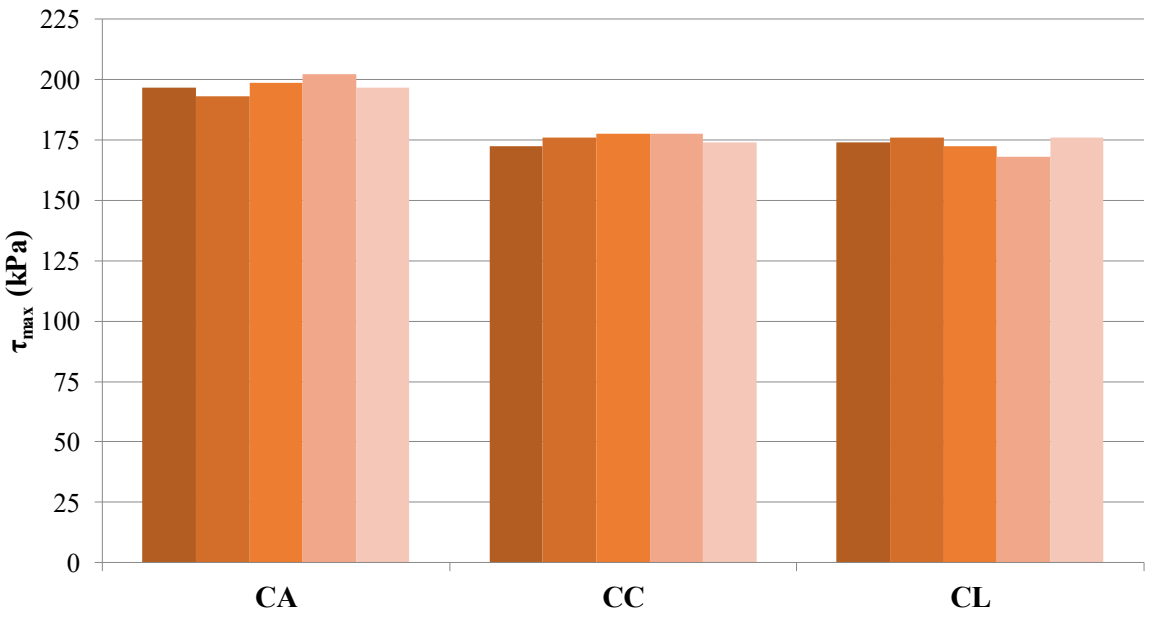


Fig. 5.1: Valori di resistenza a taglio [kPa] in funzione delle diverse tipologie di intonaci dei campioni non invecchiati

Post invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo del campione	Massa di rottura M_f [kg]	Accelerazione di gravità g [m/s^2]	Superficie del campione S [mm^2]	Resistenza a taglio τ_{max} [kPa]
Biocalce	CAA1	38.63	9.81	2000	189
	CAA2	35.41			178
	CAA3	3876			190
	CAA4	36.21			177
	CAA5	34.63			169
Biocalce + Nanoclay	CCA1	8.41	9.81	2000	41
	CCA2	10.32			50
	CCA3	8.65			42
	CCA4	11.61			56
	CCA5	12.42			61
Biocalce + Nanolime + etanolo	CLA1	9.21	9.81	2000	45
	CLA2	12.56			61
	CLA3	11.31			55
	CLA4	11.73			57
	CLA5	11.43			56

Tab. 5.1: Valori di resistenza a taglio [kPa] dei campioni invecchiati

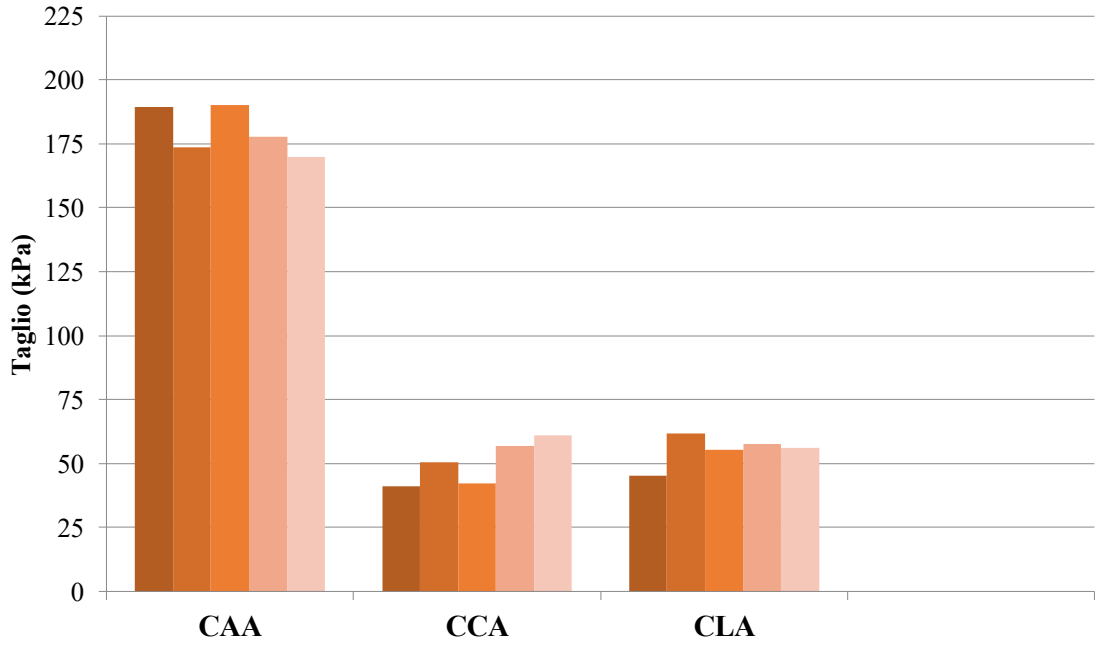


Fig. 5.4: Valori di resistenza a taglio [kPa] in funzione delle diverse tipologie di intonaci dei campioni invecchiati

Fig. 5.5: Stato di una parte degli intonaci a seguito delle prove di taglio per la valutazione dell'aderenza al supporto

Resistenza media a taglio $\tau_{max,med}$ (kPa)		
Tipologia intonaco	Valore	Deviazione standard
CA	197	3
CC	176	2
CL	173	3

Tab. 5.3: Valori medi di resistenza a taglio [kPa] e deviazione standard dei campioni non invecchiati

Resistenza media a taglio $\tau_{max,med}$ (kPa)		
Tipologia intonaco	Valore	Deviazione standard
CAA	180	9
CCA	50	8
CLA	55	6

Tab. 5.4: Valori medi di resistenza a taglio [kPa] e deviazione standard dei campioni invecchiati

Confrontando i dati prima e dopo l'invecchiamento, è evidente come l'aggiunta di Nanoclay e Nanolime determina un peggioramento della resistenza a taglio dopo l'invecchiamento, un'analisi più approfondita è svolta nel capitolo "Discussione".

5.3 PROVE A STRAPPO PER VALUTARE L'ADERENZA AL SUPPORTO

Lo scopo di tali prove è stato quello di determinare la forza di aderenza tra malta da intonaco esterno ed il supporto costituito dai bocchi krioton in terra cruda. Tale forza di aderenza è stata determinata come lo sforzo massimo di trazione applicato mediante un carico diretto perpendicolare alla superficie della malta da intonaco esterno sul supporto, per mezzo di piastre con teste di trazione incollate all'area di prova della superficie delle malte.
La forza di aderenza f_u in N/mm^2 è il quoziente tra il carico di rottura e l'area di prova.
In sintesi, lo scopo di queste prove è molteplice:

- Osservare come varia l'aderenza al supporto al variare della formulazione dell'intonaco;
- Convalidare le formulazioni che possiedono un'aderenza al supporto sufficientemente elevata.

Criteri di valutazione:
Un intonaco a base di biocalce è di qualità meccanica accettabile se l'intonaco ha un legame di aderenza abbastanza efficace con il supporto (≥ 0.2 N/mm^2, dalla scheda tecnica della biocalce).

In seguito si riportano le tabelle e i grafici dei risultati delle prove fatte pre e post invecchiamento:

Pre invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo del campione	Area dei provini A [mm^2]	Carico di rottura F_u [N]	Forza di aderenza f_u [N/mm^2]
Biocalce	CA1	1963	444	0.23
	CA2		450	0.23
	CA3		487	0.25
	CA4		453	0.23
	CA5		491	0.25
Biocalce + Nanoclay	CC1	1963	357	0.18
	CC2		345	0.18
	CC3		338	0.17
	CC4		327	0.17
	CC5		364	0.19
Biocalce + Nanolime + etanolo	CL1	1963	307	0.16
	CL2		315	0.16
	CL3		280	0.15
	CL4		277	0.16
	CL5		295	0.15

Tab. 5.5: Valori della forza di aderenza [N/mm^2] degli intonaci applicati sul supporto in terra cruda pre invecchiamento

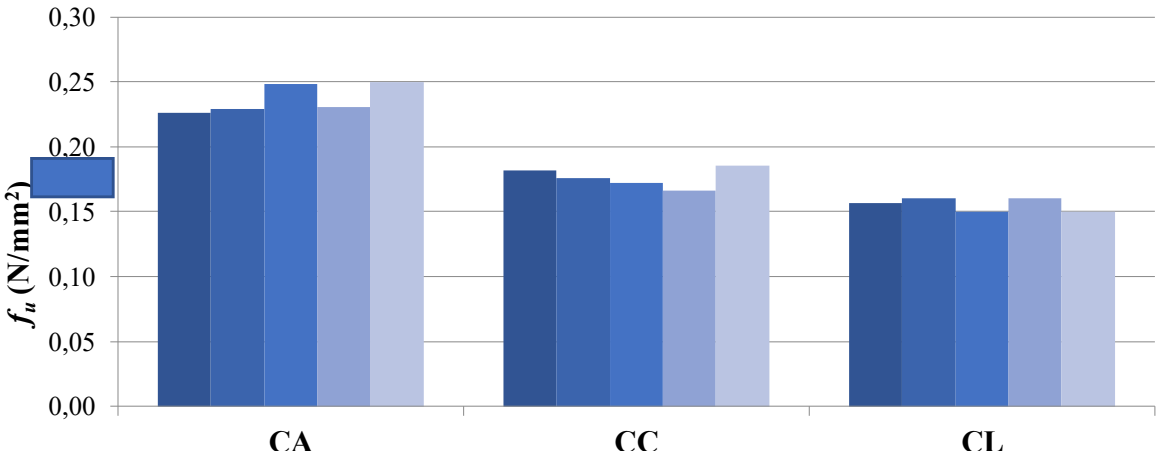


Fig. 5.6: Valori della forza di aderenza [N/mm^2] in funzione dei diversi tipi di intonaci pre invecchiamento

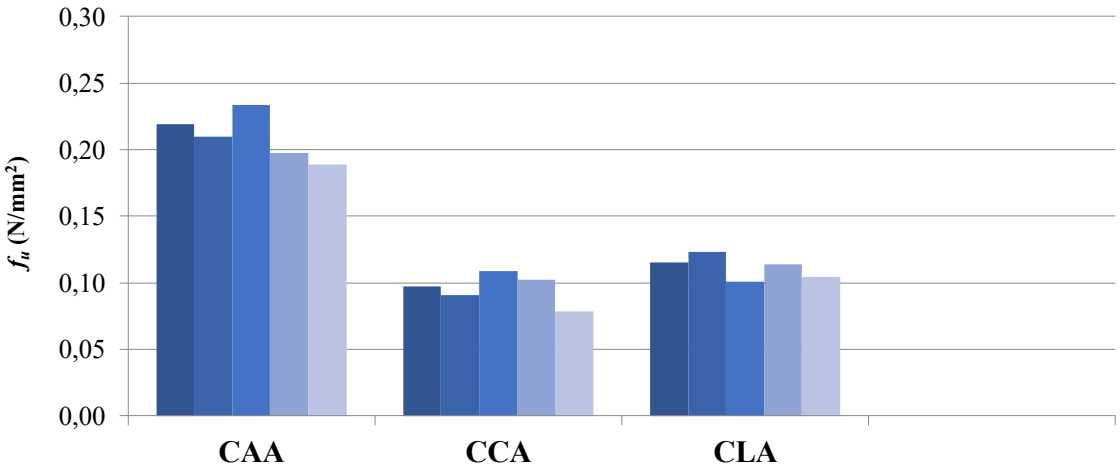
Resistenza media a trazione $f_{u,medio}$ [N/mm^2]		
Tipologia intonaco	Valore	Deviazione standard
CA	0.24	0.01
CC	0.18	0.01
CL	0.16	0.01

Tab. 5.6: Valori medi di resistenza a trazione [N/mm^2] e deviazione standard dei campioni non invecchiati

Post invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo del campione	Area dei provini A [mm^2]	Carico di rottura F_u [N]	Forza di aderenza f_u [N/mm^2]
Biocalce	CAA1	1963	430	0,22
	CAA2		411	0.21
	CAA3		458	0.23
	CAA4		388	0.20
	CAA5		370	0.19
Biocalce + Nanoclay	CCA1	1963	190	0.09
	CCA2		178	0.09
	CCA3		213	0.11
	CCA4		201	0.10
	CCA5		154	0.08
Biocalce + Nanolime + etanolo	CLA1	1963	226	0.11
	CLA2		241	0.12
	CLA3		198	0.10
	CLA4		223	0.11
	CLA5		205	0.10

Tab. 5.6: Valori della forza di aderenza [N/mm^2] degli intonaci applicati sul supporto in terra cruda pre invecchiamento



. Fig. 5.7: Valori della forza di aderenza [N/mm^2] in funzione dei diversi tipi di intonaci post invecchiamento

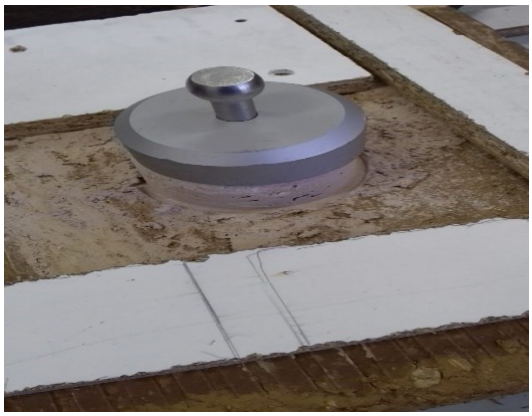
Resistenza media a trazione $f_{u,medio}$ [N/mm^2]		
Tipologia intonaco	Valore	Deviazione standard
CA	0.21	0.01
CC	0.09	0.01
CL	0.11	0.01

Tab. 5.7: Valori medi di resistenza a trazione [N/mm^2] e deviazione standard dei campioni invecchiati.

a. Esempio di rottura all'interfaccia supporto-intonaco CA

b. Esempio di rottura all'interfaccia supporto-intonaco CC

c. Macchina di carico.



d. Piastra circolare di aggrappo.

Fig. 5.8: Fasi della prova pull-off

Confrontando i dati prima e dopo l'invecchiamento, è evidente come l'aggiunta di Nanoclay e Nanolime determina un peggioramento della resistenza a strappo dopo l'invecchiamento, un'analisi più approfondita è svolta nel capitolo "Discussione".

5.4 DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO DINAMICO E PROVE DI FLESSIONE E COMPRESSIONE

La conduzione di tali prove sui medesimi provini di malta induriti può essere suddivisa in tre fasi distinte sulla base dello scopo da raggiungere:

- Determinazione preliminare del modulo elastico dinamico delle malte da intonaco;
- Determinazione della resistenza a flessione delle malte da intonaco;
- Determinazione della resistenza a compressione delle malte da intonaco.

Tuttavia, lo scopo comune di tali prove è quello di valutare l'efficacia degli additivi a rendere migliore l'intonaco dal punto di vista meccanico.

Criteri di valutazione:

Rilevamento degli ultrasuoni e determinazione del modulo elastico dinamico:
Il modulo elastico dinamico è determinato utilizzando il Pundit, partendo dal tempo di attraversamento *t* degli ultrasuoni dalla sonda emittente a quella ricevente dell'impulso nei campioni di malta indurita preparati in stampi.
Uno strato di intonaco si ritira (o dilata) rispetto alla muratura e si creano delle sollecitazioni di trazione (o compressione) nell'intonaco che sono proporzionali al suo modulo elastico dovuti al ritiro (o alla dilatazione) impedito. Questi fenomeni portano alla fessurazione e alla delaminazione. Per evitarli è necessario che tra l'intonaco ed il supporto vi sia una certa compatibilità meccanica. Il modulo elastico dell'intonaco deve essere simile (o meglio, inferiore) a quello della muratura costituita da blocchi krioton in terra cruda, in modo che le sollecitazioni vengono sopportate dalla muratura, avente rigidità maggiore.

Determinazione della resistenza a flessione:
La resistenza a flessione della malta è determinata mediante l'applicazione di un carico su tre punti dei provini di malta indurita preparati in stampi fino a rottura (si ottiene il carico massimo applicato in N).

Determinazione della resistenza a compressione:

La resistenza a compressione della malta è determinata sulle due parti ottenute dalla prova di resistenza a flessione. Tale resistenza si ottiene partendo dal carico massimo applicato in N.

Un intonaco a base di biocalce è di qualità meccanica accettabile se ha una resistenza a compressione a 28 giorni di stagionatura compresa tra 1.5 N/mm^2 e 5.0 N/mm^2 (si considera la UNI EN 998-1:2016 [43]) e rientra in categoria *CS II* (Tab.), come riportato nella scheda tecnica della biocalce.

Proprietà	Categorie	Valori
Intervallo di resistenza a compressione a 28 d	*CS I*	Da 0.4 N/mm^2 a 2.5 N/mm^2
	CS II	Da 1.5 N/mm^2 a 5.0 N/mm^2
	CS III	Da 3.5 N/mm^2 a 7.5 N/mm^2
	CS IV	≥ 6.0 N/mm^2

Tab.5.8: Classificazione secondo la resistenza a compressione a 28 giorni di stagionatura delle malte indurite [43]

In seguito si riportano le tabelle ed il grafico dei risultati relativi al rilevamento degli ultrasuoni e determinazione del modulo elastico dinamico dei campioni pre invecchiamento e post invecchiamento:

Pre invecchiamento:

Tipologia di malta	Codice identificativo	Peso provino (kg)	Volume provino (cm^3)	Densità provino ρ (kg/cm^3)	Densità media ρ_{med} (kg/m^3)
Biocalce	CA1	0.4011	256	0.001566797	1580.86
	CA2	0.4042		0.001578906	
	CA3	0.4088		0.001596875	
Biocalce + Nanoclay	CC1	0.4384	256	0.001712500	1704.69
	CC2	0.4381		0.001711328	
	CC3	0.4327		0.001690234	
Biocalce + Nanolime + etanolo	CC1	0.4159	256	0.001624609	1634.24
	CL2	0.4135		0.001615234	
	CL3	0.4257		0.001662891	

Tab. 5.9: Determinazione delle densità medie delle malte da intonaco

Tipologia di malta	Codice identificativo	Tempo t (µs)	Tempo medio t_{med} (µs)	Lunghezza L (mm)	Velocità media V_{med} (m/s)	Densità media ρ_{med} (kg/m^3)	Modulo elastico (MPa)
Biocalce	CA1	103.8	104.5	160	1530.94	1580.86	3705
		104.2					
		104.4					
	CA2	104.9					
		104.3					
		105.0					
	CA3	104.7					
		104.3					
		105.0					
Biocalce + Nanoclay	CC1	135.4	133.7	160	1196.51	1704.69	2440
		135.1					
		134.9					
	CC2	133.8					
		134.2					
		133.7					
	CC3	132.0					
		132.1					
		132.3					
Biocalce + Nanolime + etanolo	CL1	121.3	123.0	160	1300.58	1634.24	2764
		122.2					
		122.5					
	CL2	123.3					
		123.4					
		123.8					
	CL3	123.3					
		123.8					
		123.6					

Tab. 5.10: Determinazione del modulo elastico dinamico [MPa] delle malte da intonaco pre invecchiamento

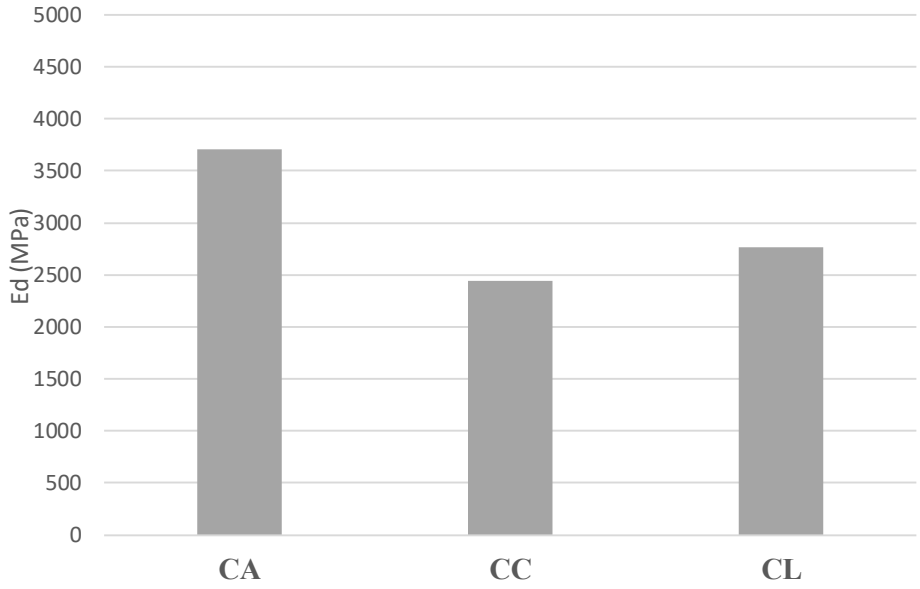


Fig. 5.10: Rappresentazione del modulo elastico pre invecchiamento

Post invecchiamento:

Tipologia di malta	Codice identificativo	Peso provino (kg)	Volume provino (cm^3)	Densità provino ρ (kg/cm^3)	Densità media ρ_{med} (kg/m^3)
Biocalce	CAA1	0.3985	256	0.001556641	1565.49
	CAA2	0.4036		0.001576563	
	CAA3	0.4002		0.001563281	
Biocalce + Nanoclay	CCA1	0.4358	256	0.001702344	1694.27
	CCA2	0.4310		0.001683594	
	CCA3	0.4344		0.001696875	
Biocalce + Nanolime + etanolo	CLA1	0.4113	256	0.001606641	1596.35
	CLA2	0.4029		0.001573828	
	CLA3	0.4118		0.001608594	

Tab. 5.11: Determinazione delle densità medie delle malte da intonaco

Tipologia di malta	Codice identificativo	Tempo t (µs)	Tempo medio t_{med} (µs)	Lunghezza L (mm)	Velocità media V_{med} (m/s)	Densità media ρ_{med} (kg/m^3)	Modulo elastico (MPa)
Biocalce	CAA1	117.8	119.4	160	1339.47	1565.49	2809
		117.6					
		117.1					
	CAA2	120.4					
		120.5					
		120.9					
	CAA3	120.1					
		119.8					
		121.0					
Biocalce + Nanoclay	CCA1	141.3	141.9	160	1127.84	1694.27	2155
		141.7					
		140.7					
	CCA2	141.5					
		141.4					
		141.8					
	CCA3	142.9					
		142.4					
		143.1					
Biocalce + Nanolime + etanolo	CLA1	136.4	136.4	160	1172.45	1596.35	2194
		135.8					
		136.1					
	CLA2	136.7					
		136.9					
		136.4					
	CLA3	137.1					
		136.3					
		136.5					

Tab. 5.12: Determinazione del modulo elastico dinamico [MPa] delle malte da intonaco post invecchiamento

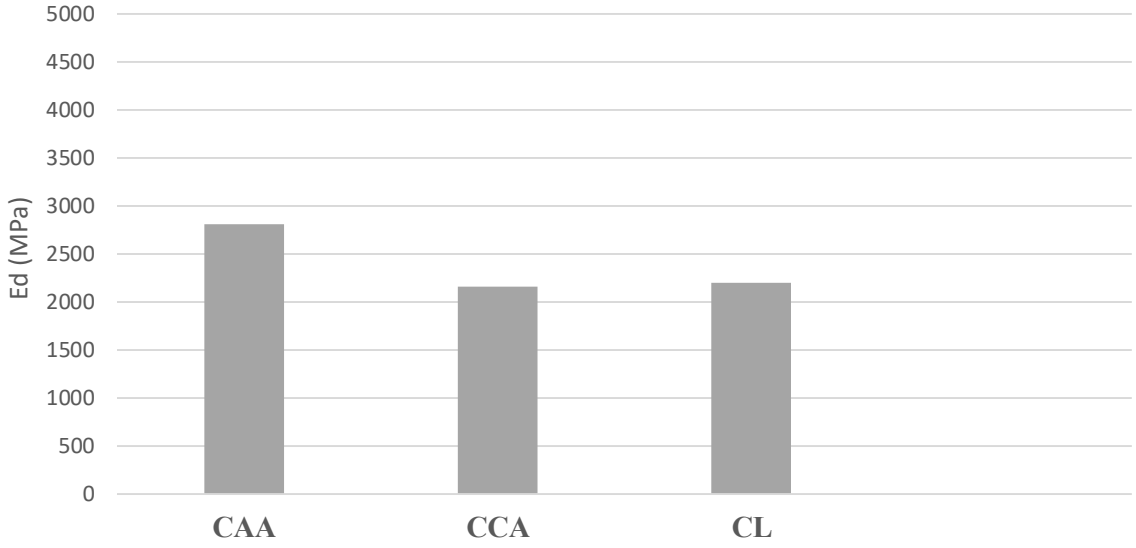


Fig. 5.11: Rappresentazione del modulo elastico post invecchiamento

In seguito si riportano le tabelle ed i grafici dei risultati relativi alla *determinazione della resistenza a flessione* prima e dopo l'invecchiamento:

Pre invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo del campione	Carico massimo F [N]	Resistenza a flessione f [N/mm^2]
Biocalce	CA1	690	1.62
	CA2	560	1.31
	CA3	740	1.73
Biocalce + Nanoclay	CC1	300	0.70
	CC2	370	0.87
	CC3	330	0.77
Biocalce + Nanolime + etanolo	CL1	480	1.13
	CL2	430	1.01
	CL3	300	0.70

Tab. 5.13: Valori della resistenza a flessione [N/mm^2] degli intonaci pre invecchiamento

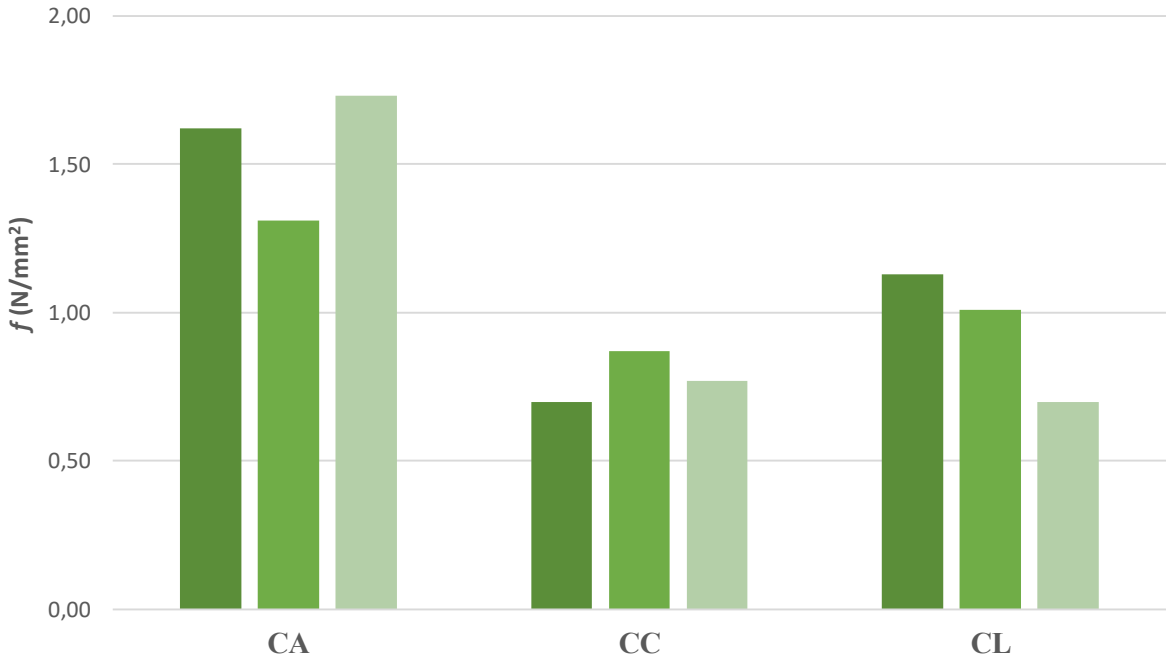


Fig. 5.12: Valori della resistenza a flessione [N/mm²] in funzione dei diversi tipi di intonaci pre invecchiamento

Post invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo del campione	Carico massimo F [N]	Resistenza a flessione f [N/mm^2]
Biocalce	CAA1	560	1.31
	CAA2	390	0.91
	CAA3	430	1.00
Biocalce + Nanoclay	CCA1	370	0.86
	CCA2	260	0.60
	CCA3	350	0.81
Biocalce + Nanolime + etanolo	CLA1	240	0.56
	CLA2	330	0.77
	CLA3	300	0.70

Tab. 5.14: Valori della resistenza a flessione [N/mm²] degli intonaci post invecchiamento

Fig. 5.13: Valori della resistenza a flessione [N/mm²] in funzione dei diversi tipi di intonaci post invecchiamento

- *Fig. 5.14: Rottura a flessione di un provino*

Si evidenzia che solo l'intonaco invecchiato a base di Biocalce + Nanoclay (CCA) non ha subito riduzione delle prestazioni, per un'analisi più approfondita si rimanda al capitolo "Discussione".

In seguito si riportano le tabelle e i grafici dei risultati relativi alla *determinazione della resistenza a compressione pre e post invecchiamento*:

Pre invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo del campione	Area dei provini A [mm^2]	Carico massimo F [N]	Resistenza a compressione σ [N/mm^2]
Biocalce	CA1	1600	5160	3.23
	CA2		5680	3.55
	CA3		6070	3.79
Biocalce + Nanoclay	CC1	1600	3010	1.88
	CC2		3320	2.08
	CC3		3170	1.98
Biocalce + Nanolime + etanolo	CL1	1600	3840	2.40
	CL2		3730	2.33
	CL3		3710	2.32

Tab. 5.15: Valori della resistenza a compressione [N/mm^2] degli intonaci pre invecchiamento

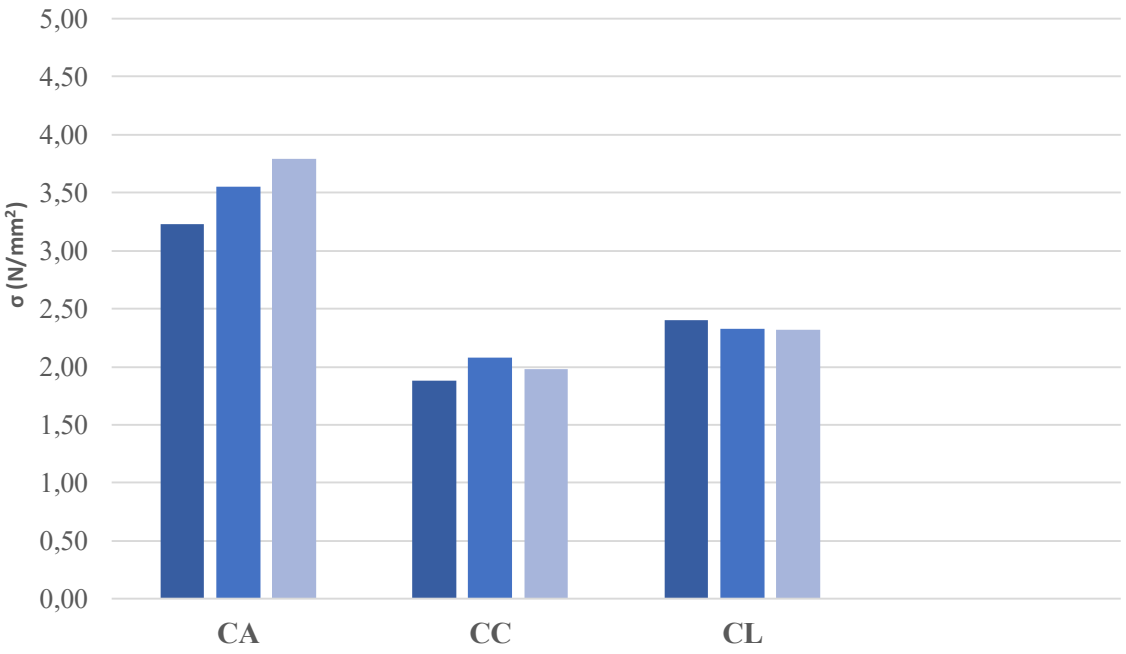


Fig. 5.14: Valori della resistenza a compressione [N/mm^2] in funzione dei diversi intonaci pre invecchiamento

Post invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo del campione	Area dei provini A [mm^2]	Carico massimo F [N]	Resistenza a compressione σ [N/mm^2]
Biocalce	CAA1	1600	2935	1.83
	CAA2		2465	1.54
	CAA3		2255	1.41
Biocalce + Nanoclay	CCA1	1600	2020	1.26
	CCA2		1355	0.84
	CCA3		1875	1.17
Biocalce + Nanolime + etanolo	CLA1	1600	1885	1.18
	CLA2		2315	1.44
	CLA3		1810	1.13

Tab. 5.16: Valori della resistenza a compressione [N/mm^2] degli intonaci post invecchiamento

Fig. 5.15: Valori della resistenza a compressione [N/mm^2] in funzione dei diversi intonaci post invecchiamento

Confrontando i dati prima e dopo l'invecchiamento, è evidente come l'aggiunta di Nanoclay e Nanolime determina un peggioramento della resistenza a compressione dopo l'invecchiamento,

lasciando invariata la classifica tra miglior e peggiore, per un'analisi più approfondita è svolta nel capitolo "Discussione".

Fig. 5.16: Rottura di un provino

In conformità con i risultati ottenuti dalle prove meccaniche, si afferma che lo sforzo di flessione e di compressione è tanto maggiore quanto maggiore è la rigidità della malta. Ulteriori considerazioni possono essere consultate nel capitolo relativo alla Discussione.

5.5 ANALISI POROSIMETRICHE A MERCURIO

Lo scopo di queste analisi è molteplice:

- Valutare come l'invecchiamento varia la porosità aperta totale se si aggiungono nanoparticelle in massa;
- Valutare come varia la distribuzione dimensionale dei pori.

Criteri di valutazione:

Considerando che il mercurio penetra nei pori aperti, si riesce facilmente a delineare la percentuale relativa alla porosità accessibile, la densità apparente, l'area superficiale totale dei pori (indica la finezza), il loro diametro medio, la mediana e la moda.

Dalla derivata del rapporto tra volume cumulativo e diametro dei pori (in scala logaritmica) si vede se la distribuzione è unimodale o meno, a seconda del numero dei picchi presenti.
Tutti questi valori vengono confrontati tra le diverse tipologie di malte da intonaco.
Se una curva (ottenuta nel grafico) è più spostata verso sinistra significa che i pori della malta testata sono più piccoli rispetto a quelli delle altre.
Inoltre, valori più grandi di porosità aperta e di diametro dei pori conferiscono al materiale una maggiore permeabilità.

In seguito si riporta la tabella ed i grafici dei risultati pre invecchiamento e post invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo del campione	Porosità totale aperta [%]	Densità apparente [g/cm^3]	Area superf. tot. dei pori [m^2/g]	Diametro medio dei pori [µm]	Diametro della mediana [µm]	Diametro della moda [µm]
Biocalce	CA	39	2.594	4.988	0.195	2.609	2.885
Biocalce + Nanoclay	CC	24	2.261	1.492	0.372	3.412	3.961
Biocalce + Nanolime + etanolo	CL	36	2.645	4.405	0.192	2.440	3.125

Tab. 5.17: Valori delle diverse malte da intonaco ottenuti con le analisi porosimetriche a mercurio pre invecchiamento

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo del campione	Porosità totale aperta [%]	Densità apparente [g/cm^3]	Area superf. tot. dei pori [m^2/g]	Diametro medio dei pori [µm]	Diametro della mediana [µm]	Diametro della moda [µm]
Biocalce	CAA	31.3	2.55	4.431	0.16	1.59	3.62
Biocalce + Nanoclay	CCA	35.79	2.49	3.079	0.29	3.20	5.12
Biocalce + Nanolime + etanolo	CLA	34.1	2.60	4.405	0.27	2.77	3.30

Tab. 5.18: Valori delle diverse malte da intonaco ottenuti con le analisi porosimetriche a mercurio post invecchiamento

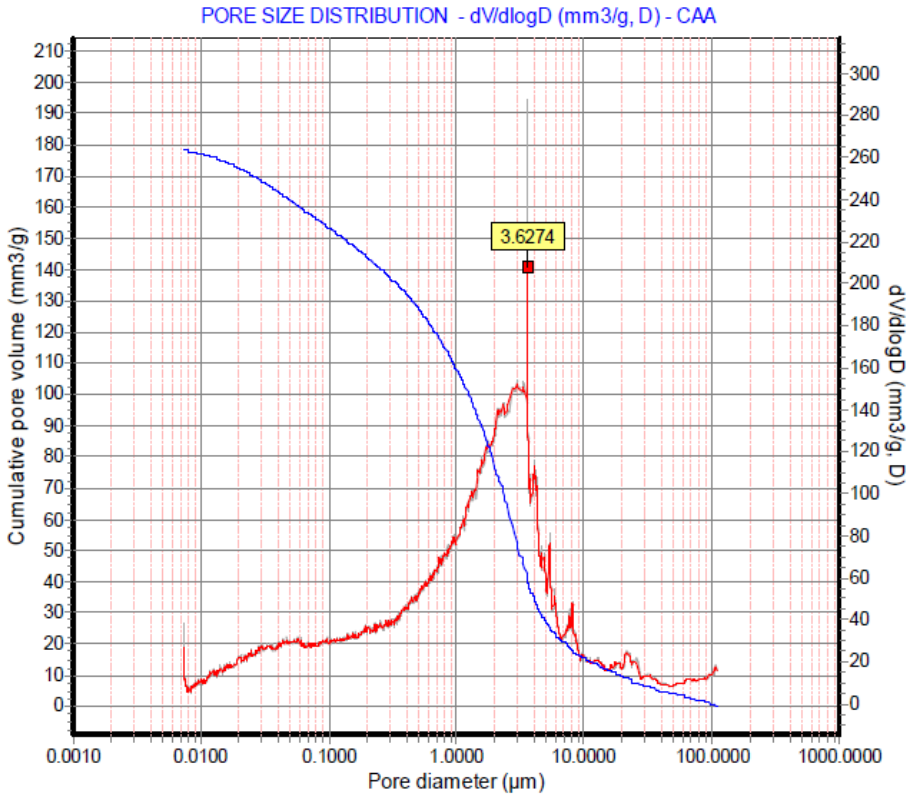


Fig. 5.17: Grafico in cui sono correlati il diametro dei pori e il volume cumulativo dei pori del CAA

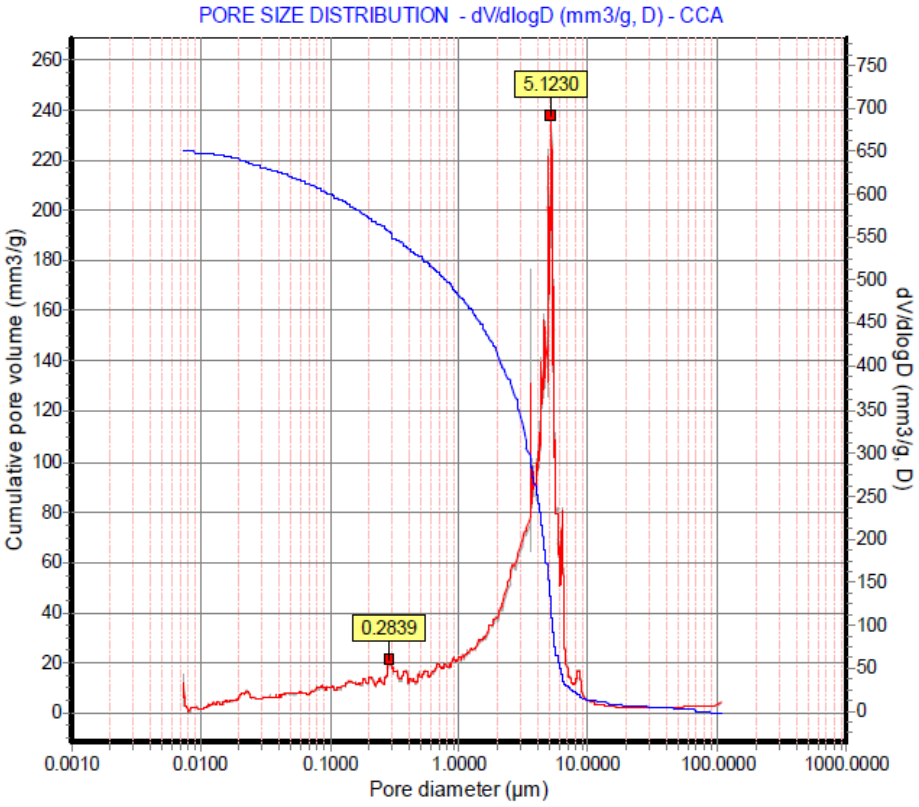


Fig. 5.18: Grafico in cui sono correlati il diametro dei pori e il volume cumulativo dei pori del CCA

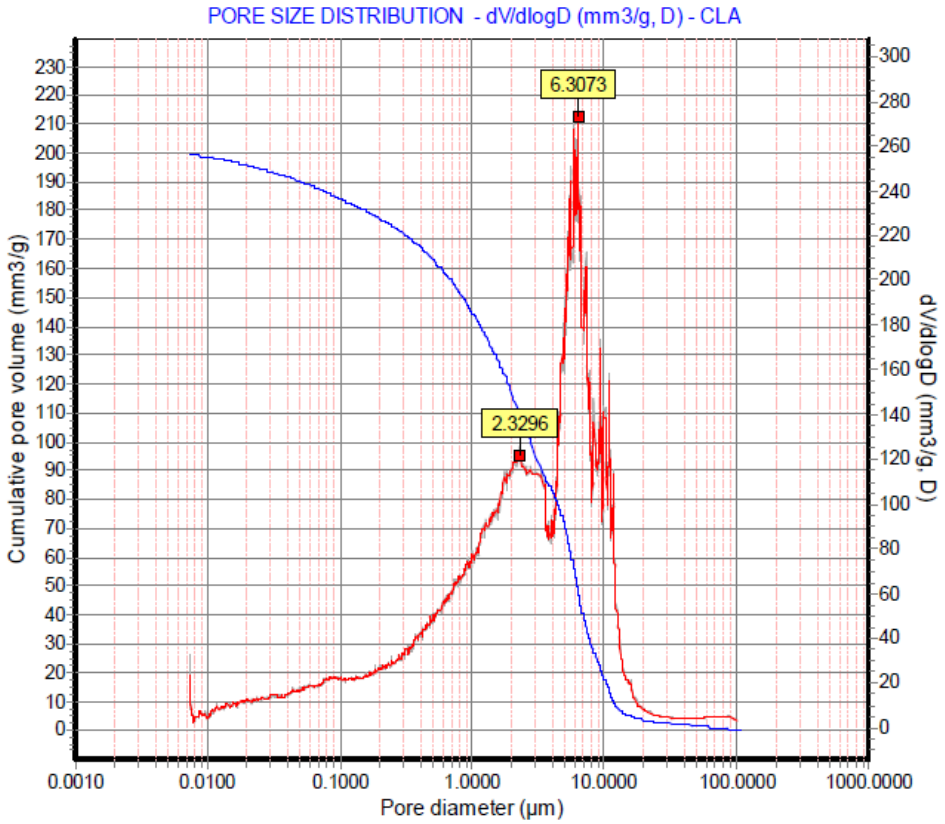


Fig. 5.19: Grafico in cui sono correlati il diametro dei pori e il volume cumulativo dei pori del CLA

Confrontando i dati prima e dopo l'invecchiamento, è evidente come l'aggiunta di Nanoclay e Nanolime determina una leggera variazione sulla porosità dei campioni, un'analisi più approfondita è svolta nel capitolo "Discussione".

5.6 PROVE DI ASSORBIMENTO D'ACQUA PER CAPILLARITÀ CON IL METODO DEL TUBO DI KARSTEN

Lo scopo di tali prove è quello di valutare l'efficacia degli additivi a rendere l'intonaco impermeabile all'acqua.

Criteri di valutazione:

La valutazione è positiva se la velocità di assorbimento è minore rispetto a quella dell'intonaco privo di additivi (CA); altrimenti è negativa. In realtà si fa riferimento non esattamente alla velocità di assorbimento ma al valore $C_{KB10min}$ [g/(m^{2}s)] in riferimento alla normativa UNI EN 16302:2013 [34] e sulle raccomandazioni RILEM II.4 [35].

Il valore di $C_{KB10min}$ rappresenta la quantità d'acqua assorbita per unità di area e nell'unità di tempo, calcolata considerando solo i punti del grafico relativi al il 5° e il 15° minuto. I grafici mostrano l'assorbimento d'acqua in funzione del tempo. Maggiori pendenze indicano maggiori velocità di assorbimento.

In seguito si riportano le tabelle ed il grafico dei risultati pre invecchiamento e post invecchiamento:

Pre invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo	**Velocità media di assorbimento $C_{KB10min}$ [g/(m^{2}s)]**		
		Punto di prova 1	Punto di prova 2	Valore medio
Biocalce	CA	0.50	0.42	0.46
Biocalce + Nanoclay	CC	1.33	1.33	1.33
Biocalce + Nanolime + etanolo	CL	0.67	0.75	0.71

Tab. 5.18: Valori della velocità media di assorbimento [g/(m^{2}s)] degli intonaci applicati sul supporto in terra cruda pre invecchiamento

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo	Degrado da erosione dopo 15 minuti
Biocalce	CA	no
Biocalce + Nanoclay	CC	no
Biocalce + Nanolime + etanolo	CL	no

Tab. 5.19: Degrado da erosione dopo 15 minuti di assorbimento d'acqua dei campioni pre invecchiamento

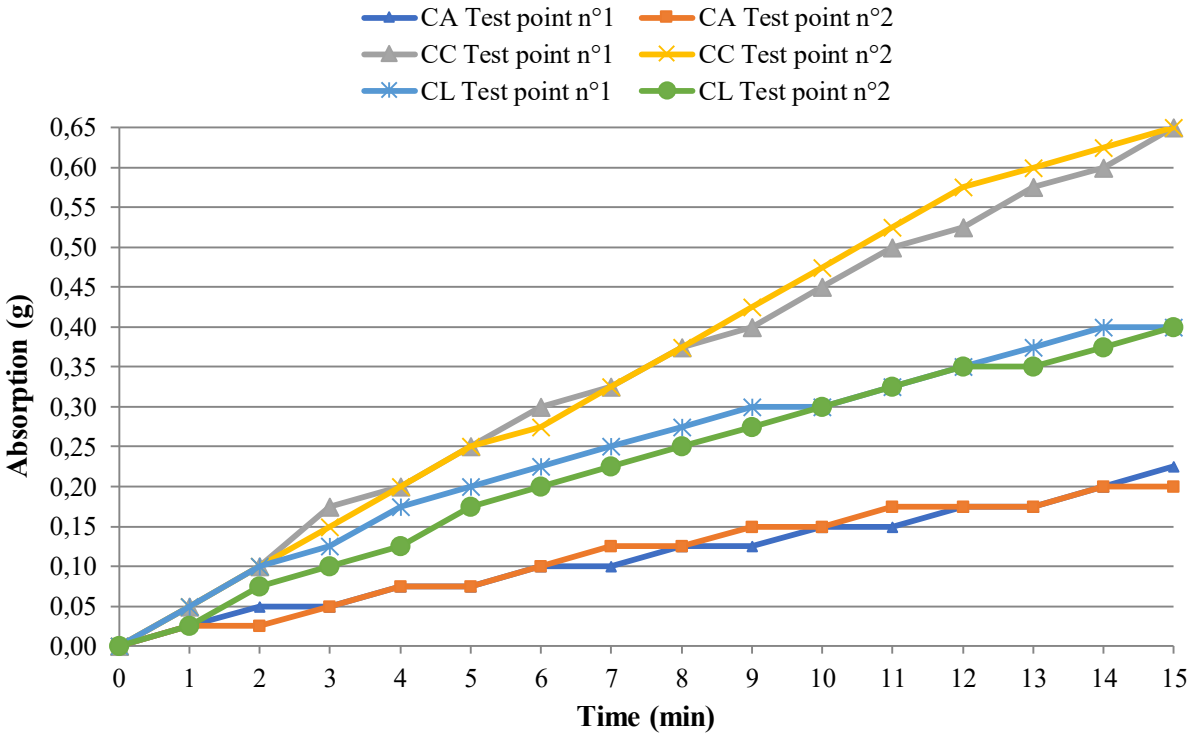


Fig. 5.20: Relazione grafica tra l'assorbimento d'acqua (g) ed il tempo (minuti) pre invecchiamento

Post invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo	**Velocità media di assorbimento $C_{KB10min}$ [g/(m²s)]**		
		Punto di prova 1	Punto di prova 2	Valore medio
Biocalce	CAA	0.64	0.57	0.61
Biocalce + Nanoclay	CCA	1.15	1.15	1.15
Biocalce + Nanolime + etanolo	CLA	0.34	0.37	0.36

Tab. 5.20: Valori della velocità media di assorbimento [g/(m²s)] degli intonaci applicati sul supporto in terra cruda post invecchiamento

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo	Degrado da erosione dopo 15 minuti
Biocalce	CAA	no
Biocalce + Nanoclay	CCA	no
Biocalce + Nanolime + etanolo	CLA	no

Tab. 5.21: Degrado da erosione dopo 15 minuti di assorbimento d'acqua dei campioni pre invecchiamento

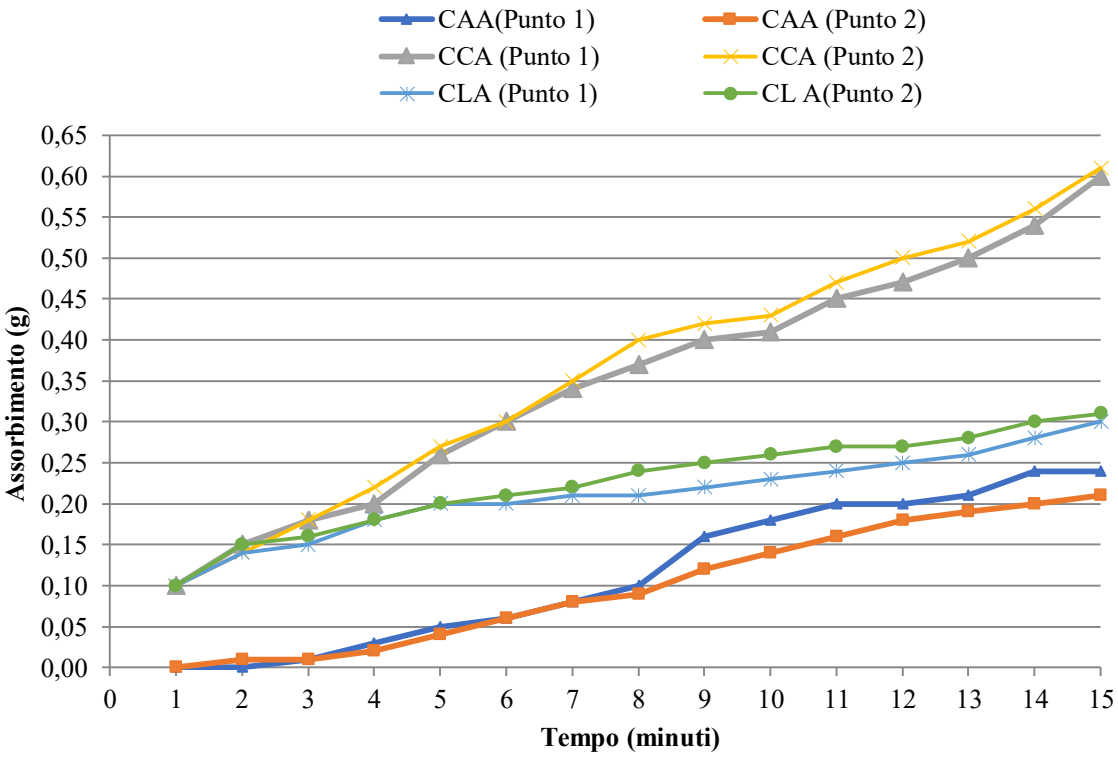


Fig. 5.21: Relazione grafica tra l'assorbimento d'acqua (g) ed il tempo (minuti) post invecchiamento

Si nota che l'assorbimento d'acqua in valore assoluto tende a diminuire leggermente a seguito dell'invecchiamento e che la classifica tra le tipologie che assorbono di più e di meno è rimasta invariata, ma per ulteriori analisi si rimanda al capitolo "Discussione".

5.7 PROVE DI CONDUCIBILITÀ TERMICA

Lo scopo di tali prove è quello di valutare l'efficacia degli additivi a rendere l'intonaco isolante dal punto di vista termico, misurando il flusso termico medio scambiato in regime stazionario.

Criteri di valutazione:
Un intonaco a base di biocalce è termicamente isolante se ha una resistenza termica minima di 0.1 m^2K/W per la UNI EN 12664 (prodotti di media - bassa resistenza termica) ed una resistenza termica minima di 0.5 m^2K/W per la UNI EN 12667 (prodotti di media - alta resistenza termica).

In seguito si riportano le tabelle ed i grafici dei risultati dei campioni pre invecchiamento e post invecchiamento:

Pre invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo del campione	Spessore del campione s [mm]	Conducibilità termica media λ [W/mK]
Biocalce	CA	32	0.100
Biocalce + Nanoclay	CC	32	0.109
Biocalce + Nanolime + etanolo	CL	32	0.107

Tab. 5.22: Valori della conducibilità termica media [W/mK] delle diverse tipologie di intonaci pre invecchiamento

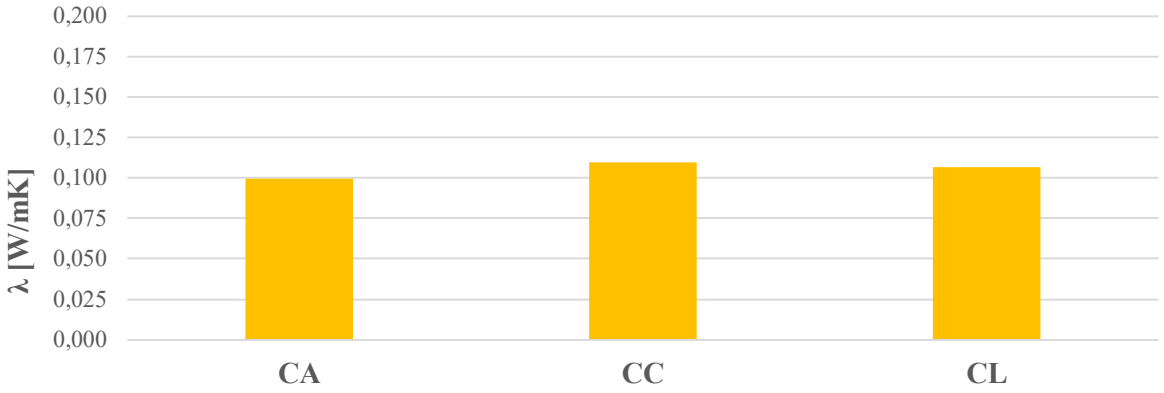


Fig. 5.22: Valori della conducibilità termica media [W/mK] in funzione delle diverse tipologie di intonaci pre invecchiamento

Resistenza termica *R* [m²K/W]	
Tipologia campione	Valore medio
CA	0.321
CC	0.293
CL	0.300

Tab. 5.23: Valori medi di resistenza termica [m²K/W] pre invecchiamento

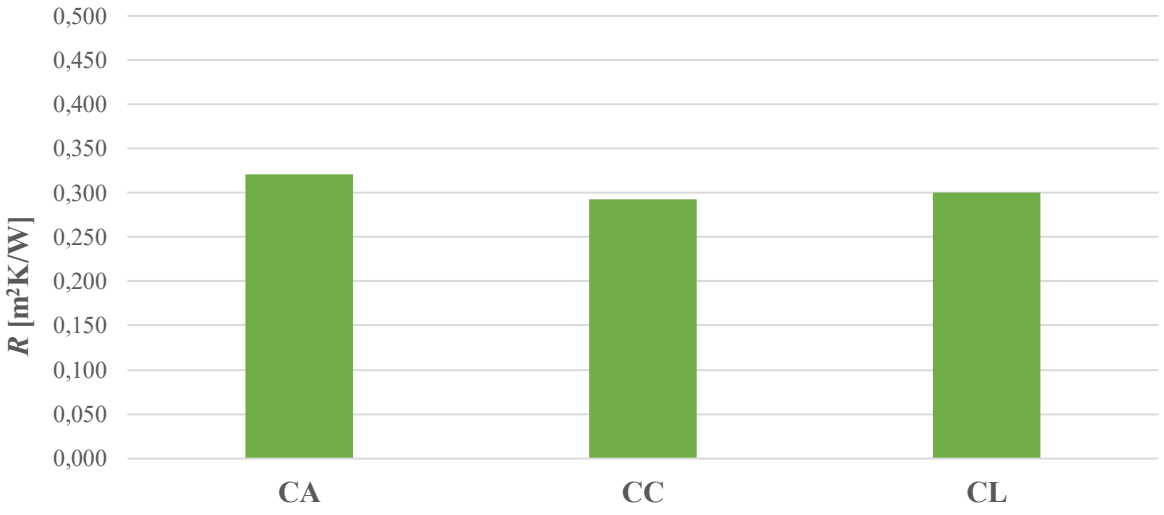


Fig. 5.23: Valori della resistenza termica media [m²K/W] in funzione delle diverse tipologie di intonaci pre invecchiamento

Post invecchiamento:

Tipologia di malta da intonaco	Codice identificativo del campione	Spessore del campione s [mm]	Conducibilità termica media λ [W/mK]
Biocalce	CAA	32	0.097
Biocalce + Nanoclay	CCA	32	0.118
Biocalce + Nanolime + etanolo	CLA	32	0.103

Tab. 5.24: Valori della conducibilità termica media [W/mK] delle diverse tipologie di intonaci post invecchiamento

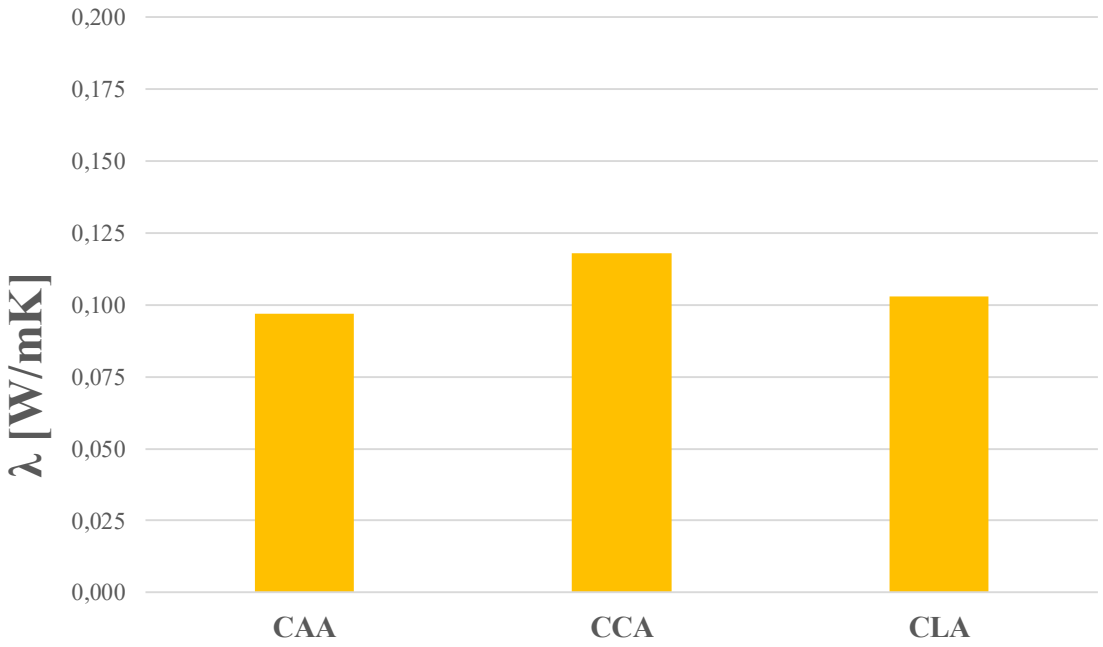


Fig. 5.24: Valori della conducibilità termica media [W/mK] in funzione delle diverse tipologie di intonaci post invecchiamento

Resistenza termica *R* [m²K/W]	
Tipologia campione	Valore medio
CAA	0.329
CCA	0.271
CLA	0.311

Tab. 5.25: Valori medi di resistenza termica [m²K/W] post invecchiamento

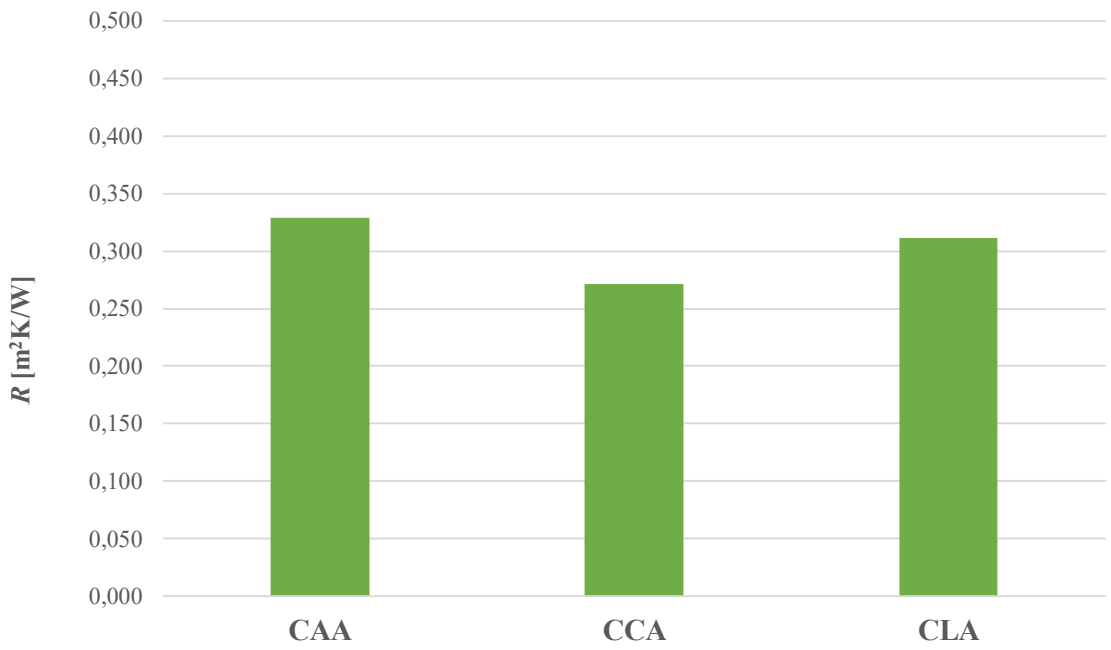


Fig. 5.25: Valori della resistenza termica media [m²K/W] in funzione delle diverse tipologie di intonaci post invecchiamento

I valori di conducibilità termica sono pressochè invariati, per ulteriori analisi si fa riferimento al capitolo "Discussione".

5.8 PROVE DI EROSIONE CON IL METODO A SPRUZZO

Lo scopo di tali prove è di determinare l'efficacia degli intonaci dal punto di vista della resistenza all'erosione da parte dell'acqua e di conseguenza, valutare se l'effetto degli additivi migliora l'intonaco di base.

Di base si utilizzano due tipologie di prova, una basata sul gocciolamento di una determinata quantità di acqua da un'altezza prefissata ed una basata sullo spruzzo di acqua da una distanza normata. Nella tesi la prima tipologia non è stata svolta, perché da studi preliminari si è vista la scarsa incidenza nella differenza dei risultati e si è deciso di svolgere direttamente la seconda tipologia di prova che crea delle condizioni di erosione più sfavorevoli, essendo maggiore l'impatto dell'acqua sulla superficie studiata.

I risultati delle prove di erosione si basano sull'attribuzione di un indice di erosione, secondo quanto previsto dalla normativa neozelandese.

Criteri di valutazione:

La valutazione si basa sull'indice di erosione *I* attribuito con il metodo Pressure Spray. La valutazione è ottima se il campione dopo la prova non manifesta alcun segno di erosione; è tuttavia positiva se l'indice di erosione è pari ad 1, che è il più basso attribuibile per cui si parla di erodibilità bassa; altrimenti è negativa. Più elevato è l'indice di erosione, peggiore è la resistenza dell'intonaco.

In seguito si riportano le tabelle, le immagini ed il grafico dei risultati pre e post invecchiamento:

Pre invecchiamento:

Tipologia campione	Codice identificativo	Profondità di erosione *D* (mm)				
		Minuti 0	15	30	45	60
Intonaco a base di Biocalce	CA	0	0	1	2	3
Intonaco a base di Biocalce + Nanoclay	CC	0	0	0	0	0
Intonaco a base di Biocalce + Nanolime + etanolo	CL	0	0	0	1	2

Tab. 5.26: Risultati delle prove di erosione con il metodo a spruzzo (Profondità di erosione D) pre invecchiamento

Tipologia campione	Codice identificativo	Velocità di erosione D' (mm/h)	Indice di erosione I
Intonaco a base di Biocalce	CA	3	1
Intonaco a base di Biocalce + Nanoclay	CC	0	1
Intonaco a base di Biocalce + Nanolime + etanolo	CL	2	1

Tab. 5.27: Risultati delle prove di erosione con il metodo a spruzzo pre invecchiamento (Velocità di erosione D' ed indice di erosione I)

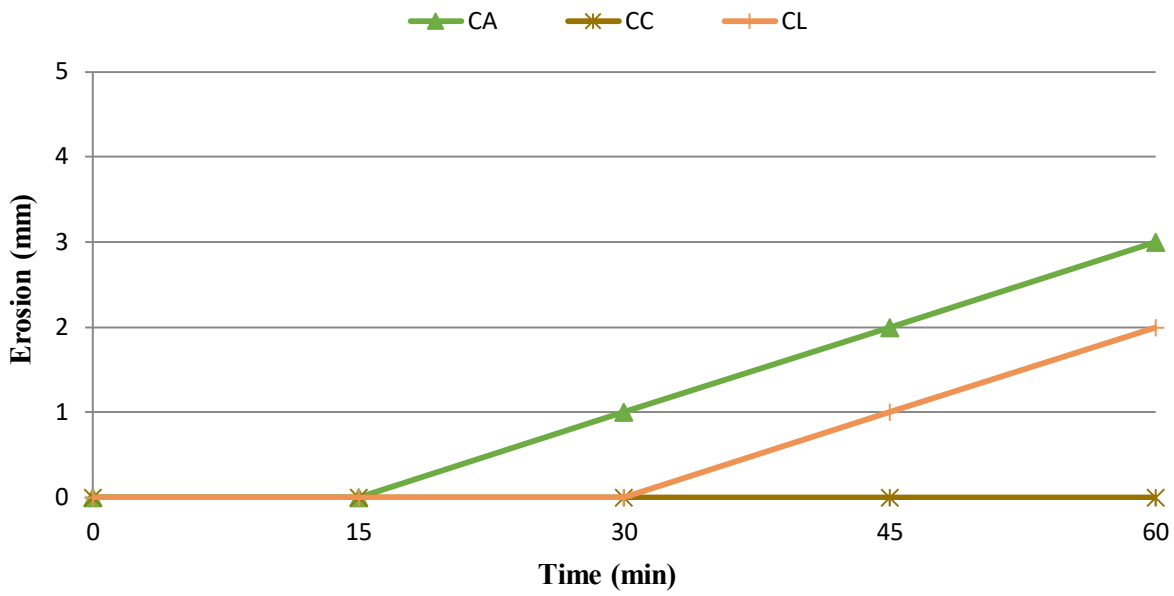


Fig. 5.26: Relazione grafica tra la profondità di erosione (mm) ed il tempo (minuti) pre invecchiamento

Post invecchiamento:

Tipologia campione	Codice identificativo	Profondità di erosione D (mm) Minuti 0	15	30	45	60
Intonaco a base di Biocalce	CAA	0	1	2	3	5
Intonaco a base di Biocalce + Nanoclay	CCA	0	0	0	1	1
Intonaco a base di Biocalce + Nanolime + etanolo	CLA	0	1	2	2	4

Tab. 5.28: Risultati delle prove di erosione con il metodo a spruzzo (Profondità di erosione D) post invecchiamento

Tipologia campione	Codice identificativo	Velocità di erosione D' (mm/h)	Indice di erosione I
Intonaco a base di Biocalce	CAA	5	1
Intonaco a base di Biocalce + Nanoclay	CCA	1	1
Intonaco a base di Biocalce + Nanolime + etanolo	CLA	4	1

Tab. 5.29: Risultati delle prove di erosione con il metodo a spruzzo post invecchiamento (Velocità di erosione D' ed indice di erosione I)

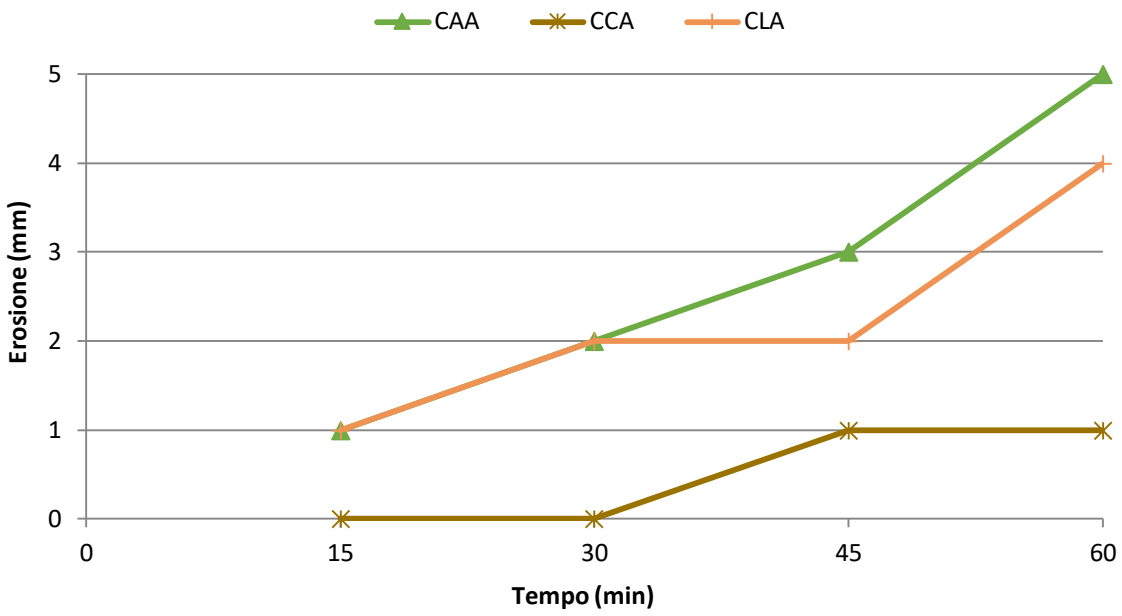


Fig. 5.27: Relazione grafica tra la profondità di erosione (mm) ed il tempo (minuti) post invecchiamento

Fig. 5.28: Campione di intonaco a seguito delle prove di erosione con il metodo a spruzzo, è visibile il segno del silicone

Si nota come l'invecchiamento non ha influenzato la classifica di comportamento tra migliore e peggiore: la Nanoclay e la Nanolime hanno dato risultati migliori rispetto all'intonaco base, ulteriori analisi sono state svolte nel capitolo "Discussione".

6 DISCUSSIONE

Lo studio sperimentale che è stato svolto conferma la buona compatibilità fisico-meccanica dell'intonaco naturale a base di biocalce con il supporto murario in blocchi krioton in terra cruda anche dopo l'invecchiamento artificiale.
In particolare è stato valutato l'effetto dell'invecchiamento artificiale su intonaci a base di biocalce a cui sono state aggiunte nanoparticelle nella forma di Nanoclay e Nanolime.

- **Analisi al Sem**

Osservando le immagini emerge che:

- Nel CA prima dell'invecchiamento si vedono bene i cristalli di Portlandite esagonali piatti, i prodotti di idratazione aghiforme e gli aggregati;
- Nel CC i cristalli esagonali piatti non si vedono più, dato che si è verificata la reazione pozzolanica tra argilla e idrossido di calce. Tuttavia, si vedono ancora i prodotti di idratazione ed i vuoti tra le particelle sono notevolmente ridotti;
- Nel CL a livello di microstruttura si vedono delle zone più compatte ed altre più porose. Le piastrine di Portlandite sono di dimensione inferiore rispetto a quelle del CA e la microstruttura risulta più eterogenea.
- Nel CAA dopo l'invecchiamento si vede un aumento dei prodotti di idratazione;
- Nel CCA si vedono i prodotti di idratazione che nell'analisi al Sem prima dell'invecchiamento non erano visibili;
- Nel CLA sono anche qui visibili i prodotti di idratazione che nell'analisi al Sem prima dell'invecchiamento non erano visibili

- **Prove di taglio per la valutazione di aderenza al supporto:**

Resistenza media a a taglio $\tau_{max,med}$ (kPa)			
Tipologia intonaco	Pre invecchiamento	Post invecchiamento	Variazione
Biocalce base	197	180	-8%
Biocalce + Nanoclay	176	50	-71%
Biocalce + Nanolime	173	55	-68%

Tab.6.1: Confronto della resistenza a taglio media pre e post invecchiamento e variazione

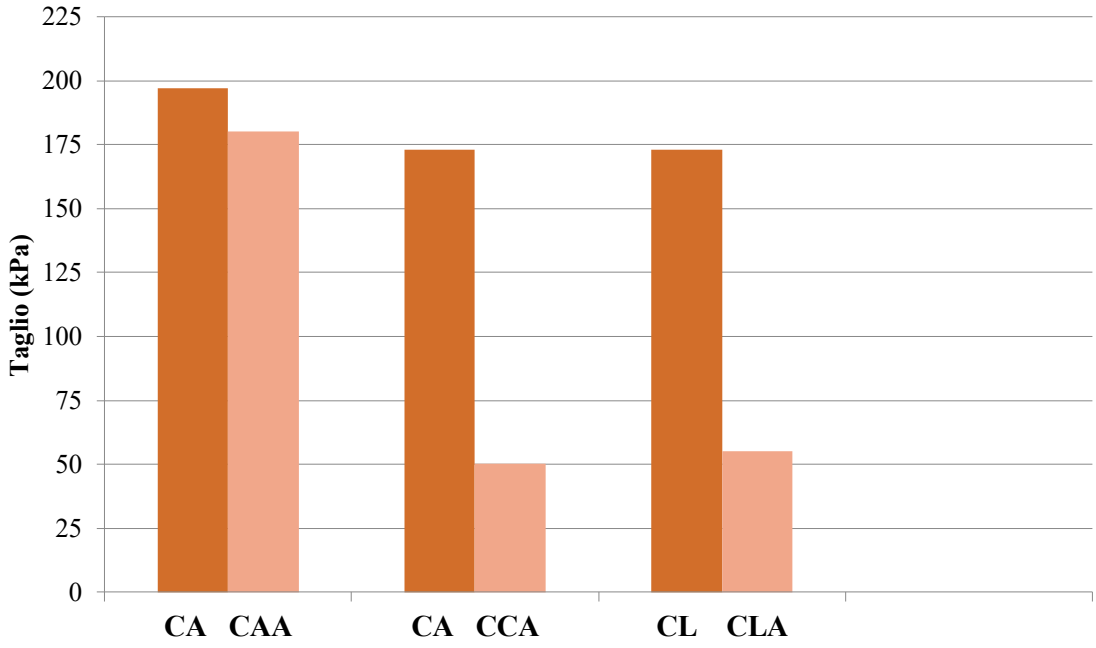


Fig.6.1: Resistenza a taglio [kPa] in funzione delle diverse tipologie di intonaci, confronto tra la media dei non invecchiati (rosso) e invecchiati (rosa).

Dai risultati emerge che:

- Tutti i campioni anche dopo l'invecchiamento hanno un'aderenza tale da resistere ad una forza di taglio maggiore a 10 volte il peso proprio, in quanto le tensioni tangenziali medie sopportate sono maggiori di 3 kPa, quindi rispettano la norma in materia;
- Per tutti i campioni la rottura si è verificata all'interfaccia muro-intonaco, questo significa che quella è la parte più debole;
- L'intonaco di base CA mostra un leggero calo della resistenza a taglio;
- Le nanoparticelle aggiunte in massa all'intonaco peggiorano in maniera considerevole la resistenza a taglio.

  In particolare gli intonaci additivati con Nanoclay (CC) passano da una $\tau_{max,med}$ = 176 kPa a una $\tau_{max,med}$ = 50kPa con una diminuzione del 71%.

  Invece gli intonaci additivati con Nanolime (CL) passano da una $\tau_{max,med}$ = 173 kPa a una $\tau_{max,med}$ = 55kPa con una diminuzione del 68%.

- **Prove a strappo per la valutazione di aderenza al supporto:**

Resistenza media a trazione $f_{u,medio}$ [N/mm^2]			
Tipologia intonaco	Pre invecchiamento	Post invecchiamento	Variazione
Biocalce base	0.24	0.21	-13%
Biocalce + Nanoclay	0.18	0.09	-47%
Biocalce + Nanolime	0.16	0.11	-30%

Tab.6.2: Confronto della resistenza a strappo media pre e post invecchiamento e variazione

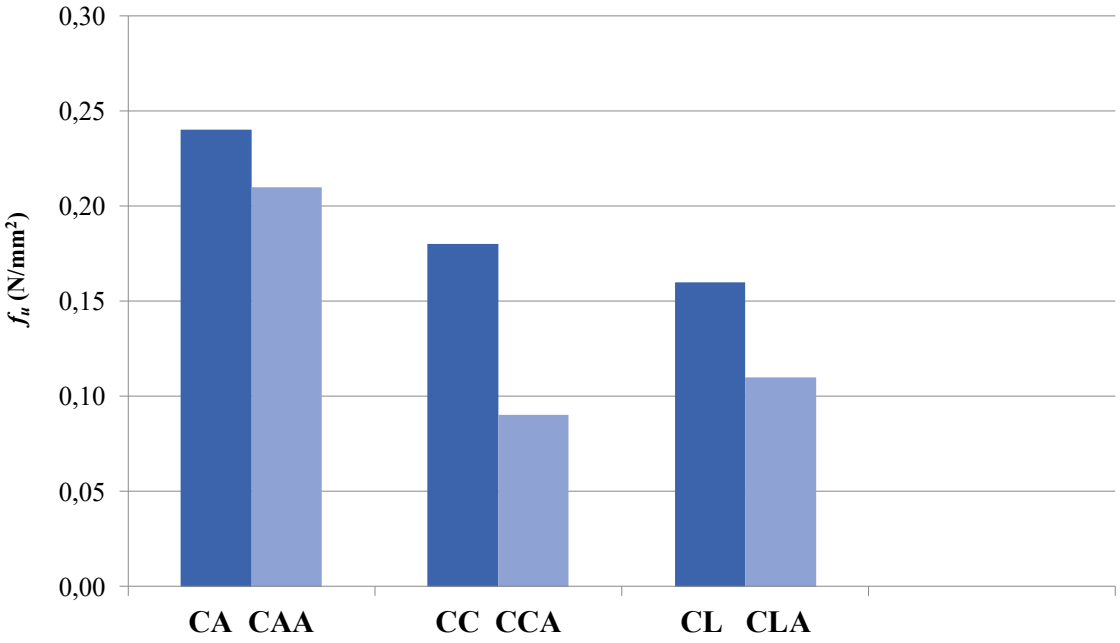


Fig.6.2: Valori medi di resistenza a trazione [N/mm^2] in funzione delle diverse tipologie di intonaci, confronto tra la media dei non invecchiati (blu) e invecchiati (rosa).

Dai risultati emerge che:

- Per tutti i campioni la rottura si è verificata all'interfaccia muro-intonaco questo significa che quella è la parte più debole;
- I campioni di intonaco base CA mostrano un modesto calo della resistenza a trazione, passando in media da 0,24 N/mm^2 a 0,21 N/mm^2, mostrando un calo del 13%;

- Le nanoparticelle aggiunte in massa all'intonaco fanno calare in modo considerevole la resistenza a trazione dell'intonaco.

  In particolare gli intonaci additivati con Nanoclay (CC) hanno una resistenza a trazione media che passa da 0.18 N/mm^2 a 0,09 N/mm^2, con un calo del 50%

  Quelli in cui si sono aggiunti Nanolime (CL)) hanno una resistenza a trazione media che passa da 0.16 N/mm^2 a 0,11 N/mm^2, con calo del 30%;
- Seguendo le indicazioni della norma si può affermare che solo l'intonaco base un'adeguata resistenza a trazione ≥ 0.20 N/mm^2.

- **Prove di valutazione del modulo elastico dinamico**

Modulo elastico dinamico [Mpa]			
Tipologia intonaco	Pre invecchiamento	Postinvecchiamento	Variazione
Biocalce base	3705	2809	-24%
Biocalce + Nanoclay	2440	2155	-12%
Biocalce + Nanolime	2764	2194	-21%

Tab.6.3: Confronto del modulo elastico medio pre e post invecchiamento e variazione

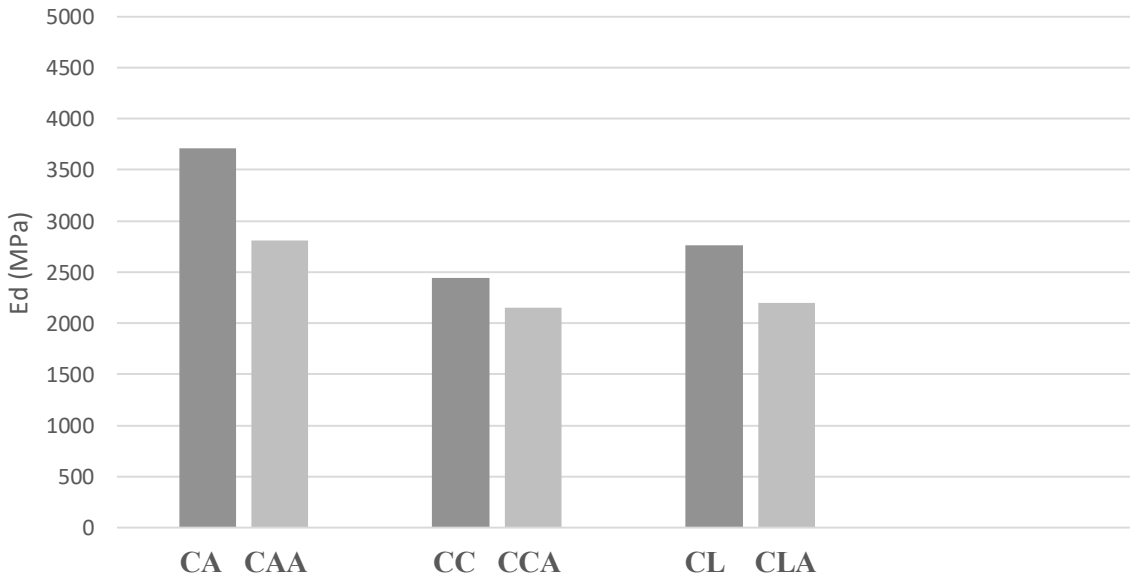


Fig.6.3: Confronto del modulo elastico dinamico [MPa] in funzione dei diversi tipi di intonaci pre invecchiamento (scuro) e post invecchiamento (chiaro)

Dal confronto dei risultati delle prove non-distruttive mediante il rilevamento degli ultrasuoni eseguite prima e dopo l'invecchiamento emerge che:

- L'intonaco a base di biocalce CA possiede un modulo elastico in termini assoluti superiore agli altri sia prima che dopo l'invecchiamento;
- L'intonaco a base di biocalce CA presenta la maggiore diminuzione del modulo elastico dopo l'invecchiamento (-24%);
- L'aggiunta di nanoparticelle determina in generale un minore calo del modulo elastico dinamico;
- L'intonaco a base di biocalce + Nanoclay (CC) presenta la minore diminuzione del modulo elastico dinamico dopo l'invecchiamento (-12%);
- L'intonaco a base di biocalce + Nanolime (CL) presenta una diminuzione del modulo elastico dinamico leggermente inferiore rispetto all'intonaco senza aggiunte (-21%).

Si sottolinea l'importanza di considerare il modulo elastico dinamico nella scelta di un intonaco a protezione di muratura storica: esso dovrà essere il più elastico possibile in maniera da assecondare i naturali cedimenti senza fessurarsi, poiché le fessure rappresentano una via preferenziale di ingresso dell'acqua.

- **Prove di rottura a flessione:**

Resistenza media a flessione f_{media} [N/mm^2]			
Tipologia campione	Valore medio pre invecchiamento	Valore medio post invecchiamento	Variazione
Biocalce base	1.55	1.07	-30%
Biocalce + Nanoclay	0.78	0.75	-2%
Biocalce + Nanolime	0.95	0.67	-28%

Tab.6.4: Confronto della resistenza a flessione media pre e post invecchiamento e variazione

Fig.6.4: Confronto della resistenza a flessione [N/mm²] in funzione dei diversi tipi di intonaci pre invecchiamento (scuro) e post invecchiamento (chiaro)

Dai risultati delle prove di flessione emerge che:

- Per tutti i provini la rottura è avvenuta in mezzeria, dove si è applicato il carico;
- Dai grafici si può notare che i valori di resistenza sono caratterizzati da una certa dispersione, sia nei campioni non invecchiati che in quelli invecchiati, questo è dovuto alla presenza di vari fattori di condizionamento legati alla preparazione e alla colata/compattazione negli stampi delle malte;
- Le nanoparticelle aggiunte in massa all'intonaco peggiorano la resistenza a flessione dell'intonaco sia prima che dopo l'invecchiamento;
- Gli intonaci base di biocalce (CA) presentano dopo l'invecchiamento una resistenza media a flessione diminuita del 30%, quindi sostanzialmente invariata
- Gli intonaci additivati con Nanoclay (CC) presentano dopo l'invecchiamento una resistenza media a flessione diminuita del 2%, quindi sostanzialmente invariata;
- Gli intonaci additivati con Nanolime (CL) presentano dopo l'invecchiamento una resistenza media a flessione diminuita del 28%, quindi comparabile all'intonaco senza aggiunta di nanoparticelle in massa.

- **Prove di rottura a compressione:**

Resistenza media a compressione σ_{media} [N/mm^2]			
Tipologia campione	Pre invecchiamento	Post invecchiamento	Variazione
Biocalce base	3.52	1.59	-54%
Biocalce + Nanoclay	1.98	1.29	-34%
Biocalce + Nanolime	2.35	1.25	-46%

Tab.6.5: Confronto della resistenza a compressione media pre e post invecchiamento e variazione

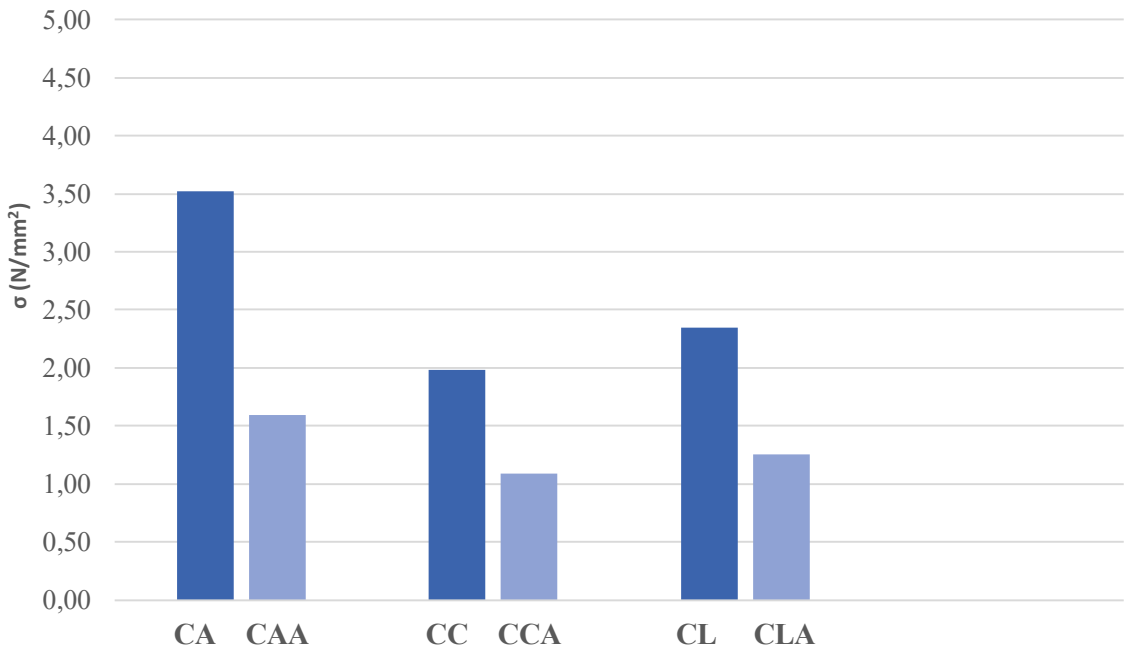


Fig.6.5: Confronto della resistenza a compressione [N/mm²] in funzione dei diversi intonaci pre invecchiamento (scuro) e post invecchiamento(chiaro)

Tuttavia, considerando la normativa [33]:

- Le singole resistenze σ, espresse in N/mm^2, sono state arrotondate al più prossimo 0.05 N/mm^2;
- In seguito si è calcolata la resistenza a compressione media σ_{media}, in N/mm^2, dai valori ottenuti con i 3 provini per ciascuna tipologia di malta al più prossimo 0.1 N/mm^2.

Da queste osservazioni si sono ottenuti i seguenti valori:

Resistenza media a compressione σ_{media} [N/mm^2]			
Tipologia campione	Pre invecchiamento	Post invecchiamento	Variazione
Biocalce base	3.50	1.60	-54%
Biocalce + Nanoclay	2.00	1.30	-35%
Biocalce + Nanolime	2.40	1.30	-45%

Tab.6.6: Confronto della resistenza a compressione media secondo normativa pre e post invecchiamento e variazione

Dai risultati delle prove di compressione emerge che:

- Per tutti i provini si è ottenuta una rottura tronco-conica per compressione;
- La resistenza a compressione diminuisce con l'invecchiamento in tutte le tipologie di intonaco poste in analisi;
- L'aggiunta in massa di nano particelle peggiora la resistenza a compressione sia prima che dopo l'invecchiamento;
- Il calo della resistenza a compressione è più accentuato nell'intonaco base di biocalce (CA) in cui è del 54% rispetto a quello con aggiunta di Nanoclay (CC) in cui è del 34% e di quello con aggiunta di Nanolime in cui è del 46%;

Considerando i valori medi ottenuti approssimando opportunamente i risultati secondo le indicazioni della normativa si può affermare che dopo l'invecchiamento la tipologia di malta CA rientra in categoria *CS II* (valori compresi tra 1.5 N/mm^2 e 5.0 N/mm^2) mentre le tipologie CC e CL rientrano in categoria CS II (valori compresi tra 0.4 N/mm^2 e 2.5 N/mm^2) .

- **Porosimetria al mercurio**

Tipologia di malta da intonaco	**Porosità totale aperta**		
	Pre invecchiamento	Post invecchiamento	Variazione
Biocalce base	39	31	-20%
Biocalce + Nanoclay	24	36	+33%
Biocalce + Nanolime	36	34	-5%

Tab.6.7: Confronto della porosità totale aperta pre e post invecchiamento e variazione

Tipologia di malta da intonaco	Diametro medio dei pori		
	Pre invecchiamento	Post invecchiamento	Variazione
Biocalce base	0.19	0.16	-16%
Biocalce + Nanoclay	0.37	0.29	-21%
Biocalce + Nanolime	0.19	0.27	+29%

Tab.6.8: Confronto del diametro medio dei pori pre e post invecchiamento e variazione

Dai risultati della porosimetria al mercurio emerge che:

- L'invecchiamento determina nei campioni con intonaco base di biocalce una diminuzione della porosità dal 39% al 31% e una diminuzione del diametro medio dei pori da 0.19 µm a 0.16 µm, quindi del 21%;
- L'invecchiamento determina nei campioni con Nanoclay un aumento della porosità dal 24% al 36% e una diminuzione del diametro medio dei pori da 0.37 µm a 0.29 µm, quindi del 21%;
- L'invecchiamento determina nei campioni con Nanolime una diminuzione della porosità dal 36% al 34% e un aumento del diametro medio dei pori da 0.19 µm a 0.27 µm, quindi del 29%.

- **Prove di assorbimento d'acqua con tubo di Karsten:**

Tipologia di malta da intonaco	Velocità media di assorbimento $C_{KB10min}$ [g/(m^{2}s)]		
	Pre invecchiamento	Post invecchiamento	Variazione
Biocalce base	0.46	0.61	+24%
Biocalce + Nanoclay	1.33	1.15	-13%
Biocalce + Nanolime	0.71	0.36	-49%

Tab.6.8: Confronto dell'assorbimento medio d'acqua e variazione

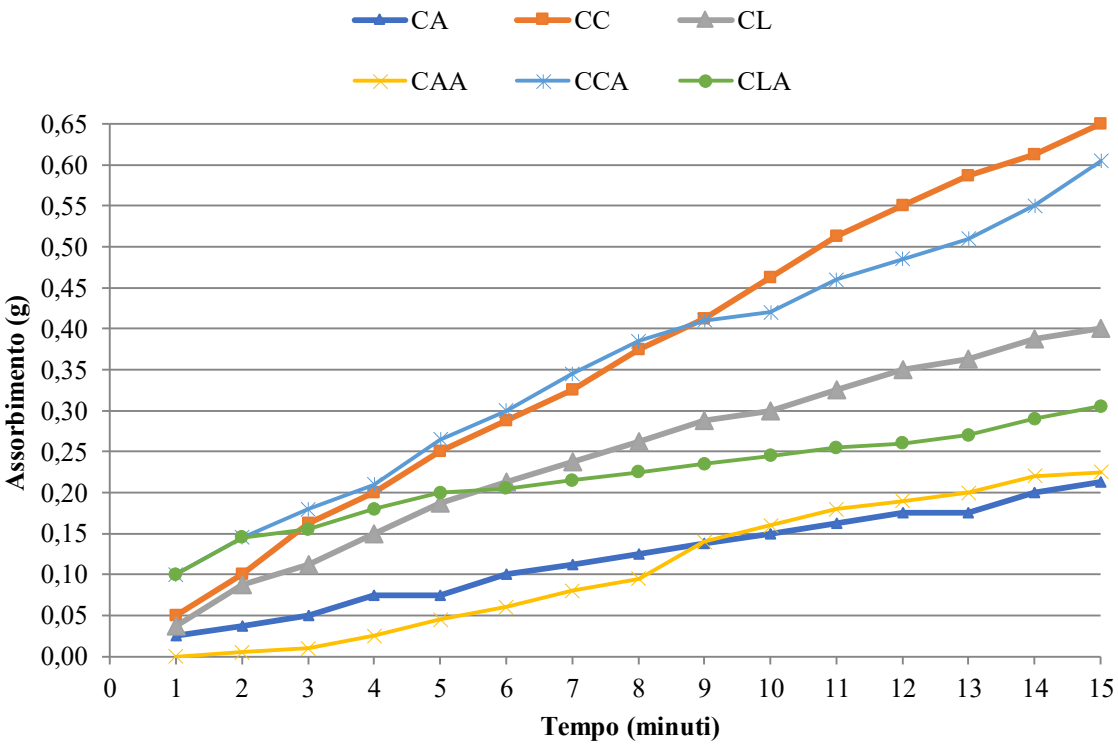


Fig.6.6: Confronto tra l'assorbimento d'acqua (g) ed il tempo (minuti) pre e post invecchiamento

Dai risultati emerge che:

- In termini di quantità d'acqua assorbita in valore assoluto, l'intonaco con valori maggiori è quello con Nanoclay (CC), seguito da quello con Nanolime (CL) e da quello di Biocalce base (CA);
- Per ogni tipologia di intonaco, l'aggiunta di Nanolime (CL) o Nanoclay (CC) seguita dall'invecchiamento, determina durante la prova una diminuzione dell'assorbimento;
- L'invecchiamento non cambia i rapporti tra le varie tipologie di intonaco;
- In termini di velocità di assorbimento, l'intonaco con aumento maggiore conseguente all'invecchiamento è quello base di biocalce che aumenta del 24%:

- In termini di velocità di assorbimento l'aggiunta di Nanolime (CL) e di Nanoclay (CC) determina una diminuzione della velocità di assorbimento rispettivamente del 49% e del 13%.

Nonostante l'assorbimento d'acqua sia un fenomeno a cui fare attenzione se si vuole proteggere un supporto in terra cruda, si consideri il fatto che un maggiore contenuto d'acqua nell'intonaco contribuisce a mantenere un ambiente indoor più gradevole durante la stagione estiva. Questo succede perché l'acqua contenuta nell'intonaco converte parte del calore fornitogli dall'ambiente in calore latente di vaporizzazione e quindi va a sottrarre una parte di calore che in altro modo avrebbe contribuito ad aumentare la temperatura interna.

- **Prove di conducibilità termica:**

Conducibilità termica λ [W/m^{2}K]			
Tipologia campione	Pre invecchiamento	Post invecchiamento	Variazione
Biocalce base	0.100	0,097	-3%
Biocalce + Nanoclay	0.109	0,118	+7.6%
Biocalce + Nanolime	0.107	0,103	-3.7%

Tab.6.9: Confronto valori medi di resistenza termica [m^{2}K/W] pre invecchiamento e post invecchiamento

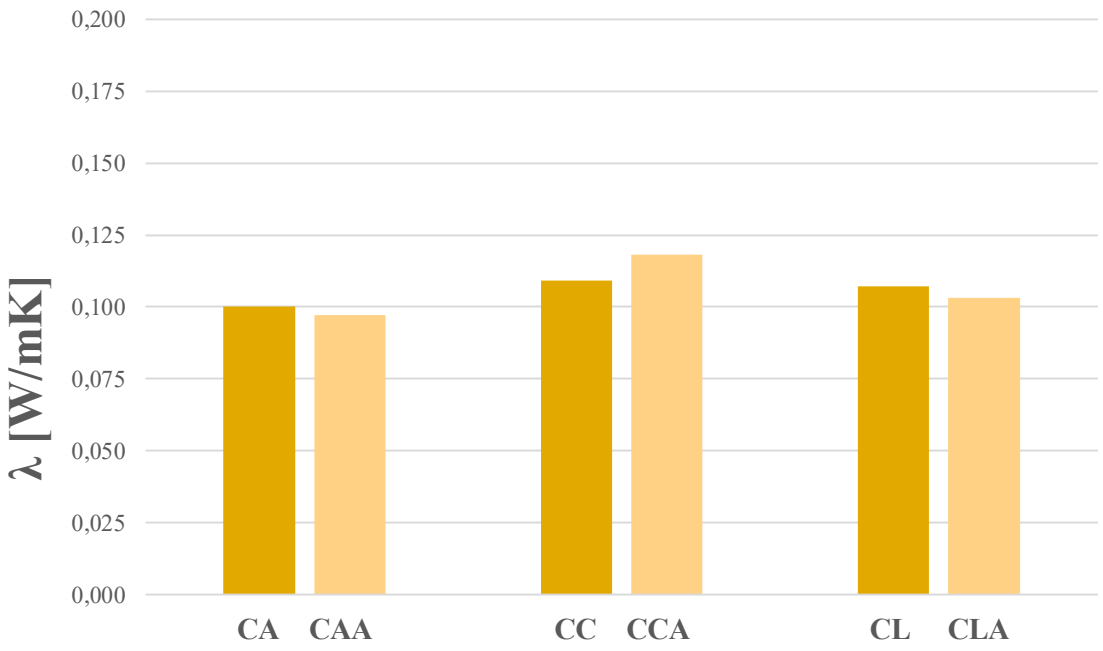


Fig.6.7 :Confronto dei valori della resistenza termica media [m^{2}K/W] in funzione delle diverse tipologie di intonaci pre invecchiamento e post invecchiamento

Dai risultati emerge che:

- In funzione dei dati ottenuti si afferma che l'aggiunta delle nanoparticelle negli intonaci non porta ad una significativa variazione della conducibilità (e della resistenza) termica né prima né dopo l'invecchiamento;
- L'invecchiamento determina una leggera diminuzione della conducibilità per gli intonaci additivati con Nanolime (CL) nell'ordine del 3%;
- L'invecchiamento determina un leggero aumento della conducibilità per gli intonaci additivati con Nanoclay (CC) nell'ordine del 7.6%;
- Tutti gli intonaci possiedono una $R \geq 0.1$ m^2K/W [39], ma ≤ 0.5 m^2K/W [40] sia pre invecchiamento che post invecchiamento.

Complessivamente l'aggiunta di nanoparticelle è poco rilevante in merito alla conducibilità termica.

- **Prove di erosione con metodo a spruzzo:**

Tipologia intonaco	Velocità di erosione D' (mm/h) pre invecchiamento	Velocità di erosione D' (mm/h) post invecchiamento	Indice di erosione I post invecchiamento	Indice di erosione I post invecchiamento
Biocalce base	3	5	1	1
Biocalce + Nanoclay	0	1	1	1
Biocalce + Nanolime	2	4	1	1

Tab. 6.10: Confronto tra i parametri relativi alla resistenza all'erosione delle diverse malte da intonaco

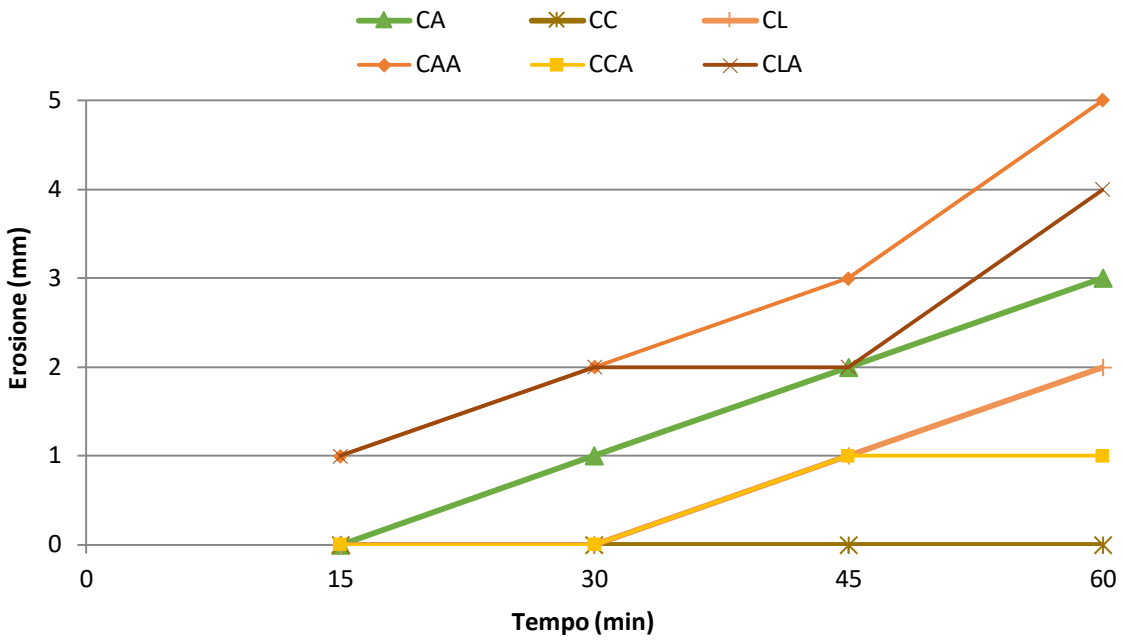


Fig.6.8: Confronto tra la profondità di erosione (mm) ed il tempo (minuti) pre invecchiamento e post invecchiamento

Dai risultati delle prove di erosione emerge che:

- La profondità di erosione dovuta allo spruzzo d'acqua è risultata molto bassa o addirittura nulla per tutte le tipologie di intonaci prima dell'invecchiamento;
- Anche dopo l'invecchiamento si mantengono basse erosioni per tutte le tipologie di intonaci
- Tutti gli intonaci sono caratterizzati da un indice di erosione *I* pari a 1 sia pre invecchiamento che post invecchiamento;
- Il "peggiore" effetto erosivo si è manifestato nel semplice intonaco a base di biocalce (CA) che prima dell'invecchiamento ha iniziato a erodersi dopo 30 minuti e che dopo l'invecchiamento ha iniziato a erodersi dopo 15 minuti, tuttavia è rimasto contenuto all'interno dei limiti dell'indice di erosione 1;
- Più efficace è stato l'intonaco a base di biocalce additivato con Nanolime ed etanolo (CL) che si è iniziato ad erodere dopo 45 minuti prima dell'invecchiamento e a 30 minuti dopo l'invecchiamento;
- Il migliore intonaco è stato quello a base di biocalce additivato con Nanoclay (CC) che non ha mostrato segni di erosione prima dell'invecchiamento e ha iniziato a erodersi dopo 45 minuti dopo l'invecchiamento. A tal proposito, si può confermare che l'aggiunta di questa tipologia di nanoparticella è la più efficace dal punto di vista della resistenza a erosione.

La prova di erosione con il metodo a spruzzo rappresenta il risultato più importante ottenuto. Questo test simula un invecchiamento accelerato per mezzo dell'azione esercitata dalla pioggia battente, riprodotta mediante lo spruzzo. Il risultato della prova permette di capire se l'intonaco può dare un contributo nel tempo nei riguardi della tutela e della conservazione di edifici storici.

Da questa prova emerge che tutte e tre le tipologie di intonaco sono adatte a proteggere la muratura storica, in particolare emerge che l'intonaco della tipologia CC presenta il grado di erosione più basso tra tutti.

Costo delle malte da intonaco:

Il costo che si deve sostenere per produrre le differenti malte da intonaco è uno dei parametri più importanti da tenere in considerazione. In questo modo, si comprende quanto incide la spesa per l'approvvigionamento delle nanoparticelle rispetto a quella per ottenere l'intonaco di base.

Nel seguito si riportano i prezzi al m^2 da sostenere per realizzare ogni tipologia di malta, trascurando i costi da sostenere per compiere la distillazione del prodotto *CaLoSil E25*, per la manodopera e per il trasporto del materiale in cantiere.
Inizialmente si riportano i costi al kg dei materiali che si sono trovati in commercio:

Materiali utilizzati per la sperimentazione	Costo €/kg
Biocalce (intonaco)	0.36
Nanoclay hydrophilic bentonite	139.20
Nanolime, CaLoSil E25	1486.00

Tab. 6.1: Costo (euro/kg) dei materiali utilizzati per la sperimentazione

Considerando che:

- la resa del prodotto *Biocalce (intonaco)* è di 13 kg/m^2 x cm di spessore (come specificato nella scheda tecnica);
- lo spessore degli intonaci è assunto pari a 2 cm, di conseguenza la resa è di 26 kg/m^2 x 2 cm di spessore.

Si ottengono i seguenti prezzi/m^2:

Tipologia di intonaco	Peso della Biocalce x 2 cm di spessore (kg)	Costo dei materiali			Prezzo totale x 2 cm di spessore (€/m^2)
		Biocalce (€)	2% Nanoclay (€)	2% Nanolime (€)	
Biocalce	26	9.36	-	-	9.36
Biocalce + Nanoclay		9.36	72.38	-	81.74
Biocalce + Nanolime		9.36	-	772.72	782.08

Tab.6.10: Prezzo totale (€/m^2) delle differenti tipologie di malte da intonaco studiate x 2 cm di spessore

Sebbene il prezzo del CL sia molto maggiore rispetto agli altri, c'è da considerare la grande quantità di etanolo che viene recuperata con il processo di distillazione semplice e che può essere riutilizzata in altro modo.

Invece, nonostante il costo al m^2 dell'intonaco additivato con Nanoclay sia più grande del CA, si deve considerare che nel tempo ci saranno meno spese da sostenere per la demolizione, la ricostruzione e la manodopera, data la maggiore resistenza all'erosione degli agenti atmosferici.

7 CONCLUSIONI

La tesi si inserisce nell'ambito della ricerca di soluzioni idonee alla conservazione degli edifici storici, perseguendo la compatibilità dell'intervento e il rispetto dell'autenticità.

Nello specifico lo studio ha analizzato intonaci additivati in massa con nanoparticelle da applicare a supporti in terra cruda, che vadano a garantire sia la protezione dagli agenti atmosferici nel tempo, sia la compatibilità fisico-meccanica col supporto.

Il lavoro è stato svolto con l'obiettivo di valutare l'effetto dell'invecchiamento artificiale sulle varie tipologie di intonaco analizzate, confrontando i risultati ottenuti con le proprietà degli stessi materiali non invecchiati.

I materiali hanno dimostrato di essere sensibili al ciclo di invecchiamento artificiale a cui sono stati sottoposti e in particolare si è osservato che l'aggiunta delle nanoparticelle ha determinato:

- Calo della resistenza a flessione e a compressione, non particolarmente grave, non essendo materiali chiamati a svolgere funzioni strutturali;
- Calo del modulo elastico, aspetto positivo in caso di applicazione su muratura storica e in particolare in terra cruda, poiché abbassandosi si avvicina al modulo elastico del supporto, assecondandolo nelle deformazioni tipiche di questi materiali;
- Un calo dell'aderenza dell'intonaco al supporto, che tuttavia rientra nei limiti di normativa;
- Una diminuzione percentuale dell'acqua assorbita, che rimane comunque superiore rispetto all'intonaco base.

  Ciò consente di sfruttare il fenomeno dell'evaporative cooling durante la stagione estiva, contribuendo a mantenere un ambiente indoor confortevole;
- Stessi risultati in termini di conducibilità termica;
- Ottimi risultati per quanto riguarda la resistenza all'erosione, in particolare in caso di aggiunta di Nanoclay.

  Questo è un aspetto assolutamente positivo, in quanto consente la formazione di uno strato efficace nella protezione della struttura dall'acqua.

  Inoltre una buona resistenza all'erosione determina una lunga vita di servizio dell'intonaco, andando a incidere positivamente sui costi di manutenzione dell'edificio nel tempo.

E’evidente che questa tipologia di intonaci non rappresenta la prima scelta qualora si debba intervenire su strutture intelaiate o nuove in muratura: in questi casi un semplice intonaco a base cementizia o di calce idraulica rappresenta indubbiamente una soluzione più pratica ed economica.

Questi ultimi materiali però si sono dimostrati incompatibili con la muratura storica o in terra cruda, a causa dei moduli elastici troppo diversi e del contenuto elevato di sali solubili nelle malte a base di cemento.

Ne consegue che la soluzione migliore per intervenire su della muratura storica è utilizzare un intonaco a base di Biocalce, magari additivato con il Nanoclay per garantire contemporaneamente protezione e compatibilità.

BIBLIOGRAFIA

[1] F. Stazi, A. Nacci, F. Tittarelli, E. Pasqualini, and P. Munafò, "An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments," *J. Cult. Herit.*, 2016, doi: 10.1016/j.culher.2015.07.009.

[2] K. Elert, R. M. García Sánchez, C. Benavides-Reyes, and F. Linares Ordóñez, "Influence of animal glue on mineralogy, strength and weathering resistance of lime plasters," *Constr. Build. Mater.*, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.261.

[3] W. D. Kingery, P. B. Vandiver, and M. Prickett, "The beginnings of pyrotechnology, part ii: Production and use of lime and gypsum plaster in the pre-pottery neolithic near east," *J. F. Archaeol.*, 1988, doi: 10.1179/009346988791974501.

[4] J. Lanas and J. I. Alvarez, "Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior," *Cem. Concr. Res.*, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00210-2.

[5] A. Moropoulou, A. S. Cakmak, G. Biscontin, A. Bakolas, and E. Zendri, "Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: The crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia," *Constr. Build. Mater.*, 2002, doi: 10.1016/S0950-0618(02)00005-3.

[6] · Book, "How hydraulic binders work-hydraulicity for beginners and the hydraulic lime family," *Researchgate.Net*, 2004.

[7] K. Mohammed Haneefa, S. Divya Rani, R. Ramasamy, and M. Santhanam, "Microstructure and geochemistry of lime plaster mortar from a heritage structure," *Constr. Build. Mater.*, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.159.

[8] O. Cazalla, C. Rodriguez-Navarro, E. Sebastian, G. Cultrone, and M. J. De la Torre, "Aging of lime putty: Effects on traditional lime mortar carbonation," *J. Am. Ceram. Soc.*, 2000, doi: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01332.x.

[9] K. Luo, J. Li, Z. Lu, J. Jiang, and Y. Niu, "Effect of nano-SiO2 on early hydration of natural hydraulic lime," *Constr. Build. Mater.*, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.269.

[10] K. Callebaut, J. Elsen, K. Van Balen, and W. Viaene, "Nineteenth century hydraulic

restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium): Natural hydraulic lime or cement?," *Cem. Concr. Res.*, 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00499-3.

[11] A. F. Gualtieri, A. Viani, and C. Montanari, "Quantitative phase analysis of hydraulic limes using the Rietveld method," *Cem. Concr. Res.*, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.02.001.

[12] "UNI EN 459-1:2015 'Calci da costruzione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità.'" .

[13] E. MATTEUZZI, "https://www.lavorincasa.it/biocalce/." .

[14] N. Ghasabkolaei, A. Janalizadeh, M. Jahanshahi, N. Roshan, and S. E. Ghasemi, "Physical and geotechnical properties of cement-treated clayey soil using silica nanoparticles: An experimental study," *Eur. Phys. J. Plus*, 2016, doi: 10.1140/epjp/i2016-16134-3.

[15] H. Niroumand, M. F. M. Zain, and M. Jamil, "The Role of Nanotechnology in Rammed Earth Walls and Earth Buildings," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.842.

[16] C. Rodriguez-Navarro, A. Suzuki, and E. Ruiz-Agudo, "Alcohol dispersions of calcium hydroxide nanoparticles for stone conservation," *Langmuir*, 2013, doi: 10.1021/la4017728.

[17] M. Lanzón, J. A. Madrid, A. Martínez-Arredondo, and S. Mónaco, "Use of diluted Ca(OH) 2 suspensions and their transformation into nanostructured CaCO 3 coatings: A case study in strengthening heritage materials (stucco, adobe and stone)," *Appl. Surf. Sci.*, 2017, doi: 10.1016/j.apsusc.2017.02.248.

[18] J. Otero, V. Starinieri, A. E. Charola, and G. Taglieri, "Influence of different types of solvent on the effectiveness of nanolime treatments on highly porous mortar substrates," *Constr. Build. Mater.*, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117112.

[19] P. I. Girginova, C. Galacho, R. Veiga, A. Santos Silva, and A. Candeias, "Study of mechanical properties of alkaline earth hydroxide nanoconsolidants for lime mortars," *Constr. Build. Mater.*, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117520.

[20] V. E. García-Vera, A. J. Tenza-Abril, A. M. Solak, and M. Lanzón, "Calcium hydroxide nanoparticles coatings applied on cultural heritage materials: Their influence on physical characteristics of earthen plasters," *Appl. Surf. Sci.*, 2020, doi: 10.1016/j.apsusc.2019.144195.

[21] V. Daniele, G. Taglieri, and R. Quaresima, "The nanolimes in Cultural Heritage conservation: Characterisation and analysis of the carbonatation process," *J. Cult. Herit.*, 2008, doi: 10.1016/j.culher.2007.10.007.

[22] P. López-Arce, L. S. Gomez-Villalba, L. Pinho, M. E. Fernández-Valle, M. Á. de Buergo, and R. Fort, "Influence of porosity and relative humidity on consolidation of dolostone with calcium hydroxide nanoparticles: Effectiveness assessment with non-destructive techniques," *Mater. Charact.*, 2010, doi: 10.1016/j.matchar.2009.11.007.

[23] E. Hansen *et al.*, "A review of selected inorganic consolidants and protective treatments for porous calcareous materials," *Stud. Conserv.*, 2003, doi: 10.1179/sic.2003.48.supplement-1.13.

[24] L. Dei and B. Salvadori, "Nanotechnology in cultural heritage conservation: nanometric slaked lime saves architectonic and artistic surfaces from decay," *J. Cult. Herit.*, 2006, doi: 10.1016/j.culher.2006.02.001.

[25] B. Salvadori and L. Dei, "Synthesis of Ca(OH)2 nanoparticles from diols," *Langmuir*, 2001, doi: 10.1021/la0015967.

[26] A. Tabarsa, N. Latifi, C. L. Meehan, and K. N. Manahiloh, "Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay – A sustainable material for construction," *Constr. Build. Mater.*, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.096.

[27] H. Varela, G. Barluenga, and I. Palomar, "Influence of nanoclays on flowability and rheology of SCC pastes," *Constr. Build. Mater.*, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118285.

[28] F. Stazi, C. Urlietti, C. Di Perna, G. Chiappini, M. Rossi, and F. Tittarelli, "Thermal and mechanical optimization of nano-foams for sprayed insulation," *Constr. Build. Mater.*, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.177.

[29] M. Collepardi, J. J. O. Olagot, F. Simonelli, and R. Troli, "Il calcestruzzo vulnerabile:

prevenzione, diagnosi del degrado e restauro," no. March, pp. 25–27, 2005.

[30] E. Hamard, J. C. Morel, F. Salgado, A. Marcom, and N. Meunier, "A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture," *J. Cult. Herit.*, 2013, doi: 10.1016/j.culher.2012.04.005.

[31] "UNI EN 1015-12:2016 'Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive of hardened rendering and plastering mortars on substrates.'" .

[32] "UNI EN 12504-4:2005 'Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity.'" .

[33] "UNI EN 1015-11:2019 'Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.'" .

[34] "UNI EN 16302:2013 'Conservation of cultural heritage - Test methods - Measurement of water absorption by pipe method.'" .

[35] Reunion Internationale des Laboratoires D'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions (RILEM), "Recommandations provisoires de la commission 25-PEM Protection et érosion des monuments Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement, in: Matériaux de Constructions, vol. 13, No. 75, RILEM." Paris, 1980.

[36] D. Vandevoorde, M. Pamplona, O. Schalm, Y. Vanhellemont, V. Cnudde, and E. Verhaeven, "Contact sponge method: Performance of a promising tool for measuring the initial water absorption," *J. Cult. Herit.*, 2009, doi: 10.1016/j.culher.2008.10.002.

[37] M. Mattone, S. Rescic, F. Fratini, and R. M. Del Fà, "Experimentation of Earth-Gypsum Plasters for the Conservation of Earthen Constructions," *Int. J. Archit. Herit.*, 2017, doi: 10.1080/15583058.2017.1290850.

[38] "ISO 8301:1991 'Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus.'"

[39] "UNI EN 12664:2002 'Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Dry and moist products of medium and low thermal resistance.'" .

[40] “UNI EN 12667:2002 ‘Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Product of high and medium thermal resistance.’” .

[41] “New Zealand Standard, NZS 4298:1998, Materials and workmanship for earth buildings - Appendix D, Erosion test, Pressure spray method.”

[42] G. Ciamician, “Dipartimento di Chimica ‘G. Ciamician.’” p. 40126, 2012.

[43] “UNI EN 998-1:2016 ‘Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar.’” .

[44] N. Farzadnia, A. A. Abang Ali, R. Demirboga, and M. P. Anwar, “Effect of halloysite nanoclay on mechanical properties, thermal behavior and microstructure of cement mortars,” *Cem. Concr. Res.*, 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.03.005.

[45] P. Maravelaki-Kalaitzaki, A. Bakolas, I. Karatasios, and V. Kilikoglou, “Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete,” *Cem. Concr. Res.*, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.09.001.

[46] J. Wang *et al.*, “Impacts of the water absorption capability on the evaporative cooling effect of pervious paving materials,” *Build. Environ.*, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.01.033.

[47] M. M. Barbero-Barrera, N. Flores Medina, and C. Guardia-Martín, “Influence of the addition of waste graphite powder on the physical and microstructural performance of hydraulic lime pastes,” *Constr. Build. Mater.*, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.156.

[48] F. Stazi, M. Serpilli, G. Chiappini, M. Pergolini, E. Fratalocchi, and S. Lenci, “Experimental study of the mechanical behaviour of a new extruded earth block masonry,” *Constr. Build. Mater.*, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118368.

[49] J. Bochen, S. Gil and J. Szwabowski
"Influence of ageing process on porosity changes of the external plasters" Cement & Concrete Composites 27 (2005) 769–775

ALLEGATI

TON GRUPPE®
Via Nazionale 15 – Reichstraße 15
I-39044 Laghetti-Egna | Laag-Neumarkt (BZ)
T +39 0471 888000 | F +39 0471 888140
info@ton-gruppe.it | www.ton-gruppe.it

Scheda Tecnica di Prodotto
KRIOTON® I 20

v.07-17.10

cod. prodotto GEMA12 – GEMA12NR
GEMA122L – GEMA122LNR

Blocco semipieno per muratura di tamponamento in speciale miscela di terra cruda composta di argilla italiana e fibre vegetali naturali (paglia, canapa, pula di riso), di dimensioni 215x230x115 mm, peso specifico apparente di 1450 kg/m³, conduttività termica 0,248 W / m K, percentuale di foratura 22%, schermante contro i campi elettromagnetici, ecosostenibile e riciclabile, regolatore termoigrometrico, rientrante nella classe di reazione al fuoco Euroclasse A1, assorbimento massimo umidità del 4,69% in peso, in opera a giunti verticali e orizzontali con boiacca d'argilla (blocchi rettificati) o con letto di malta in argilla (blocchi non rettificati - NR). I blocchi sono disponibili nella versione con entrambe le superfici laterali lisce (cod. GEMA122L e cod. GEMA122LNR) e in quella con un lato liscio ed uno con nervature verticali (cod. GEMA12 e cod. GEMA12NR). Il lato nervato va utilizzato per migliorare l'aggrappaggio dell'intonaco per esterno. I blocchi possono essere tagliati e lavorati in maniera precisa con gli utensili per legno, quali seghe manuali e a nastro, punte e frese.

Dati Tecnici	
Forma	Blocchi, rettificati o non rettificati
Colore	Grigio ocra
Forma degli spigoli	Bordi dritti, assenza di spigoli vivi
Impiego previsto	Pareti di tamponamento e divisorie, contropareti
Dimensioni (l x h x sp.)	215 x 230 x 115 mm
Peso specifico apparente	1450 kg/m³
Umidità intrinseca	0 %
Assorbimento umidità	$w\%_{max}$ = 4,69
Conduttività termica dichiarata	λ_D=0,248 W/m K
Calore specifico	1,1 kJ/kg K
Dilatazione termica	8,5 x 10^{-6} °C^{-1}
Resistenza al fuoco	EI 30
Reazione al fuoco	Euroclasse A1
Resistenza a flessione in 3 punti sul pieno	4 MPa
Resistenza a compressione	5,3 MPa
Abbattimento acustico*	R_w = 43 dB
Resistenza alla diffusione del vapore	μ=10
Spessore d'aria equivalente	S_d= 1,15 m

- ✓ Riduce i consumi per il riscaldamento e il raffrescamento del 30%
- ✓ Migliora l'inerzia termica
- ✓ Accumula il calore e lo distribuisce in maniera uniforme
- ✓ Regolazione naturale dell'umidità
- ✓ Evita la formazione di muffa
- ✓ Riduce l'appannamento dei vetri di finestre e vetrate
- ✓ Neutralizza gli odori sgradevoli
- ✓ Soluzione ideale anche per bagni e cucine
- ✓ Riduce l'elettrosmog del 98%**
- ✓ Non trattiene la polvere e riduce lo sviluppo degli acari
- ✓ Ecologico e riciclabile al 100%
- ✓ Basso consumo di energia primaria in fase di produzione
- ✓ Lavorazione semplice e veloce

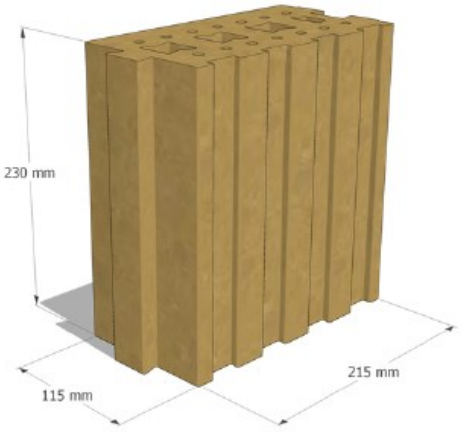
* Valore misurato in laboratorio su parete ad una testa intonacata su entrambi i lati (spessore intonaco 1,5 cm)
** Valore misurato su una parete dello spessore di 12 cm ed una frequenza di 2 GHz

Caratteristiche del prodotto	
Ciclo produttivo	Sono utilizzate diverse fonti energetiche (termica, elettrica e rinnovabile) con tecnologia di recupero del calore dai fumi caldi di vapore acqueo. L'essiccazione è effettuata tramite la luce solare e il calore recuperato.
Materie prime	Le materie prime utilizzate sono l'argilla (>70%) e le fibre vegetali (<30%). L'argilla proviene da cava di scarto a 400m dallo stabilimento di produzione, i prodotti sono al 100% naturali e senza trattamenti. I prodotti imperfetti e gli scarti vengono recuperati e rimessi in impasto.
Emissioni	Il sistema di controllo emissioni rispetta la campionatura di legge e vengono effettuate misurazioni agli sfiati dell'essiccatoio. Gli strumenti fissi non sono necessari, trattandosi di aria umida in uscita.
Utilizzo in opera	Il prodotto è caratterizzato da una semplice posa in opera, non necessita dell'utilizzo di attrezzi speciali. Facilità di lavorazione e di ripresa in caso di errori nel processo d'impiego. La lavorazione non comporta alcun rischio per la salute, non vengono prodotte polveri nocive o irritanti. Non esibisce modifiche nella composizione per invecchiamento. I leganti impiegati sono ecologici e non nocivi.
Smaltimento	Lo smaltimento non è causa di nessun problema; il materiale, se unito ad altri componenti naturali, può essere rimesso in natura e non rappresenta in sé un rifiuto.

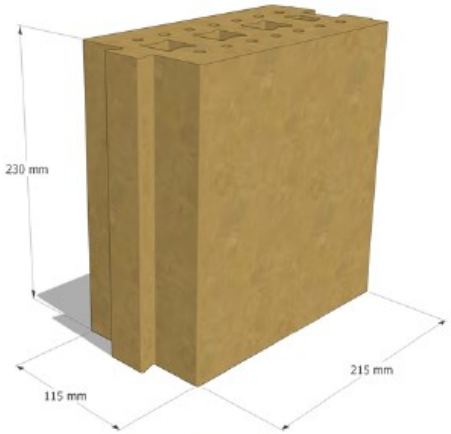
TON GRUPPE®
Via Nazionale 15 – Reichstraße 15
I-39044 Laghetti-Egna | Laag-Neumarkt (BZ)
T +39 0471 888000 | F +39 0471 888140
info@ton-gruppe.it | www.ton-gruppe.it

Dato	Per pezzo	Per mq di parete	Per mc di parete	Per pallet
Consumo	-	20 pz/m²	174 pz/m³	100 pz/pallet
Peso	8,3 kg	167 kg/m²	-	840 kg/pallet

Forma e dimensioni



Krioton® 120 con lato nervato
(cod. GEMA12 e cod. GEMA12NR)



Krioton® 120 con lato liscio
(cod. GEMA122L e cod. GEMA122LNR)

La presente scheda tecnica sostituisce e annulla le precedenti versioni. Le informazioni della presente scheda tecnica corrispondono alle nostre attuali conoscenze ed esperienze. Da esse, tuttavia, non possono derivare nostre responsabilità e nessuna rivalsa. Essi non esimono in linea di principio il cliente dal controllare autonomamente il prodotto sotto il profilo della sua idoneità per il tipo di impiego previsto. I prodotti Ton Gruppe® sono soggetti a continui controlli di qualità sia sulle materie prime sia sul prodotto finito. I nostri tecnici e consulenti sono a Vostra disposizione per informazioni, chiarimenti e quesiti sull'impiego e la posa dei nostri prodotti, come pure per sopralluoghi in cantiere e dimostrazioni pratiche. Le schede tecniche aggiornate sono reperibili in internet, sul sito www.ton-gruppe.it o possono essere richieste presso i nostri uffici. Per richiedere ulteriori dati tecnici non contemplati nella presente scheda contattare direttamente l'Ufficio Tecnico al numero telefonico 0471.888000 o via email a ufficiotecnico@ton-gruppe.it.

Biocalce® Intonaco

Intonaco naturale certificato, eco-compatibile, di pura calce naturale NHL 3.5 a norma EN 459-1, per intonacature altamente traspiranti, ideale nel GreenBuilding e nel Restauro Storico. Contiene solo materie prime di origine rigorosamente naturale e minerali riciclati. A ridotte emissioni di CO_2 e bassissime emissioni di sostanze organiche volatili. A ventilazione naturale attiva nella diluizione degli inquinanti indoor, batteriostatico e fungistatico naturale. Riciclabile come inerte a fine vita.

Biocalce® Intonaco è idoneo per l'intonacatura traspirante e protettiva di murature portanti e di tamponamento in laterizio, mattone, tufo, pietra e miste interne ed esterne.

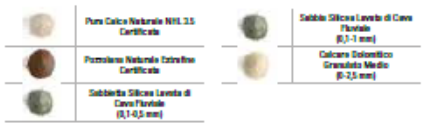
GREENBUILDING RATING®

Biocalce® Intonaco
- Categoria: Inorganici minerali naturali
- Malte, intonaci e decorazione naturale

PLUS PRODOTTO

- Naturale, poroso e altamente traspirante lascia il muro libero di respirare
- Batteriostatico e fungistatico naturale classificato B+ e F+ (metodo CSTB)
- Protegge e mantiene la muratura sana nel tempo

ELEMENTI NATURALI



CAMPI D'APPLICAZIONE

Destinazione d'uso
Intonacatura traspirante protettiva di murature portanti e di tamponamento in laterizio, mattone, tufo, pietra e miste interne ed esterne. Biocalce® Intonaco è particolarmente adatto per intonacare nell'Edilizia del Benessere® dove l'origine rigorosamente naturale dei suoi ingredienti garantisce il rispetto dei parametri fondamentali di porosità, igroscopicità e traspirabilità richiesti.
Biocalce® Intonaco è idoneo per intonacature nel Restauro Storico la scelta di ingredienti della tradizione come calce naturale, pozzolana naturale, pietra, marmo e granito sapientemente dosati garantisce interventi conservativi nel rispetto delle strutture esistenti e dei materiali originari.

Non utilizzare
Su supporti sporchi, decoesi, polverulenti, vecchie pitture o rasature. Asportare dalle superfici le incrostazioni saline interstiziali.

INDICAZIONI D'USO

Preparazione dei supporti
Il fondo deve essere pulito e consistente, privo di parti friabili, di polvere e muffe. Eseguire la pulizia delle superfici con idrosabbiatura o sabbiatura e successivo idrolavaggio a pressione per rimuovere completamente residui di precedenti lavorazioni (scialbi, vecchie rasature, concrezioni saline, ecc.) che possano pregiudicare l'adesione. Asportare la malta d'allettamento inconsistente tra i conci murari. Utilizzare Biocalce® Muratura con la tecnica del rincoccio e/o del cuci-scuci per ricostruire le parti mancanti della muratura in modo da renderla planare. Bagnare sempre i supporti prima dell'applicazione dell'intonaco.

* ÉMISSION DANS L'AIR INTÉRIEUR Information sur le niveau d'émission de substances volatiles dans l'air intérieur, présentant un risque de toxicité par inhalation, sur une échelle de classe allant de A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions).

KERAKOLL
The GreenBuilding Company

Biocalce® Intonaco Code: B602 2020/01

INDICAZIONI D'USO

Preparazione
Applicazione manuale: Biocalce® Intonaco si prepara impastando 1 sacco da 25 kg con circa 5,1 litri d'acqua pulita in betoniera a tazza. L'impasto si ottiene versando prima l'acqua nella betoniera pulita ed aggiungendo poi tutta la polvere in unica soluzione. Attendere che il prodotto raggiunga la giusta consistenza in corso di miscelazione. Inizialmente (1 – 2 minuti) il prodotto appare asciutto; in questa fase non aggiungere acqua. Miscelare in continuo per 4 – 5 minuti fino ad ottenere una malta omogenea, soffice e senza grumi. Usare tutto il prodotto preparato senza recuperarlo nella successiva miscelata. Tenere il materiale immagazzinato in luoghi protetti dal caldo estivo o dal freddo invernale. Impiegare acqua corrente non soggetta all'influenza delle temperature esterne.
La qualità della malta, garantita dalla sua origine rigorosamente naturale, sarà compromessa dall'aggiunta di qualsiasi dose di cemento.

Applicazione
Applicazione meccanizzata: Biocalce® Intonaco, grazie alla sua particolare finezza e plasticità tipica delle migliori calci idrauliche naturali, è ideale per applicazioni con intonacatrice. L'eccellente coesione della pasta allo stato fresco ne ha permesso la certificazione WTA con *l'estensione all'applicazione meccanizzata*. Le prove di validazione di Biocalce® Intonaco alle specifiche WTA sono state eseguite con intonacatrice attrezzata con i seguenti accessori: Miscelatore, Statore 30, Rotore 30+, Turbostatore, Turborotore, tubo portamateriale 25x37 mm, lunghezza metri 10/20 e lancia spruzzatrice.
Biocalce® Intonaco si applica facilmente a cazzuola o a spruzzo come un intonaco tradizionale. Preparare il fondo eseguendo, se necessario, il rincoccio al fine di regolarizzare i supporti. Applicare il rinzaffo, formare le fasce di livello, intonacare, staggiare e frattazzare in fase di indurimento.
Biocalce® Intonaco va posto in opera rispettando la regola d'arte in passate successive di spessore massimo di 2 cm anche se il prodotto sostiene spessori maggiori. Questo sistema tradizionale di applicazione evita la formazione di microfessure. I riporti d'intonaco su rinzaffo o precedenti passate devono avvenire quando lo strato sottostante è indurito. Si può ottenere la finitura desiderata in funzione della lavorazione scelta. Curare la maturazione del prodotto indurito inumidendolo nelle prime 24 ore.

Pulizia
Biocalce® Intonaco è un prodotto naturale, la pulizia degli attrezzi si effettua con sola acqua prima dell'indurimento del prodotto.

ALTRE INDICAZIONI

Nell'intonacatura di murature d'epoca miste, oppure in muratura con zone tamponate in materiale diverso è consigliato l'inserimento di una rete portaintonaco zincata o sintetica antialcalina nell'intonaco Biocalce® Intonaco al fine di prevenire possibili fenomeni fessurativi.
Qualora si debba applicare Biocalce® Intonaco su sottofondi compatti o inassorbenti applicare sempre preventivamente Biocalce® Rinzaffo e verificarne l'avvenuta adesione.
Prevedere, in esterno, un distacco da pavimenti, camminatoi o superfici orizzontali in genere onde evitare fenomeni di adescamento capillare.
I muri realizzati con blocchi in calcestruzzo cellulare vanno preparati in ottemperanza alle prescrizioni dei produttori stessi: non bagnare né rinzaffare dette superfici; prepararle prima dell'intonacatura con un'applicazione a pennello o rullo del consolidante-uniformante di assorbimento Biocalce® Fondo.
Inoltre, sempre sui muri in cemento cellulare, prevedere l'inserimento della rete di armatura Rinforzo V 50 all'interno delle due mani di rasante realizzate con uno dei prodotti a scelta tra Biocalce® Intonachino Fino o Granello.

VOCE DI CAPITOLATO

Nell'Edilizia del Benessere® si realizzerà un intonaco ad altissima porosità, igroscopicità e traspirabilità per muri interni ed esterni con malta di pura calce idraulica naturale NHL 3.5, pozzolana naturale extrafine e inerti di sabbia silicea e calcare dolomitico in curva granulometrica 0 – 2,5 mm, GreenBuilding Rating® 5 (tipo Biocalce® Intonaco). Le caratteristiche richieste, ottenute esclusivamente con l'impiego di materie prime di origine rigorosamente naturale, garantiranno un'altissima traspirabilità dell'intonaco (coefficiente di resistenza al vapore acqueo ≤ 6), un'elevata porosità della malta indurita (≥ 40%), una naturale conducibilità termica (pari a 0,54 W/(m K)) ed una notevole aria occlusa in fase d'impasto (≥ 20%). L'intonaco naturale dovrà soddisfare anche i requisiti della norma EN 998/1 – GP / CS II / W1, adesione 0,2 N/mm², reazione al fuoco classe A1. L'intonaco avrà uno spessore non superiore ai 20 mm per passata, fasce di livello, finitura a rustico sotto staggia, riquadratura di spigoli e angoli sporgenti, esclusi oneri per ponteggi fissi. L'applicazione sarà da eseguire a mano o con intonacatrice.
Resa Biocalce® Intonaco: ≈ 13 kg/m² per cm di spessore.

DATI TECNICI SECONDO NORMA DI QUALITÀ KERAKOLL

Tipo di malta	malta per scopi generali per intonaci interni/esterni (GP)	EN 998-1
Natura chimica del legante	pura Calce Idraulica Naturale NHL 3.5	EN 459-1
Intervallo granulometrico	0 – 2,5 mm	EN 1015-1
Massa volumica apparente della polvere	≈ 1,28 kg/dm³	UEAtc
Conservazione	≈ 12 mesi nella confezione originale in luogo asciutto	
Confezione	sacchi 25 kg	
Acqua d'impasto	≈ 5,1 ℓ / 1 sacco 25 kg	
Consistenza malta fresca 0'	≈ 174 mm	EN 1015-3
Massa volumica apparente della malta fresca	≈ 1,61 kg/dm³	EN 1015-6
Massa volumica apparente della malta indurita essiccata	≈ 1,4 kg/dm³	EN 1015-10
pH impasto	≥ 12	
Aria occlusa / Aria occlusa intonacatrice	≥ 20%	EN 413-2
Temperature limite di applicazione	da +5 °C a +35 °C	
Spessore max per strato	≈ 2 cm	
Resa	≈ 13 kg/m² per cm di spessore	

Rilevazione dati a +20 ± 2 °C di temperatura, 65 ± 5% U.R. e assenza di ventilazione. Possono variare in funzione delle specifiche condizioni di cantiere.

KERAKOLL
The GreenBuilding Company

PERFORMANCE

QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) VOC - EMISSIONI SOSTANZE ORGANICHE VOLATILI			
Conformità	EC 1 plus GEV-Emicode		Cert. GEV 2752/11.01.02
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) ACTIVE - DILUIZIONE INQUINANTI INDOOR *			
	Flusso	Diluizione	
Toluene	253 µg m³/h	+69%	metodo JRC
Pinene	347 µg m³/h	+144%	metodo JRC
Formaldeide	6437 µg m³/h	+106%	metodo JRC
Biossido di Carbonio (CO_2)	398 mg m³/h	+467%	metodo JRC
Umidità (Aria Umida)	43 mg m³/h	+100%	metodo JRC
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) BIOACTIVE - AZIONE BATTERIOSTATICA **			
Enterococcus faecalis	Classe B+ proliferazione assente		metodo CSTB
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) BIOACTIVE - AZIONE FUNGISTATICA **			
Penicillum brevicompactum	Classe F+ proliferazione assente		metodo CSTB
Cladosporium sphaerospermum	Classe F+ proliferazione assente		metodo CSTB
Aspergillus niger	Classe F+ proliferazione assente		metodo CSTB
HIGH-TECH			
Coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo (µ)	≤ 6		EN 1015-19
Assorbimento d'acqua per capillarità	categoria W1		EN 998-1
Assorbimento idrico capillare W24	≥ 1 kg/m²		EN 1015-18
Profondità d'infiltrazione dell'acqua 24 h	≥ 5 mm		EN 1015-18
Porosità	≥ 40%		WTA 2-2-91/D
Reazione al fuoco	classe A1		EN 13501-1
Resistenza a compressione a 28 gg	categoria *CS II*		EN 998-1
Aderenza al supporto (laterizio)	≥ 0,2 N/mm² - **FP: B**		EN 1015-12
Conducibilità termica ($\lambda_{10,dry}$)	0,54 W/(m K) (valore tabulato)		EN 1745
Calore specifico (Cp)	1,45 (10^6 J/m³K) misurato con analizzatore di scambio di calore		
Durabilità (al gelo-disgelo)	valutazione basata sulle disposizioni valide nel luogo di utilizzo previsto della malta		EN 998-1
Indice di radioattività	I = 0,145		UNI 10797/1999
LEED®			
LEED® Contributo Punti ***	Punti LEED®		
MR Credito 4 Contenuto di Riciclati	fino a 2		GBC Italia
MR Credito 5 Materiali Regionali	fino a 2		GBC Italia
QI Credito 4.1 Materiali Basso Emissivi	fino a 1		GBC Italia

Rilevazione dati a +20 ± 2 °C di temperatura, 65 ± 5% U.R. e assenza di ventilazione. Possono variare in funzione delle specifiche condizioni di cantiere.

* *Test eseguiti secondo metodo JRC – Joint Research Centre – Commissione Europea, Ispra (VA) – per la misura dell'abbattimento delle sostanze inquinanti negli ambienti indoor (Progetto Indoortron). Flusso e velocità rapportati all'intonaco cementizio standard (1,5 cm).*

** *Test eseguiti secondo metodo CSTB, Contaminazione batterica e fungina*

*** *LEED® è un sistema di misura della prestazioni ambientali pensato per edifici commerciali, istituzionali o residenziali sia nuovi sia esistenti che si basa su principi ambientali ed energetici comunemente riconosciuti ed accettati dalla comunità scientifica internazionale. Il sistema di valutazione della sostenibilità edilizia LEED® è un sistema volontario. Per il calcolo del punteggio fare riferimento alle prescrizioni contenute nel Manuale LEED® Italia (edizione 2009).*
© 2010, Green Building Council Italia, U.S. Green Building Council, tutti i diritti riservati

AVVERTENZE

- **Prodotto per uso professionale**
- attenersi alle norme e disposizioni nazionali
- proteggere le superfici dal sole battente e dal vento
- curare la stagionatura inumidendo il prodotto indurito nelle prime 24 ore
- in caso di necessità richiedere la scheda di sicurezza
- per quanto non previsto consultare il Kerakoll Worldwide Global Service 0536.811.516 – globalservice@kerakoll.com

Biocalce® Intonaco Code: B602 2012/01

I dati relativi al Rating sono riferiti al GreenBuilding Rating® Manual 2012. Le presenti informazioni sono aggiornate a Novembre 2019 (ref. GBR Data Report – 12.19); si precisa che esse possono essere soggette ad integrazioni e/o variazioni nel tempo da parte di KERAKOLL SpA; per tali eventuali aggiornamenti, si potrà consultare il sito www.kerakoll.com. KERAKOLL SpA risponde, pertanto, della validità, attualità ed aggiornamento delle proprie informazioni solo se estrapolate direttamente dal suo sito. La scheda tecnica è redatta in base alle nostre migliori conoscenze tecniche e applicative. Non potendo tuttavia intervenire direttamente sulle condizioni dei cantieri e sull'esecuzione dei lavori, esse rappresentano indicazioni di carattere generale che non vincolano in alcun modo la nostra Compagnia. Si consiglia pertanto una prova preventiva al fine di verificare l'idoneità del prodotto all'impiego previsto.

KERAKOLL S.p.a.
Via dell'Artigianato, 9 - 41049 Sassuolo (MO) Italy
Tel +39 0536 816 511 - Fax +39 0536 816 581
info@kerakoll.com - www.kerakoll.com

SCHEDA DI DATI DI SICUREZZA

secondo il Regolamento (CE) Num. 1907/2006

Versione 6.1
Data di revisione 16.04.2019
Data di stampa 29.01.2020

SEZIONE 1: identificazione della sostanza/miscela e della società/impresa

1.1 Identificatori del prodotto

Nome del prodotto	:	Nanoclay, hydrophilic bentonite
Codice del prodotto	:	682659
Marca	:	Aldrich
Num. REACH	:	Per questa sostanza non è disponibile un numero di registrazione in quanto la sostanza o i suoi usi sono esentati da registrazione, il tonnellaggio annuale non richiede registrazione oppure la registrazione è prevista ad una scadenza successiva.
N. CAS	:	1302-78-9

1.2 Usi identificati pertinenti della sostanza o della miscela e usi sconsigliati

Usi identificati	:	Chimici di laboratorio, Produzione di sostanze chimiche

1.3 Informazioni sul fornitore della scheda di dati di sicurezza

Società	:	Merck Life Science S.r.l. Via Monte Rosa 93 I-20149 MILANO
Telefono	:	+39 02 3341 7340
Fax	:	+39 02 3801 0737
Indirizzo e-mail	:	serviziotecnico@merckgroup.com

1.4 Numero telefonico di emergenza

Telefono per le emergenze	:	800-789-767 (CHEMTREC Italia) +39-02-4555-7031 (CHEMTREC chiamate internazionali) +39 02-6610-1029 (Centro Antiveleni Niguarda Ca' Granda - Milano)

SEZIONE 2: identificazione dei pericoli

2.1 Classificazione della sostanza o della miscela

Sostanza o miscela non pericolosa secondo la regolamentazione (CE) N. 1272/2008.

2.2 Elementi dell'etichetta

Sostanza o miscela non pericolosa secondo la regolamentazione (CE) N. 1272/2008.

2.3 Altri pericoli

Questa sostanza/miscela non contiene componenti considerati sia persistenti, bioaccumulabili che tossici (PBT), oppure molto persistenti e molto bioaccumulabili (vPvB) a concentrazioni di 0.1% o superiori.

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

MERCK

SEZIONE 3: composizione/informazioni sugli ingredienti

3.1 Sostanze

Sinonimi	:	Montmorillinite clay, bentonite Nanomer® PGV Nanomer® clay
Formula	:	H2Al2O6Si
Peso Molecolare	:	180,1 g/mol
N. CAS	:	1302-78-9
N. CE	:	215-108-5

Secondo la normativa applicabile non è necessario dichiarare alcun componente.

SEZIONE 4: misure di primo soccorso

4.1 Descrizione delle misure di primo soccorso

Se inalato
Se viene respirato, trasportare la persona all'aria fresca. Se non respira, somministrare respirazione artificiale.

In caso di contatto con la pelle
Lavare con sapone e molta acqua.

In caso di contatto con gli occhi
Come precauzione sciacquare gli occhi con acqua.

Se ingerito
Non somministrare alcunchè a persone svenute. Sciacquare la bocca con acqua.

4.2 Principali sintomi ed effetti, sia acuti che ritardati
I più importanti sintomi ed effetti conosciuti sono descritti nella sezione 2.2 sull'etichettatura e/o nella sezione 11.

4.3 Indicazione dell'eventuale necessità di consultare immediatamente un medico e di trattamenti speciali
Nessun dato disponibile

SEZIONE 5: misure antincendio

5.1 Mezzi di estinzione

Mezzi di estinzione idonei
Utilizzare acqua nebulizzata, schiuma alcool resistente, prodotti chimici asciutti o anidride carbonica.

5.2 Pericoli speciali derivanti dalla sostanza o dalla miscela
Ossido di alluminio, ossidi di silicio

5.3 Raccomandazioni per gli addetti all'estinzione degli incendi
Se necessario, indossare un respiratore autonomo per spegnere l'incendio.

5.4 Ulteriori informazioni
Nessun dato disponibile

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

SEZIONE 6: misure in caso di rilascio accidentale

6.1 Precauzioni personali, dispositivi di protezione e procedure in caso di emergenza
Evitare la formazione di polvere. Evitare di respirare vapori/nebbia/gas.
Vedere Sezione 8 per i dispositivi di protezione individuale.

6.2 Precauzioni ambientali
Non lasciar penetrare il prodotto negli scarichi.

6.3 Metodi e materiali per il contenimento e per la bonifica
Spazzare e spalare. Conservare in contenitori adatti e chiusi per lo smaltimento.

6.4 Riferimento ad altre sezioni
Per lo smaltimento riferirsi alla sezione 13.

SEZIONE 7: manipolazione e immagazzinamento

7.1 Precauzioni per la manipolazione sicura
Adottare un'adeguata ventilazione nei luoghi dove si sviluppano le polveri.Normali misure di prevenzione antincendio.
Per le precauzioni vedere la sezione 2.2.

7.2 Condizioni per lo stoccaggio sicuro, comprese eventuali incompatibilità
Immagazzinare in luogo fresco. Tenere il contenitore ermeticamente chiuso in un ambiente secco e ben ventilato.

7.3 Usi finali particolari
A parte gli usi descritti nella sezione 1.2 non sono contemplati altri usi specifici.

SEZIONE 8: controllo dell'esposizione/protezione individuale

8.1 Parametri di controllo

Componenti con limiti di esposizione
Non contiene sostanze con valore limite di esposizione professionale.

8.2 Controlli dell'esposizione

Controlli tecnici idonei
Prassi generale di igiene industriale.

Protezione individuale

Protezioni per occhi/volto
Utilizzare dispositivi per la protezione oculare testati e approvati secondo i requisiti di adeguate norme tecniche come NIOSH (USA) o EN 166 (EU)

Protezione della pelle
Manipolare con guanti. I guanti devono essere controllati prima di essere usati. Usare una tecnica adeguata per la rimozione dei guanti (senza toccare la superficie esterna del guanto) per evitare il contatto della pelle con questo prodotto Smaltire i guanti contaminati dopo l'uso in accordo con la normativa vigente e le buone pratiche di laboratorio. Lavare e asciugare le mani.

I guanti di protezione selezionati devono soddisfare le esigenze della direttiva (UE) 2016/425 e gli standard EN 374 che ne derivano.

Pieno contatto
Materiale: Gomma nitrilica
spessore minimo: 0,11 mm
Tempo di permeazione: 480 min
Materiale testato:Dermatril® (KCL 740 / Aldrich Z677272, Taglia M)

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

Contatto da spruzzo
Materiale: Gomma nitrilica
spessore minimo: 0,11 mm
Tempo di permeazione: 480 min
Materiale testato:Dermatril® (KCL 740 / Aldrich Z677272, Taglia M)

Fonte dei dati: KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, tel. +49 (0)6659 87300, e-mail sales@kcl.de, metodo di prova: EN374
Se usato in soluzione, o mischiato con altre sostanze, e in condizioni diverse da quelle menzionate nella norma EN 374, contattare il fornitore di guanti approvati dalla CE. Questa raccomandazione vale a titolo di consiglio e dev'essere valutata da un igienista industriale e da un responsabile della sicurezza al corrente della situazione specifica dell'uso previsto dai nostri clienti. Non si deve interpretare come un'approvazione di uno specifico scenario di esposizione.

Protezione fisica
Scegliere una protezione fisica secondo le sue caratteristiche, alla concentrazione, alla quantità di sostanze pericolose e al tipo di posto di lavoro., Il tipo di attrezzatura di protezione deve essere selezionato in funzione della concentrazione e la quantità di sostanza pericolosa al posto di lavoro.

Protezione respiratoria
Non è richiesta la protezione delle vie respiratorie. Se se desidera la pr antipolvere con filtri di tipo P1 (EN 143). Utilizzare respiratori e componenti testati e approvati dai competenti organismi di normazione, quali il NIOSH (USA) il CEN (UE).

Controllo dell'esposizione ambientale
Non lasciar penetrare il prodotto negli scarichi.

SEZIONE 9: proprietà fisiche e chimiche

9.1 Informazioni sulle proprietà fisiche e chimiche fondamentali

a)	Aspetto	Stato fisico: granuli Colore: grigio, beige
b)	Odore	Nessun dato disponibile
c)	Soglia olfattiva	Nessun dato disponibile
d)	pH	6,0 - 9,0
e)	Punto di fusione/punto di congelamento	Nessun dato disponibile
f)	Punto di ebollizione iniziale e intervallo di ebollizione.	Nessun dato disponibile
g)	Punto di infiammabilità	Non applicabile
h)	Velocità di evaporazione	Nessun dato disponibile
i)	Infiammabilità (solidi, gas)	Nessun dato disponibile
j)	Infiammabilità superiore/inferiore o limiti di esplosività	Nessun dato disponibile

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

k)	Tensione di vapore	Nessun dato disponibile
l)	Densità di vapore	Nessun dato disponibile
m)	Densità relativa	2,400 g/cm 3
n)	Idrosolubilità	Nessun dato disponibile
o)	Coefficiente di ripartizione: n-ottanolo/acqua	Nessun dato disponibile
p)	Temperatura di autoaccensione	Nessun dato disponibile
q)	Temperatura di decomposizione	Nessun dato disponibile
r)	Viscosità	Nessun dato disponibile
s)	Proprietà esplosive	Nessun dato disponibile
t)	Proprietà ossidanti	Nessun dato disponibile

9.2 Altre informazioni sulla sicurezza
Nessun dato disponibile

SEZIONE 10: stabilità e reattività

10.1 Reattività
Nessun dato disponibile

10.2 Stabilità chimica
Stabile nelle condizioni di stoccaggio raccomandate.

10.3 Possibilità di reazioni pericolose
Nessun dato disponibile

10.4 Condizioni da evitare
Nessun dato disponibile

10.5 Materiali incompatibili
Acidi forti

10.6 Prodotti di decomposizione pericolosi
Prodotti di decomposizione pericolosi in caso d'incendio. - Ossido di alluminio, ossidi di silicio
Altre prodotti di decomposizione pericolosi - Nessun dato disponibile
In caso di incendio: vedere la sezione 5

SEZIONE 11: informazioni tossicologiche

11.1 Informazioni sugli effetti tossicologici

Tossicità acuta
DL50 intravenoso - Ratto - 35 mg/kg
Osservazioni: Polmoni, torace o respirazione: edema polmonare acuto

Corrosione/irritazione cutanea
Nessun dato disponibile

Lesioni oculari gravi/irritazioni oculari gravi
Nessun dato disponibile

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

Sensibilizzazione respiratoria o cutanea
Nessun dato disponibile

Mutagenicità delle cellule germinali
Nessun dato disponibile

Cancerogenicità

IARC: Nessun componente di questo prodotto presente a livelli maggiori o uguali allo 0.1% è identificato come cancerogeno conosciuto o previsto dallo IARC.

Tossicità riproduttiva
Nessun dato disponibile

Tossicità specifica per organi bersaglio - esposizione singola
Nessun dato disponibile

Tossicità specifica per organi bersaglio - esposizione ripetuta
Nessun dato disponibile

Pericolo in caso di aspirazione
Nessun dato disponibile

ulteriori informazioni
RTECS: CT9450000

Irritazione polmonare, Asma

SEZIONE 12: informazioni ecologiche

12.1 Tossicità

Tossicità per i pesci CL50 - Oncorhynchus mykiss (Trota iridea) - 19.000 mg/l - 96 h

12.2 Persistenza e degradabilità
Nessun dato disponibile

12.3 Potenziale di bioaccumulo
Nessun dato disponibile

12.4 Mobilità nel suolo
Nessun dato disponibile

12.5 Risultati della valutazione PBT e vPvB
Questa sostanza/miscela non contiene componenti considerati sia persistenti, bioaccumulabili che tossici (PBT), oppure molto persistenti e molto bioaccumulabili (vPvB) a concentrazioni di 0.1% o superiori.

12.6 Altri effetti avversi
Nessun dato disponibile

SEZIONE 13: considerazioni sullo smaltimento

13.1 Metodi di trattamento dei rifiuti

Prodotto
Conferire le soluzioni non riciclabili e le eccedenze ad una società di smaltimento rifiuti autorizzata.

Contenitori contaminati
Smaltire come prodotto inutilizzato.

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

SEZIONE 14: informazioni sul trasporto

14.1 Numero ONU

ADR/RID: - IMDG: - IATA: -

14.2 Nome di spedizione dell'ONU

ADR/RID: Merci non pericolose
IMDG: Not dangerous goods
IATA: Not dangerous goods

14.3 Classi di pericolo connesso al trasporto

ADR/RID: - IMDG: - IATA: -

14.4 Gruppo d'imballaggio

ADR/RID: - IMDG: - IATA: -

14.5 Pericoli per l'ambiente

ADR/RID: no IMDG Inquinante marino: no IATA: no

14.6 Precauzioni speciali per gli utilizzatori

Nessun dato disponibile

SEZIONE 15: informazioni sulla regolamentazione

15.1 Disposizioni legislative e regolamentari su salute, sicurezza e ambiente specifiche per la sostanza o la miscela

Questa scheda di sicurezza rispetta le prescrizioni del Regolamento (CE) Num. 1907/2006.

Convenzione internazionale sulle armi chimiche (CWC), lista di prodotti chimici precursori e tossici	: Non è vietato e/o sottoposto a limitazioni
Restrizioni in materia di ammissione sul mercato e di uso di talune sostanze e preparati	: Non è vietato e/o sottoposto a limitazioni
Regolamento (CE) n. 649/2012 del Parlamento europeo e del Consiglio sull'esportazione ed importazione di sostanze chimiche pericolose	: Non è vietato e/o sottoposto a limitazioni
Elenco di sostanze estremamente problematiche candidate per l'autorizzazione	: Non è vietato e/o sottoposto a limitazioni

15.2 Valutazione della sicurezza chimica

Per questo prodotto non è stata effettuata una valutazione della sicurezza chimica.

SEZIONE 16: altre informazioni

Ulteriori informazioni

Diritti d'autore 2018 Sigma-Aldrich Co. LLC. Si autorizza la stampa di un numero illimitato di copie per esclusivo uso interno.
Le informazioni di cui sopra sono ritenute corrette, tuttavia non possono essere esaurienti e dovranno pertanto essere considerate puramente indicative. La Sigma-Aldrich Corporation e le suo filiali non potranno essere ritenute responsabili per qualsiasi danno derivante dall'impiego o dal contatto con il prodotto di cui sopra. Per ulteriori termini e condizioni di vendita fare riferimento al sito www.sigma-aldrich.com e/o al retro della fattura o della bolla di accompagnamento.

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

Il marchio riportato nell'intestazione e/o a piè di pagina del presente documento potrebbe momentaneamente differire visivamente da quello del prodotto acquistato, per via della transizione dei nostri marchi. Tuttavia, tutte le informazioni relative al prodotto contenute in questo documento rimangono inalterate e si riferiscono al prodotto ordinato. Per ulteriori informazioni, si prega di contattare misbranding@sial.com.

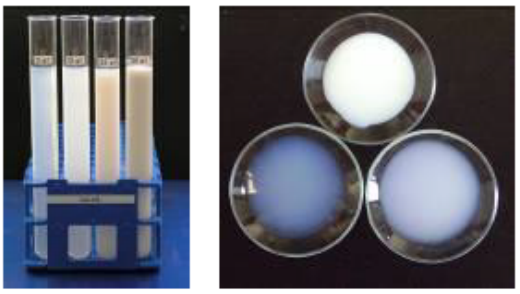
The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

Technical Leaflet

IBZ-Salzchemie GmbH & Co.KG

CaLoSiL®

Colloidal nano-particles of lime for stone and plaster consolidation



CaLoSiL® in different concentrations

Properties

CaLoSiL® contains nano-particles of lime hydrate ($Ca(OH)_2$) suspended in different alcohols. Typical concentrations are between 5 g/L and 50 g/L. The average particle size is 150 nm. Ethanol, iso-propanol or n-propanol serves as solvents. Due to the low particle size stable sols are formed. That means the solids do not sediment for a long time.

CaLoSiL® is a ready-to-use stone and plaster consolidant. Treatment of stone, mortar or plaster with CaLoSiL® results in the formation of solid calcium hydroxide after evaporation of the alcohol. That converts into calcium carbonate in a way similar to traditional lime mortars by reaction with atmospheric carbon dioxide. All alcohols evaporate completely. Chemicals or residues deteriorating stone or mortar are not formed.

CaLoSiL® can be applied by dipping, capillary suction, spraying or injection. It is important that the complete weathered zone of the stone is treated.

Available types of CaLoSiL® / Packaging

CaLoSiL® is available in concentrations between 5 g/L and 50 g/L. The letters behind the name "CaLoSiL®" indicate the used solvent, the numbers give the total calcium hydroxide concentration in g/L. E stands for ethanol, IP for iso-propanol and NP for n-propanol. For example, E25 means, 25 g/L calcium hydroxide dispersed in ethanol.

Standard products are:

CaLoSiL® E5, E25 and E50
CaLoSiL® IP5, IP15 and IP25
CaLoSiL® NP5, NP15 and NP25

All CaLoSiL® types are available in 500 mL, 1 L, 2,5 L, 5 L and 10 L containers.

Properties of formed calcium hydroxide / calcium carbonate

The calcium hydroxide particles formed after evaporation of the alcohol cover the surface of treated cracks, pores or joints. Dense films of calcium hydroxide films are formed, depending on the number of treatment cycles and the concentration of the used sols. The particles have sizes between 50 nm and 250 nm. Their detection by means of standard optical microscopy may be difficult, the use of SEM is recom-

mended. Calcium carbonate formation by reaction with atmospheric carbon dioxide requires the presence of humidity. Carbonations takes place within few days and weeks, depending on the conditions and the amount of calcium hydroxide brought into the stone. In some cases, the carbonation process can be accelerated by increasing the humidity, for example by covering with wet clothes.

Penetration behaviour

The penetration into mortar, stone or plaster depends on many factors. Of special importance are:

- Characteristics of the CaLoSiL® type applied,
- Structure and surface characteristics of the materials to be treated,
- Porosity and capillary rise,
- Moisture content of the material
- Air temperature and air humidity during the application

When dense materials are treated with highly concentrated CaLoSiL® products (CaLoSiL® E50, CaLoSiL® paste-like etc.) the penetration behaviour may be only low. Especially the presence of dense surface layers (for examples gypsum crusts on mortars, plasters) prevent a penetration of CaLoSiL® into deeper zones.

The penetration into materials with high moisture contents is generally more difficult than into dry substances. Pre-wetting with ethanol may help to reduce the moisture content of the material. After evaporation of the ethanol, it should be possible to apply all CaLoSiL® products without any problems.

White haze formation

The formation of a white haze on the surface of the treated material depends not only on the penetration behaviour of CaLoSiL® but also on the evaporation conditions of the alcohol. Fast evaporation is often connected in the most cases with a transport of the nano-particles back to the surface. In such case, the time was insufficient to fix the calcium hydroxide particles within the treated materials. General rules to prevent / reduce the formation of white haze are:

- Start the treatment with low concentrated products, increase the calcium hydroxide concentration step by step.
- Avoid the treatment of wet materials, reduce the moisture content by pre-treatment with ethanol or ethanol-water mixtures (1:1).
- In the case of sensitive surfaces, try to use CaLoSiL®-grey, which has a special consistency allowing deep penetration without white haze formation.

- Avoid an "oversaturation" of the treated stone, plaster or mortar. Remove all CaLoSiL® which could not penetrate into the treated material, for example with a sponge.
- Test the addition of small amounts of acetone or heptane.
- Test the combination with CaLoSiL® micro, which has a bigger particle size allowing the fixation of small particles.
- Test the addition of small amounts of alcohol soluble cellulose.

Times

The alcohols evaporate within a few hours. The carbonation process itself requires between few a days and weeks, depending on the amount of calcium hydroxide formed and on the environmental conditions (humidity, possibility of carbon dioxide migration).

CaLoSiL® and silicic acid esters

The combination of CaLoSiL® with silicic acid esters allows the successful consolidation and strengthening of materials at which pure silicic acid esters do not work satisfactorily. It is recommended to treat the materials in question in a first step by CaLoSiL® (for example E-25 or IP-25) and apply silicic acid esters after the evaporation of the alcohol. The calcium hydroxide formed from CaLoSiL® acts as an adhesion promoter as well as catalyst accelerating the hydrolysis of the silicic acid ester. The final strength is in many cases much higher than it can be achieved by single treatment with silicic acid esters. All commercially available silicic acid esters can be used. Detailed information are summarised in a special technical leaflet.

Mixability with other materials

All CaLoSiL®-products can be intermixed. Blending with ethanol, n-propanol or isopropanol is also possible without any difficulties. In contrast to that, the addition of water results, when amounts greater than 10 wt.-% are added, in the formation of solutions characterised by a gel like consistency. Higher water amounts will flocculate the calcium hydroxide particles.

Storage

All materials have to be stored between +5 °C and +30 °C. When CaLoSiL® remains in unopened, original containers, storage for at 12 months is possible. After that time, agglomeration and connected with that, sedimentation may occur. The settled particles, however, can be re-dispersed by shaking the closed bottle or by ultrasonic treatment. The properties of the nano-sols remain unaffected.

Safety

CaLoSiL® is flammable/combustible. Keep away from oxidisers, heat, sparks and flames. Avoid spilling, skin and eye contact. Ventilate well, avoid breathing vapours. CaLoSiL® is strongly alkaline. Do not smoke. Keep container closed. Use safety gasses and glovers. Wash thoroughly after handling. Keep away from sources of ignition. Please store in a cool, dry place and in a tightly closed container. Further information concerning safety during transport, storage and handling as well as for disposal can be found in our latest Material Safety Data Sheets. Before using in large scale we recommend to treat a small test field with CaLoSiL® in order to find out the most favourable application method and the required volumes of CaLoSiL®.

The information mentioned above is state of the art and has been developed by intensive research and development. The application of our products and their use is beyond the range of our influence. Therefore IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG cannot take any liability from events that result from the information contained in this leaflet. Careful and considered use of CaLoSiL® is highly recommended.

IBZ-Salzchemie GmbH & Co.KG

Gewerbepark „Schwarze Kiefern" • 09633 Halsbrücke • Tel.: +49 (0)3731 200155 • Fax: +49 (0)3731 200156 •
www.ibz-freiberg.de • info@ibz-freiberg.de

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio innanzitutto i miei genitori e mia sorella, per il supporto incondizionato che mi hanno dato, soprattutto nei momenti di scoraggiamento, permettendomi per primo nella mia famiglia di avere un'istruzione universitaria.

Ringrazio la Prof.ssa Stazi per l'argomento ambizioso della tesi che mi ha proposto e per la fiducia che mi ha dimostrato nell'organizzare il lavoro.

Ringrazio il Prof. Di Perna per la sua infinita pazienza e per l'uso pressoché libero che mi ha concesso del suo laboratorio.

Ringrazio la Prof.ssa Tittarelli per la sua disponibilità e precisione con cui ha contribuito allo svolgimento delle prove di laboratorio e all'organizzazione dei dati.

Ringrazio i miei amici, che mi hanno spronato, rimproverato e hanno gioito con me degli esami superati.

Ringrazio i miei compagni di corso e amici Luca, Edoardo, Valentina, Lucrezia e Marianna perché insieme abbiamo vissuto l'esperienza universitaria negli alti e nei bassi e ognuno di loro ha contribuito affinché il mio percorso proseguisse.

Ringrazio Nicola perché con la sua tesi di laurea ha posto le basi affinché potessi sviluppare il mio lavoro, contribuendo in minima parte alla ricerca sui metodi di conservazione dei beni storici di cui il nostro Paese vanta una quantità impressionante.

Ringrazio il mio amico Leonardo che con la sua professionale perizia mi ha fornito un insostituibile aiuto nel reperimento dei materiali necessari allo svolgimento del tirocinio.

Ringrazio l'Ingegnere che mi ha concesso tempo prezioso da dedicare al tirocinio e alla tesi.