



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in **INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE**

**EFFETTO DI NANOCALCE IN SOSPENSIONE ACQUOSA SULLE PRESTAZIONI
MECCANICHE DI MALTE A BASE DI CALCE IDRAULICA**

**EFFECT OF AQUEOUS SUSPENSION NANOLIME ON THE MECHANICAL
PERFORMANCE OF HYDRAULIC LIME-BASED MORTARS**

Relatore:

Prof.ssa **Francesca Tittarelli**

Tesi di Laurea di:

Jacopo Costantini

Correlatore:

Prof.ssa **Chiara Giosuè**

A.A. 2019 / 2020

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	4
1.1. Obiettivo della tesi.....	4
1.2. Degrado dei beni culturali.....	5
1.3. Stato dell'arte.....	9
2. MATERIALI	14
2.1. Sabbia.....	14
2.2. Calce idraulica naturale.....	16
2.3. Nano-calce.....	17
3. SPERIMENTAZIONE	18
3.1. Programma di ricerca.....	18
3.2. Umidità ed assorbimento degli aggregati.....	21
3.3. Mix design.....	26
3.4. Confezionamento e getto della miscela.....	27
4. LAVORABILITÀ.....	32
4.1. Teoria.....	32
4.2. Metodo.....	33
4.3. Risultati e discussione.....	34
5. DENSITÀ ALLO STATO FRESCO.....	36
5.1. Teoria.....	36
5.2. Metodo.....	37
5.3. Risultati e discussione.....	38
6. DENSITÀ ALLO STATO INDURITO.....	38
6.1. Metodo.....	38
6.2. Risultati e discussione.....	40
7. RESISTENZE MECCANICHE A FLESSIONE E COMPRESSIONE.....	43
7.1. Teoria.....	43
7.2. Metodo.....	43
7.3. Risultati e discussione.....	49

8. MODULO ELASTICO.....	54
8.1. Teoria.....	54
8.2. Metodo.....	55
8.3. Risultati e discussione.....	64
9. CONCLUSIONE.....	72
BIBLIOGRAFIA.....	75
RINGRAZIAMENTI	78
APPENDICE.....	79

1. INTRODUZIONE

1.1. Obiettivo della tesi

Il patrimonio culturale situato all'esterno subisce una serie di fenomeni chimici e fisici, promossi dagli agenti atmosferici e dall'uso improprio dei prodotti commerciali consolidanti, che minacciano l'integrità e la conservazione dei monumenti.

Negli ultimi, decenni l'aumento degli inquinanti atmosferici unito ai cambiamenti climatici, ha contribuito ad amplificare gli effetti deleteri che inducono il degrado nei monumenti storici. Infatti, l'incremento dei gas acidi, legati alle attività antropiche e la frequenza sempre maggiore di precipitazioni intense, possono determinare delle trasformazioni che comporteranno: alterazioni cromatiche, formazione di patine, cristallizzazione di sali, riduzioni e de-laminazioni superficiali.

L'insieme di questi fenomeni causa la perdita della coesione superficiale ed il progressivo disfacimento delle parti esterne dei monumenti e dei siti di interesse storico-artistico, compromettendone la conservazione ed una piena fruibilità per le generazioni future.

Questa tesi costituisce la parte iniziale di uno studio, più ampio, che intende valutare gli effetti sulle proprietà dei principali substrati nei monumenti trattati con un consolidante nuovo.

Il trattamento innovativo che viene esaminato, è costituito da una sospensione acquosa di nano-calce, che può essere apposta in diverse modalità, sia aggiungendola negli impasti durante il confezionamento, sia applicandola in superficie mediante spazzola o aerografo. Inoltre, essendo il materiale in una dispersione acquosa di nano-particelle di idrossido di calcio, queste hanno un impatto minore sulla salute umana e sull'ambiente.

Perciò, in questo elaborato si propone di indagare gli effetti di un trattamento, a base di nano-calce aggiunto come additivo nella miscela sulle densità, resistenze meccaniche e deformabilità delle malte a base di calce.

In questo studio, il consolidante disperso in una sospensione acquosa di nano-calce è aggiunto in tre diverse percentuali, in peso del legante, ad un impasto tradizionale a base di calce idraulica naturale e aggregato fine.

1.2. Le malte nei beni culturali: degrado e ripristino

Il termine malta indica un impasto formato da un legante: acqua, sabbia ed eventuali aggiunte utili a modificarne le proprietà.

In base alla tipologia di legante impiegato, viene classificato il tipo di malta, cambiandone le caratteristiche e influenzandone fortemente i possibili campi d'applicazione. Nel passato la scelta degli ingredienti fu fortemente condizionata da diversi fattori come ad esempio: l'epoca, le tecnologie disponibili e la reperibilità dei materiali. Durante il corso dei secoli si sono poi seguite progressive scoperte ed applicazioni di composti leganti sempre più efficienti.

Il gesso fu il primo legante utilizzato, per via della sua semplice produzione basata sulla combustione a circa 200 °C delle pietre da gesso. "La malta di gesso aderisce a quasi tutti i materiali da costruzione. [...] Nonostante la bassa resistenza il gesso è molto usato per questa proprietà e per il suo rapido indurimento." [1]

Queste malte, impiegate fin dall'antichità per realizzare intonaci, stucchi e strati di allettamento tra blocchi di muratura, a causa della grande porosità tendono a dilavarsi e a perdere consistenza se esposte alle intemperie o in luoghi molto umidi.

La calce aerea è un legante prodotto dalla cottura a circa 800 – 1000 °C delle rocce calcaree. Quest'ultime con il calore formano calce viva, alla quale si è aggiunta acqua per spegnerla. La calce spenta o calce idrata, a contatto con l'atmosfera, reagisce con l'anidride carbonica, formando carbonato di calcio.

Così come il gesso, anche la calce, nonostante sviluppi resistenze maggiori, è un legante aereo che per reagire, far presa ed indurire, deve essere a contatto con l'aria. È possibile aggiungere dei particolari ingredienti per rendere gli impasti idraulici, in modo da creare delle miscele che riescano ad indurire sott'acqua.

Esistono diverse sostanze naturali come ad esempio delle sabbie di origine vulcanica, caratterizzate da una struttura amorfa ed un elevato contenuto di silicati e alluminati, o materiali artificiali originati dalla frantumazione dei laterizi di scarto, che aggiunti alla miscela conferiscono idraulicità all'impasto.

[1] U. Menicali, "I materiali nell'edilizia storica", NIS, Roma, pag. 133, 1992.

Le proprietà della pozzolana dipendono dalla sua “composizione in prevalenza acida, [...] e soprattutto la struttura vetrosa metastabile, entrambe le caratteristiche, consentono alla pozzolana di reagire con la calce idrata, formando in tempi brevi degli idrauliti stabili e insolubili [...] in grado di indurire sia in aria che in luoghi umidi oppure in ambiente sommerso.” [2]

Invece, la calce idraulica è un legante in grado di indurire sott’acqua e si ottiene dalla calcinazione di calcari marnosi. La presenza della frazione argillosa, durante la combustione, genera silicato bicalcico ed alluminato monocalcico. Questi composti rendono tale legante idraulico poiché reagendo formano silicati ed alluminati di calcio idrati. Gli impasti realizzati con la calce idraulica induriscono anche “sott’acqua originando dei composti simili a quelli prodotti dall’idratazione del cemento Portland, dotati di un eccellente resistenza al dilavamento.” [3]

Le malte, nel corso della storia delle costruzioni, sono state utilizzate ampiamente in molti manufatti, che oggi costituiscono il nostro patrimonio culturale, per realizzare intonaci a protezione delle pareti o come strati di allettamento utili a collegare fra loro i diversi elementi delle murature ed assicurare una distribuzione omogenea dei carichi.

La loro conservazione è minacciata da fenomeni fisici e chimici, spesso concatenati tra loro, ed indotti dagli agenti atmosferici, dagli inquinanti e dal cambiamento climatico.

Le principali cause fisiche del degrado, dipendenti dall’interazione fra il materiale ed il clima, sono: l’erosione dovuta all’azione diretta del vento o delle precipitazioni, le variazioni termo-igrometriche che mediante cicli di contrazioni ed aumenti volumetrici vanno a generare fessurazioni nella malta ed infine la deposizione superficiale di sali o altre sostanze che, dando origine a cristallizzazioni ed efflorescenze, pregiudicano l’estetica del manufatto. [4]

Anche il dilavamento da parte delle acque acide rappresenta una seria minaccia per la conservazione delle malte dei manufatti storici in genere, perché le acque meteoriche si

[2] U. Menicali, “I materiali nell’edilizia storica”, NIS, Roma, pag. 131, 1992.

[3] U. Menicali, “I materiali nell’edilizia storica”, NIS, Roma, pag. 140, 1992.

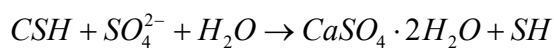
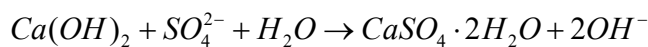
[4] A. Bonazza, G. Vidoni, I. Natali, C. Ciantelli, C. Giosuè, F. Tittarelli, “Durability assessment to environmental impact of nano-structured consolidants on carrara marble by field exposure tests”, Science of The Total Envir., vol. 757, pag. 23-32, 2017.

combinano con gli inquinanti acidi, sempre più presenti nell'atmosfera per via delle attività antropiche, aggravando l'entità del loro effetto dilavante in base all'esposizione del sito o di parti di esso.

In ogni caso, la presenza di acqua, nei suoi diversi stati, causa direttamente o indirettamente fenomeni deleteri, favorendo reazioni chimiche, trasformazioni fisiche e veicolando sostanze pericolose all'interno dei monumenti, permettendone l'interazione con diversi materiali.

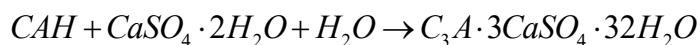
Uno dei principali pericoli per le malte storiche è l'attacco solfatico. Questa tipologia di aggressione chimica è causata dall'interazione dei solfati con i prodotti della matrice cementizia. I solfati possono provenire da quantità di gesso eventualmente presenti nella malta, o trasportati mediante l'acqua capillare dal terreno o dai laterizi, oppure dalla deposizione superficiale degli inquinanti atmosferici.

Le reazioni di solfatazione generano, inizialmente, cristalli di gesso che grazie alla porosità possono intrappolare al loro interno particelle carboniose ricche di metalli pesanti, quest'ultimi fungono da catalizzatori per le prossime reazioni deleterie.



Successivamente, i cristalli di gesso formatesi in superficie, tramite l'azione dell'acqua si disciolgono e penetrano negli strati più interni del materiale, dove interagiscono con i silicati (CSH) e gli alluminati (CAH) di calcio idrati e formano l'ettringite secondaria. ^{[5] [6]}

L'ettringite è un trisoflo-alluminato-di calcio idrato generato dall'attacco solfatico e caratterizzato da una reazione fortemente espansiva, che a causa dei forti incrementi volumetrici provoca rigonfiamenti, delaminazioni, fessurazioni e distacchi superficiali.

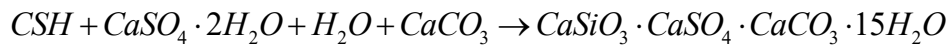


^[5] C. Sabbioni, G. Zappia, G. Riontino, M. T. Blanco-Varela, J. Aguilera, F. Puertas, K. Van Balen, E. E. Toumbakari, "Atmospheric deterioration of ancient and modern hydraulic mortars", *Atmosph. Environ.*, vol. 35, no. 3, pag. 539- 548, 2001.

^[6] C. Sabbioni, A. Bonazza, G. Zappia, "Damage on hydraulic mortars the Venice Arsenal", *Journal of Cultural Heritage*, vol. 3, no. 1, pag. 83-88, 2002.

“In particolari condizioni climatiche (fredde ed umide, cioè con temperature inferiori ai 10 °C con umidità relativa al 95%) ed in presenza di CaCO₃ finemente disperso nella pasta cementizia, l’attacco solfatico si esplica con la formazione di thaumasite.” [7]

Tale processo, è il più deleterio fra tutti gli attacchi solfatici, perché conduce allo sfaldamento completo della matrice interessata da questo degrado.



Invece, le malte adoperate nelle murature in pietra, come intonaci o per assicurare un’adesione migliore tra i blocchi, possono subire attacchi chimici indipendenti dai solfati, ma dovuti all’interazione fra gli alcali, presenti nella malta ed alcune forme di silice reattiva. Quest’ultima trasformazione chimica è detta reazione alcali-silice e, a causa di un incremento volumetrico dei prodotti generati, determina fessurazioni di diversa entità ed espulsioni di frammenti dagli strati più superficiali.

È doveroso svolgere dettagliate analisi preliminari per individuare il tipo di degrado, le possibili cause ed i materiali interessati, prima di procedere con interventi atti a ripristinare e consolidare le malte danneggiate. In questo modo è possibile adottare la tipologia di intervento più appropriata scegliendo prodotti e metodi compatibili con i substrati trattati, che incrementino la coesione superficiale e la resistenza, assicurando così una lunga durabilità in modo da evitare fastidiose variazioni cromatiche. [8]

Esistono svariate tipologie di interventi finalizzati al ripristino ed al consolidamento delle malte degradate nei beni culturali. Infatti, nei casi peggiori dove è riscontrabile un forte degrado o addirittura una mancanza in alcuni punti dei giunti di malta, si opta per la rimozione delle parti seriamente ammalorate ed il completo rifacimento dei giunti.

Mentre, per consolidare intonaci o affreschi danneggiati di particolare pregio storico-artistico, sono impiegate delle boiacche, ovvero impasti caratterizzati da una notevole lavorabilità e confezionati con ingredienti selezionati. Quest’ultime, infatti, vengono applicate tramite colature o iniezioni, così da riempire cavità e fessure ed incrementare la coesione delle parti trattate.

[7] M. Collepari, S. Collepari, R. Troli, “Il nuovo calcestruzzo”, Tintoretto, Treviso, pag. 171, 2009.

[8] A. Bonazza, G. Vidoni, I. Natali, C. Ciantelli, C. Giosuè, F. Tittarelli, “Durability assessment to environmental impact of nano-structured consolidants on carrara marble by field exposure tests”, Science of The Total Envir., vol. 757, pag. 23-32, 2017.

Inoltre, è possibile, nei casi ove le condizioni e le analisi del sito lo consentono, ricorrere a trattamenti meno invasivi come applicazioni superficiali a pennello o ad aerografo.

Questa tipologia di interventi utilizza sia consolidanti organici che inorganici, permettendo di: aumentare la coesione del substrato, ridurre la perdita di materiale dalla superficie ed aumentare la resistenza agli agenti atmosferici delle superfici trattate.

1.3. Stato dell'arte

Come anticipato nel paragrafo precedente, si procede nel confezionamento di nuove malte, aggiungendo eventualmente dei materiali per modificarne le proprietà, nei casi in cui le malte presentino un'entità del degrado tale da doverle rimuovere e ricostituire.

Le prime aggiunte in massa erano influenzate dalla zona e dall'epoca e consistevano in prodotti di origine animale o vegetale, come sangue, collagene, amido e olio.

Queste addizioni di ingredienti particolari nelle malte, scoperte dopo ricerche dalle fonti storico-bibliografiche e da analisi dettagliate dei monumenti, sono state sottoposte a studi recenti per verificarne l'efficacia e replicabilità in interventi conservativi più compatibili e meno invasivi.

È stato appurato che le aggiunte di sangue suino, grazie alle interazioni fra le proteine del sangue e le sostanze della malta, migliorano: l'adesione, l'impermeabilità, la resistenza agli agenti atmosferici e la velocità di indurimento delle malte in calce aerea. ^[9]

Anche l'aggiunta di acqua di riso, ovvero una miscela di polvere di riso, acqua e calce, influenza positivamente le proprietà della malta, perché uno dei componenti dell'amido, l'amilopectina, grazie all'interazione con la calce contribuisce a migliorare la microstruttura del materiale, fungendo da regolatore di presa e favorendo la carbonatazione. ^[10]

^[9] S. Fang, K. Zhang, H. Zhang, B. Zhang, "A study of traditional blood lime mortar for restoration of ancient buildings", *Cem. Conc. Res.*, vol. 76, pag. 232-241, 2015.

^[10] T. Yang, X. Ma, B. Zhang, H. Zang, "Investigations into the function of sticky rice on the microstructures of hydrated lime putties", *Constr. and Build. Materials*, vol. 102, part. 1, pag. 105-112, 2016.

Ulteriori ricerche hanno riscontrato che, aggiungendo del collagene alle malte di calce aerea viene aumentata la resistenza meccanica, mentre con aggiunte di olii vegetali si riduce il numero e la dimensione media dei pori. ^[11]

I romani hanno scoperto ed ampiamente utilizzato materiali pozzolanici, come sabbie vulcaniche e laterizi frantumati, per rendere le malte idrauliche ed incrementare lo sviluppo delle resistenze a lunghi periodi di stagionatura.

Negli ultimi anni, essendo ben nota l'efficacia delle aggiunte pozzolaniche nelle malte, sono state svolte molteplici attività di ricerca per individuare nuovi ingredienti che, aggiunti alle malte, siano in grado di sviluppare comportamenti pozzolanici e, allo stesso tempo, garantire un'adeguata compatibilità con i substrati trattati. Tali studi hanno riscontrato che le aggiunte di metakaolino, originato dalla cottura delle argille caoliniche, vanno ad incrementare le resistenze meccaniche, le rigidità e riducono l'entità del ritiro. ^[12]

Anche le zeoliti, che sono alluminosilicati cristallini idrati di origine naturale o artificiale, se aggiunte alla malta, oltre a conferirgli idraulicità, ne aumentano le resistenze meccaniche, riducono la rigidità e modificano la velocità della carbonatazione. ^[13]

Dopo numerose esperienze si sconsiglia vivamente l'utilizzo delle malte cementizie o delle aggiunte di cemento per interventi di restauro, perché a causa delle grandi resistenze meccaniche, delle rigidità, delle porosità e della presenza di sali pericolosi, sono poco compatibili con i substrati e rischiano di danneggiare l'estetica dei manufatti.

Per quel che riguarda il restauro, superando l'argomento relativo alle addizioni di ingredienti in massa, utili a migliorare le proprietà dell'impasto, negli ultimi decenni, si è registrata una notevole evoluzione degli interventi meno invasivi, come le applicazioni

^[11] L. Ventolà, M. Vendrell, P. Giraldez, L. Merino, "Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics", *Constr. and Build. Materials*, vol. 25, no. 8, pag. 3313-3318, 2011.

^[12] V. Nežerka, Z. slížová, P. Tesárek, T. Plachý, D. Frankeová, "Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust", *Cem. Concr. Res.*, vol. 64, pag. 17-29, 2014.

^[13] E. Ferraz, S. Andrejkovičová, A. L. Velosa, A. S. Silva, F. Rocha, "Synthetic zeolite pellets incorporated to air lime-metakaolin mortars: Mechanical properties", *Constr. and Build. Materials*, vol. 69, pag. 234-252, 2014.

superficiali, finalizzate al consolidamento del substrato e al contrasto del degrado. Nei secoli scorsi per il consolidamento degli intonaci deteriorati o altri substrati a matrice calcarea veniva utilizzata l'acqua di calce, ovvero una soluzione acquosa satura di idrossido di calcio.

L'applicazione di questa sospensione colloidale, oltre un'azione antibatterica e di prevenzione delle muffe, permette il raggiungimento di una consolidazione durevole e compatibile dei primi millimetri del substrato, grazie alla precipitazione di carbonato di calcio originato dalla carbonatazione del trattamento. Le principali limitazioni di questa tecnica dipendono dalla ridotta profondità consolidata, legata alla scarsa penetrazione dell'anidride carbonica atmosferica nel substrato e dal forte aumento dello sbiancamento superficiale, causato dalle numerose applicazioni utili ad ottenere un intervento efficace.^[14]

Le tecniche più recenti si basano sull'utilizzo di trattamenti organici e inorganici.

I consolidanti organici, soprattutto negli ultimi decenni sono stati largamente adoperati perché, con semplici applicazioni, consentono un rapido miglioramento delle proprietà.

Poi, con il passare degli anni, sono incominciate le problematiche legate alla scarsa compatibilità fisico-chimica con i substrati trattati. Perciò, la differenza delle proprietà fisico-meccaniche ha progressivamente ridotto l'efficacia del trattamento nel tempo e va ad aumentare i rischi di alterazioni cromatiche che oltrepassano la soglia di accettabilità.^[15]

Difatti, i prodotti consolidanti a base di silicato di etile (TEOS) sono precursori di silice, i quali in seguito all'applicazione vanno a riempire le porosità del substrato con un gel rinforzato da reticoli di silice tetra-coordinata, consentendo un immediato effetto consolidante. Questo prodotto presenta una scarsa compatibilità chimica con i substrati calcarei ed una riduzione della durabilità e dell'efficienza del trattamento, dopo periodi medio lunghi, a causa di fenomeni fessurativi originati dalla brusca tendenza alla contrazione del gel di silice durante l'evaporazione.^[16]

^[14] ^[15] J. Otero, V. Starinieri, A. E. Charola, "Nanolime for the consolidation of lime mortars: A comparison of three available products", *Constr. and Build. Materials*, vol. 181, pag. 394-407, 2018.

^[16] V. Daniele, G. Tagliere, L. Macera, G. Rosatelli, J. Otero, A. E. Charola, "Green approach for an eco-compatible consolidation of the Agrigento biocalcarenes surface", *Constr. and Build. Materials*, vol. 186, pag. 1188-1199, 2018.

Complessivamente, dagli studi eseguiti e dalle esperienze sviluppate nel tempo, è possibile affermare che i consolidanti organici sono contraddistinti da: una scarsa compatibilità fisico-chimica con i substrati trattati, che riduce le prestazioni del trattamento in modo significativo nel tempo; delle forti differenze di permeabilità tra il materiale originale e lo strato consolidato; un pericolo di alterazioni cromatiche eccessive e da rischi per la salute umana legati ai composti organici volatili (COV), prodotti dai solventi. ^[17]

Invece, i consolidanti inorganici tradizionali, come le sospensioni acquose di idrossido di bario o di idrossido di calcio, quest'ultimo noto come acqua di calce e descritto in precedenza, sono perfettamente compatibili con i substrati calcarei, ma loro efficacia viene influenzata dal lento processo di carbonatazione, dalla ridotta penetrazione del trattamento e dall'effetto sbiancante, che pregiudica l'estetica del manufatto trattato. ^[18]

Negli ultimi anni, lo sviluppo delle nanotecnologie ha consentito la scoperta e la produzione di nano-materiali, che grazie alle loro dimensioni ed alla grande superficie specifica riescono a penetrare i substrati da trattare a profondità maggiori, consolidandoli in modo più efficace ed a causa della maggior stabilità colloidale ridurre il rischio di eccessive variazioni cromatiche.

A partire dai primi anni del duemila sono stati commercializzati consolidanti innovativi, basati su dispersioni di nano-particelle di idrossido di calcio.

I nano-consolidanti maggiormente adoperati per trattare substrati calcarei danneggiati sono NANORESTORE e CaLoSiL, perché con le loro caratteristiche permettono di realizzare interventi completamente compatibili fisicamente e chimicamente con il substrato. ^[19]

Tali trattamenti consentono sia di aumentare la coesione superficiale, sia di diminuire il diametro dei pori più grandi contribuendo alla formazione di una porosità più diffusa.

^[17] G. Taglieri, V. Daniele, L. Macera, A. Mignemi, "Innovative and green nanolime treatment tailored to consolidate the original mortar of the façade of a medieval building in L'Aquila (Italy)", *Constr. and Build. Materials*, vol. 221, pag. 643-650, 2019.

^[18] J. Delgado Rodrigues, A. P. Ferreira Pinto, R. Nogueira, A. Gomes, "Consolidation of lime mortars with ethyl silicate, nanolime and barium hydroxide. Effectiveness assessment with microdrilling data", *Journal of Cultural Heritage*, vol. 29, pag. 43-53, 2018.

^[19] J. Otero, V. Starinieri, A. E. Charola, "Nanolime for the consolidation of lime mortars: A comparison of three available products", *Constr. and Build. Materials*, vol. 181, pag. 394-407, 2018.

Di conseguenza alla variazione della porosità, vengono modificate le velocità di assorbimento capillare, migliora la resistenza verso i fenomeni atmosferici e si registrano variazioni colorimetriche di entità differente in base alle tecniche impiegate. Anche il solvente delle dispersioni di nano-consolidante riveste un ruolo importante perché influenza la carbonatazione, che permette alle nano-particelle di idrossido di calcio di reagire con l'anidride carbonica atmosferica, formando carbonato di calcio ed in base al tasso di evaporazione, proprio di ogni solvente, condiziona la profondità di consolidamento raggiunto dal trattamento. ^[20]

Recentemente l'Università Dell'Aquila (UNIVAQ) ha brevettato un metodo innovativo per produrre, in modo semplice e veloce, nano-particelle di idrossido di calcio, prive di impurità, in sospensioni acquose. Così, grazie all'utilizzo di acqua come solvente, si riducono notevolmente i rischi per la salute umana, legati alle emissioni di composti organici volatili provenienti dai solventi a base alcool, migliorando la sicurezza sul lavoro e diminuendo l'impatto ambientale dell'intervento. La validità di questo innovativo nano-consolidante, prodotto dall'UNIVAQ, nei trattamenti superficiali di substrati calcarei è stata dimostrata da diversi studi. ^[21]

In questa tesi, invece si valutano gli effetti sulle resistenze meccaniche nelle malte a base di calce idraulica, andando ad aggiungere negli impasti precise quantità di nano-calce in sospensione acquosa.

^[20] J. Otero, V. Starinieri, A. E. Charola, G. Taglieri, "Influence of different types of solvent on the effectiveness of nanolime treatments on highly porous mortar substrates", *Constr. and Build. Materials*, vol. 230, pag. 1171-1210, 2020.

^[21] V. Daniele, G. Tagliere, L. Macera, G. Rosatelli, J. Otero, A. E. Charola, "Green approach for an eco-compatible consolidation of the Agrigento biocalcarenes surface", *Constr. and Build. Materials*, vol. 186, pag. 1188-1199, 2018.

2. MATERIALI

2.1. Sabbia

Per il confezionamento di una malta è indispensabile adoperare gli inerti, ovvero particelle solide di origine naturale o artificiale che, una volta miscelate nell'impasto non reagiscono con gli altri ingredienti, ma riducono la quantità di legante necessaria, andando così a migliorare le proprietà meccaniche e riducendone i costi complessivi.

Come inerte si utilizza la sabbia 0/3 della ESINCALCE, costituita da granuli con dimensione massima di 3 mm dalla forma spigolosa, in quanto prodotti dalla macinazione di rocce carbonatiche e privi di sostanze organiche e sali. L'aggregato scelto ha una densità nella condizione saturo a superficie asciutta pari a 2650 g/l. Le diverse caratteristiche relative al contenuto e all'assorbimento d'acqua sono descritte nel paragrafo 3.2, mentre di seguito viene riportata la tabella riguardante l'analisi granulometrica dell'inerte utilizzato e il corrispondente andamento della curva. ^[22]

Tab. 1: granulometria dell'inerte utilizzato per confezionare le malte.

VAGLIO (mm)	PESO SETACCIO (mm)	PESO LORDO SETACCIO (mm)	TRATTENUTO (g)	TRATTENUTO (%)	TRATTENUTO CUMULATIVO (%)	PASSANTE CUMULATIVO (%)
2,80	561,28	564,01	2,73	0,20	0,20	98,81
2,00	438,01	493,12	55,11	3,94	4,13	95,87
1,40	534,07	858,01	323,94	23,14	27,27	72,73
1,00	369,76	638,02	241,26	17,23	44,50	55,50
0,30	420,11	938,05	517,94	37,00	81,50	18,50
0,15	402,04	533,01	130,97	9,36	90,85	9,15
0,09	406,01	462,02	56,01	4,00	94,85	5,15
fondello	466,02	538,02	72,00	5,14	100,00	0,00

^[22] M. Mengucci, "Valorizzazione dei rifiuti RAEE in diverse catene di valore: effetto dell'impiego di frammenti di LCD in materiali da costruzione", Tesi di Laurea in Ingegneria Civile, pag. 10-11, 2019.

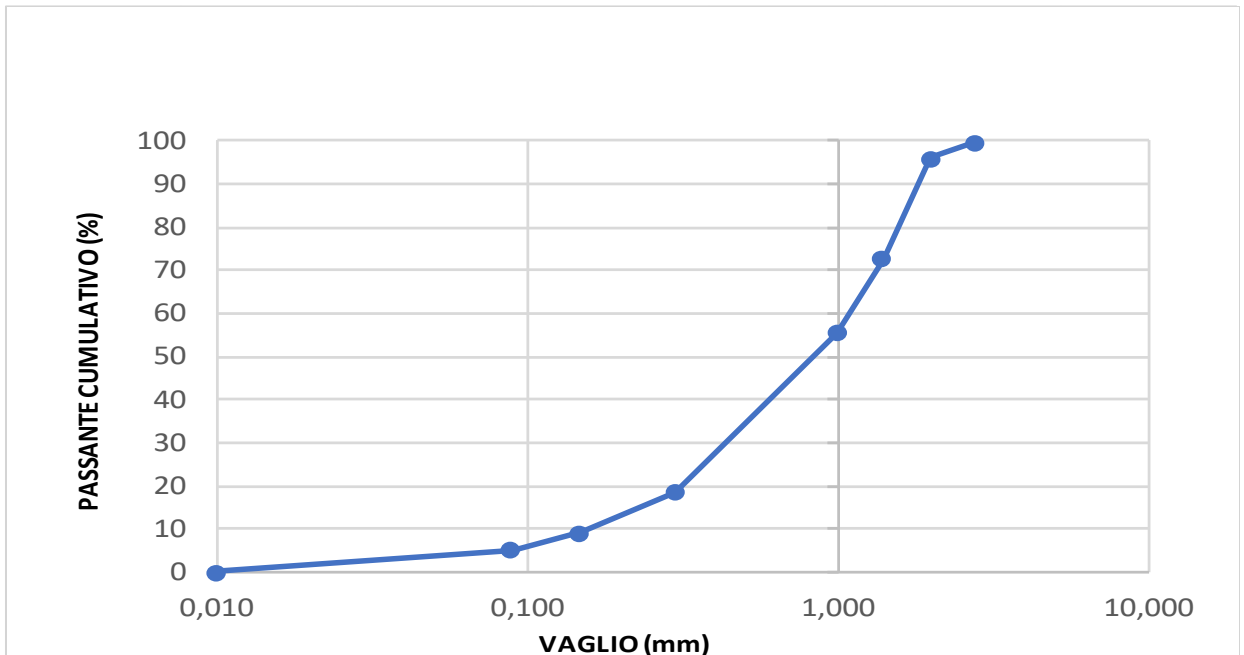


Fig. 1: curva granulometrica della sabbia 0/3.

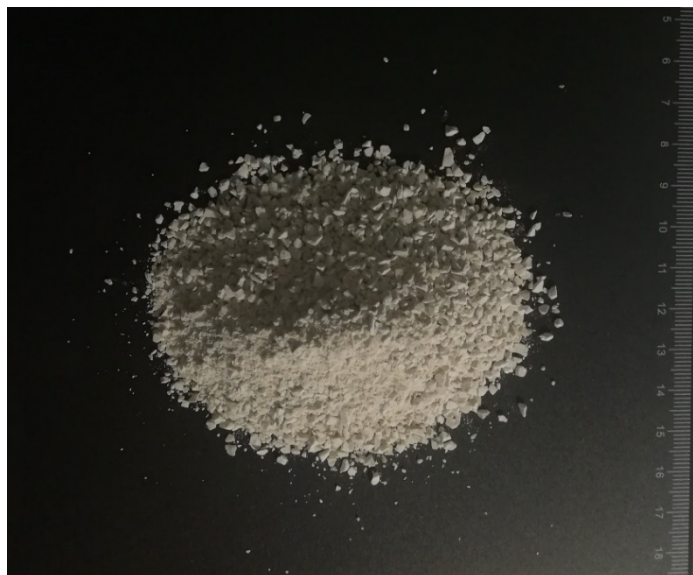


Fig. 2: sabbia calcarea 0/3.

2.2. Calce idraulica naturale

Le calce idrauliche naturali vengono identificate dalla sigla NHL X, dove la “X” indica la resistenza a compressione in MPa, raggiunta dopo 28 giorni di stagionatura.

Questa tipologia di legante si distingue dagli altri leganti aerei per via della sua idraulicità, ovvero la capacità di indurire regolarmente anche all’interno dei getti ed in condizioni di scarsa interazione con l’atmosfera. In questo studio è stata utilizzata la calce idraulica naturale NHL 5, prodotta dalla fornace Briigliadori e classificata secondo la norma UNI EN 459-1:2010. ^[23] Essa è stata ottenuta dalla calcinazione di calcari marnosi, ricchi di silice e allumina, in forni verticali a strati. Il calcare cotto viene in parte idrato e successivamente macinato senza l’aggiunta di alcun materiale che modifichi la composizione naturale della malta. Durante il trattamento termico si forma l’ossido di calcio che, andando a reagire con silice ed allumina, dà origine a due importantissimi composti: silicato bicalcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) e all’alluminato monocalcico ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), capaci di indurire anche in acqua.

Infine, dal lento processo di cottura a circa 1000 °C si ottiene una miscela di idrossido di calcio, alluminato monocalcico, silicato bicalcico, silice ed allumina non combinate, detta calce idraulica naturale. Il legante selezionato ha una densità di 2500 g/l.



Fig. 3: calce idraulica naturale NHL 5.

^[23] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, “EN 459-1 Calci da costruzione. Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità”, 2010.

2.3. Nano-calce

Il consolidante impiegato è una nano-calce prodotta dall'Università dell'Aquila (UNIVAQ) con un metodo innovativo che permette di generare, in breve tempo, nano-particelle di idrossido di calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, in sospensione acquosa, prive di impurità e prodotti secondari indesiderati. La procedura di sintetizzazione della nano-calce è basata sullo scambio di ioni, che avviene mescolando la resina a scambio anionico (Dowex Monosphere 550 A OH, prodotta dalla DOW CHEMICAL) con una soluzione acquosa di cloruro di calcio $[\text{CaCl}_2]$, in condizioni di temperatura e pressione ambiente.

“Durante l'agitazione, grazie alla sostituzione dei gruppi idrossilici $[\text{OH}^-]$ della resina con gli ioni di cloro $[\text{Cl}^-]$, si formano nano-particelle di idrossido di calcio in sospensione acquosa, che poi sono filtrate per rimuovere la resina.” ^[24]

Terminata l'agitazione si procede filtrando il prodotto ottenuto, in modo da separare la resina dalla sospensione acquosa ricca di nano-particelle di idrossido di calcio. Quest'ultimo è stato originato dalla reazione di sostituzione dei gruppi idrossilici $[\text{OH}^-]$ della resina con gli ioni di cloro $[\text{Cl}^-]$. Il nano-consolidante adoperato in questa tesi è una sospensione acquosa di nano-calce alla concentrazione di 100 g/l e con densità uguale a 2250 g/l.

^[24] G. Taglieri, V. Daniele, G. Rosatelli, S. Sfarra, M. C. Mascolo, C. Mondelli, “Eco-compatible protective treatments on an Italian historic mortar (XIV century)”, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 135, pag. 135-141, 2017.

3. SPERIMENTAZIONE

3.1. Programma di ricerca

Questo elaborato ha l'obiettivo di indagare gli effetti di un trattamento nano-consolidante sulle proprietà meccaniche e sulla durabilità delle malte a base di calce. L'intervento consolidante consiste nell'aggiungere nano-calce al volume d'impasto con dosaggi corrispondenti al 2,5%, al 5% ed al 10% in peso del legante.

I valori dei dosaggi sono appositamente scelti per consentire una correlazione lineare ed una migliore interpretazione dei risultati. Inoltre, si realizza un impasto solamente con calce idraulica naturale ed aggregato, da utilizzare come riferimento. Quindi, si procede al confezionamento di 4 impasti, che sono indicati con mix 1, mix 2, mix 3 e mix 4, corrispondenti alle differenti quote di nano-calce.

Per avere dati significativi e confrontabili vengono confezionate tutte le malte con sabbia 0/3 e calce NHL 5, tenendo in considerazione le diverse addizioni di nano-calce e l'acqua utilizzata come solvente in queste sospensioni consolidanti, così da mantenere i medesimi rapporti in peso: tra inerte (sabbia 0/3) e legante (NHL 5) pari a 3; fra acqua e legante (NHL 5) uguali a 0,64 per tutte le 4 miscele prese in esame.

Nel paragrafo 3.3, tramite il progetto delle miscele o mix design, si determinano le precise quantità degli ingredienti necessari al confezionamento degli impasti.

Tab. 2: rapporti per il confezionamento delle miscele.

MISCELA	NANO-CALCE (%)	INERTE/LEGANTE	ACQUA/LEGANTE
MIX 1	0 (RIFERIMENTO)	3,00	0,64
MIX 2	2,50	3,00	0,64
MIX 3	5,00	3,00	0,64
MIX 4	10,00	3,00	0,64

Infine, per ciascuna delle quattro miscele si realizzano: 27 provini prismatici di dimensione 40x40x160 mm per valutare lo sviluppo della resistenza nel tempo e le variazioni delle proprietà meccaniche delle malte degradate; 8 campioni cilindrici di 140 mm di diametro e 30 mm di altezza che sono sottoposti a prove di permeabilità e 8 provini cilindrici (più piccoli) di 30 mm di diametro e 40 mm di altezza, così da facilitare lo svolgimento delle prove di lisciviazione, in particolare durante le fasi di misurazione dello ione calcio, del pH e della conducibilità. Di questi 27 prismi, 3 coppie vengono sottoposte a rotture di flessione e compressione a 7, 14 e 28 giorni di stagionatura ed i 3 monconi rimanenti, che provengono dalle rotture precedenti, sono schiacciati dopo 140 giorni di maturazione, così da valutare gli sviluppi delle resistenze nel tempo.

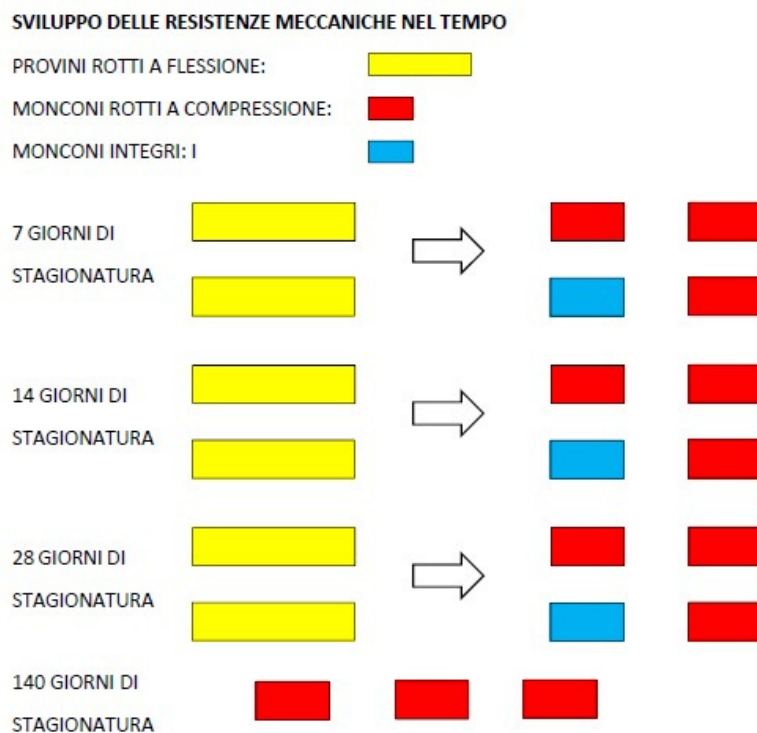






Fig. 4: schema dei provini utilizzati per indagare lo sviluppo delle resistenze nel tempo.

Per determinare le variazioni delle proprietà delle malte, in base ai diversi contenuti di nano-calce, sono stati suddivisi i campioni prismatici restanti in 4 gruppi: il primo dei provini non danneggiati da utilizzare come riferimento, il secondo da invecchiare termicamente e gli ultimi 2 da sottoporre a lisciviazione acida e lisciviazione acqua.

Per ciascun insieme, descritto precedentemente, 3 prismi vengono sottoposti a test di rottura a flessione su 3 punti. Questa tipologia di prova ha generato 6 “monconi” che sono utilizzati per determinare la resistenza a compressione, schiacciandone 3 con la pressa, mentre i 3 rimanenti vengono usati per indagare la capillarità.

I provini prismatici ed i monconi di essi, in eccedenza, vengono conservati sia per sopperire ad eventuali rotture accidentali, sia per poterli inviare successivamente all’Università dell’Aquila (UNIVAQ).

TUTTI I PROVINI NON DANNEGGIATI, INVECCHIATI TERMICAMENTE, SOTTOPOSTI A LISCIVIAZIONE

- PROVINI ROTTI A FLESSIONE: 
- MONCONI ROTTI A COMPRESSIONE: 
- MONCONI SOTTOPOSTI A PROVE DI CAPILLARITÀ: 
- PROVINI INTEGRI: 

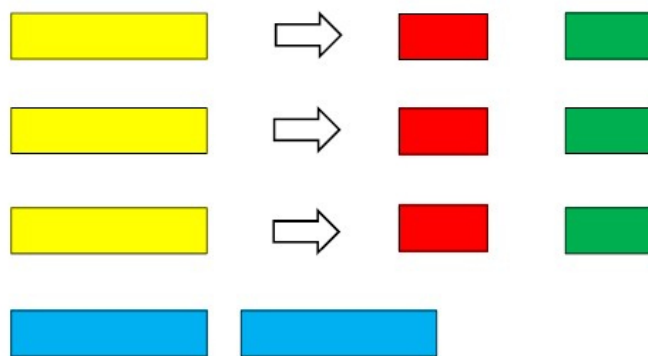


Fig. 5: schema che rappresenta l’utilizzo dei provini nelle prove relative all’indagine durabilità.

Prima di sottoporre i campioni a prove distruttive si procede con la misurazione della massa dei prismi, in modo da determinarne la densità e poter poi ricavare, indirettamente, il modulo di elasticità dinamico (E_d) attraverso una prova ad ultrasuoni non distruttiva (PUNDIT), che consente di valutare l’uniformità e l’eventuale presenza di vuoti/imperfezioni nei provini in analisi.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, dopo lo svolgimento delle prove meccaniche e dei test di cessione, vengono analizzati i “frammenti” mediante: diffrattometro a raggi X, analisi termogravimetrica, porosimetria ad intrusione di mercurio, microscopia elettronica a scansione e microtomografia.

Complessivamente, considerando le quattro miscele si confezionano in totale 108 prismi di 40x40x160 mm, 32 campioni prismatici di 140 mm di diametro e 30 mm di altezza e 32 provini prismatici di 30 mm di diametro e 40 mm di altezza, per un totale di 52 litri di volume di getto.

Questo studio si focalizza sulla parte iniziale del programma di ricerca, ovvero intende indagare gli effetti che le aggiunte di nano-calce causano sulla lavorabilità, sulle resistenze meccaniche, sulle densità allo stato fresco ed indurito e sul modulo elastico di una malta base di calce idraulica naturale.

3.2. Umidità e assorbimento aggregati

È di fondamentale importanza determinare il contenuto e l'assorbimento d'acqua degli aggregati, poiché questi, mediante le loro porosità aperte, possono modificare in modo significativo le reali quantità d'acqua presenti nell'impasto, andando ad alterare il rapporto acqua/legante e di conseguenza numerose altre proprietà.

Il contenuto d'acqua o umidità dell'inerte rappresenta la massa di acqua in percentuale rispetto la massa secca dell'inerte, mentre con assorbimento si intende il quantitativo di acqua rispetto la massa secca dell'aggregato necessario a saturarne completamente le porosità aperte.

Gli inerti possono trovarsi nelle condizioni asciutte, insature, sature a superficie asciutta o sature in base al contenuto d'acqua presente nei pori aperti. Generalmente gli aggregati si trovano in condizioni insature, ovvero con le porosità parzialmente riempite d'acqua.

Questa tipologia di indagine svolta sugli aggregati usati, nel nostro caso una sabbia, permette di evitare che durante il confezionamento vengano inserite sabbie asciutte o insature, le quali vanno a sottrarre una parte dell'acqua necessaria all'idratazione per saturare completamente i loro pori aperti.

Invece, l'aggiunta di sabbie bagnate, va a modificare il rapporto acqua/legante, cedendo l'acqua in eccesso rispetto a quella necessaria per la saturazione delle porosità aperte.

La condizione ideale è quella di un aggregato saturo a superficie asciutta, cioè un aggregato con le porosità aperte sature e la superficie asciutta, poiché non altera il rapporto acqua/legante dell'impasto. [25]

Come prima operazione si determina il contenuto in acqua della sabbia. Inizialmente, vengono pesati i contenitori, così da conoscerne la tara, per poi svolgere delle campionature di circa 500 g per ciascuno dei 3 sacchi, in questo modo sono valutate l'umidità e l'assorbimento d'acqua relativi ad ogni sacco.

Tab. 3: masse dei provini di sabbia lorde e nette.

	provino n°1	provino n°2	provino n°3
tara (g)	11,83	11,80	11,80
m _{sabbia} (netta) (g)	548,20	565,70	554,70
m _{sabbia} (lorda) (g)	560,03	577,50	566,40

I provini, dopo esser stati pesati, sono inseriti nel forno per 24 ore ad una temperatura di 105 °C, così da eliminare l'acqua presente ed individuare la massa della sabbia asciutta, riportandola con **m dry (lorda)**, mediante un'apposita bilancia.

Per assicurarsi che la sabbia in analisi sia completamente asciutta, i 3 provini vengono posizionati in forno per altre 24 ore a 105 °C, per poi pesarli di nuovo e determinarne la massa che si indica con **m dry (lorda)**'.

Conoscendo le 2 masse per ogni sacco è possibile valutare l'incremento di asciugatura dei provini applicando la seguente formula:

$$incremento(\%) = \frac{m_{dry(lorda)} - m_{dry(lorda)'} }{m_{dry(lorda)'} } \cdot 100$$

[25] L. Coppola, "Concretum", McGraw-Hill, Milano, pag. 398, 2007.

Tab 4: massa provini di sabbia e relativi incrementi asciugature.

	provino n°1	provino n°2	provino n°3
m _{dry} (lorda) (g)	548,40	565,00	555,70
m _{dry} (lorda)' (g)	548,40	565,00	555,50
incremento (%)	0,00	0,00	0,04

Dati gli incrementi prossimi allo zero, è possibile considerare le masse dei provini asciutti costanti, indicandole con **m_{dry} (lorda)**.

Note le differenze di massa tra la sabbia insatura, cioè “allo stato di fatto” e quella asciutta, si riesce a determinare il contenuto d’acqua della sabbia dei 3 sacchi, applicando la seguente formula:

$$w(\%) = \frac{m_{sabbia(netta)} - m_{dry(netta)}}{m_{dry(netta)}} \cdot 100$$

Tab. 5: contenuto d’acqua dei sacchi di sabbia.

	provino n°1	provino n°2	provino n°3
tara (g)	11,83	11,80	11,80
m _{sabbia} (netta) (g)	548,20	565,70	554,70
m _{sabbia} (lorda) (g)	560,03	577,50	566,40
DOPO VENTIQUATTRO ORE A 105° C			
m _{dry} (lorda) (g)	548,40	565,00	555,70
m _{dry} (netta) (g)	536,57	553,20	543,90
w (%)	2,17	2,27	1,99

Dopo aver stabilito l’umidità di ogni sacco di sabbia, indicandola con la “w”, si procede con la fase successiva, aggiungendo acqua nei 3 contenitori fino a coprire completamente la sabbia in analisi e lasciandola immersa per 24 ore. Il giorno dopo, l’acqua in eccesso viene rimossa utilizzando un asciugacapelli fino al conseguimento della condizione satura a superficie asciutta (s.s.a.). Il raggiungimento della situazione ricercata è verificato tramite una valutazione empirica, detta “prova del castelletto”.



Fig. 6: forma del tronco di cono della sabbia relativa al sacco 1.



Fig. 7: forma del tronco di cono della sabbia relativa al sacco 2.



Fig. 8: forma del tronco di cono della sabbia relativa al sacco 3.

Questo test consiste nell'andare ad inserire la sabbia in uno stampo per poi capovolgerlo e sollevarlo, così da valutare la forma del tronco di cono ottenuta: procedendo con questa metodologia si determina la situazione corrispondente alla sabbia satura a superficie asciutta. ^[26] Dopo aver stabilito il raggiungimento della condizione s.s.a. della sabbia, si calcola le masse dei tre provini, indicandole con $m_{ssa(lorda)}$, mentre per la massa della sabbia secca, asciugata nella prova precedente in stufa, si utilizza $m_{dry(lorda)}$.

Conoscendo le masse dei provini, è possibile ricavare l'assorbimento d'acqua della sabbia necessario ad ottenere la condizione s.s.a., applicando la seguente formula:

$$U_{ssa}(\%) = \frac{m_{ssa(lorda)} - m_{dry(lorda)}}{m_{dry(lorda)}} \cdot 100$$

Tab. 6: assorbimento d'acqua necessario al raggiungimento della condizione s.s.a.

	provino n°1	provino n°2	provino n°3
$m_{dry(lorda)}$ (g)	548,40	565,00	555,70
$m_{ssa(lorda)}$ (g)	564,60	582,70	576,00
U_{ssa} (%)	2,95	3,13	3,69

^[26] M. Colleparidi, S. Colleparidi, R. Troli, "Il nuovo calcestruzzo", Tintoretto, Treviso, pag. 83, 2009.

3.3. Mix design

Il mix design o progetto della miscela permette di determinare le proporzioni dei diversi ingredienti andando a sfruttare le correlazioni sperimentali tra la composizione dell'impasto e le sue proprietà, allo stato fresco ed allo stato indurito.

Questa procedura consente di individuare i rapporti più adatti fra le materie prime per soddisfare le principali prestazioni che si richiedono alla malta; come lavorabilità, resistenza e durabilità; tutte dipendenti principalmente dal rapporto acqua/legante e dal rapporto inerte/legante.

Nel nostro caso si procede con il confezionamento di quattro miscele, denominandole MIX 1, MIX 2, MIX 3 e MIX 4 in base alle diverse aggiunte di nano-calce che vengono effettuate. Tutte le malte sono preparate con un rapporto in peso tra inerte (sabbia 0/3) e legante (NHL 5) pari a 3 ed un rapporto in peso fra acqua e legante (NHL 5) uguale a 0,64.

Conoscendo le densità di tutti i materiali che si sono adoperati e noti i valori di umidità (w) delle sabbie e dell'assorbimento ($u_{s.s.a.}$) necessario a portarle in condizioni saturate a superficie asciutta, vengono definite le precise quantità degli ingredienti utili al confezionamento dei 4 impasti.

Nella preparazione del MIX 2 e del MIX 3 si adopera una sospensione di nano-consolidante pari a 100 g/l, mentre per il MIX 4 è stata utilizzata una sospensione di nano-calce più concentrata (200 g/l) per motivi pratici.

Nella tabella seguente si riportano le dosi che occorrono al confezionamento di un litro di getto, dei 4 impasti.

Tab. 7: dosi degli ingredienti per confezionare un litro delle miscele.

	ACQUA	NHL 5	SABBIA	NANO-CALCE
DENSITÀ (g/l)	1000,00	2500,00	2650,00	2250,00
MIX 1 (g/l)	309,23	460,39	1366,59	0,00
MIX 2 (g/l)	203,26	458,05	1360,96	11,45
MIX 3 (g/l)	103,40	455,73	1350,37	22,79
MIX 4 (g/l)	123,01	451,16	1339,74	45,12

3.4. Confezionamento delle miscele

Si procede alla preparazione di 13 litri di malta per ciascuno dei quattro getti, andando a miscelare le quantità degli ingredienti necessari che sono state calcolate, moltiplicando per 13 le dosi individuate con il mix design descritto nel paragrafo 3.3.

Tab. 8: quantità degli ingredienti necessari al confezionamento di quattro miscele.

MISCELA	ACQUA (g)	CALCE NHL 5 (g)	SABBIA (g)	SOSPENSIONE NANO-CALCE	
				(g)	(cm ³)
MIX 1 (0% N-C)	4020	5985	17766	0	0
MIX 2 (2,5% N-C)	2642	5955	17693	149	1489
MIX 3 (5% N-C)	1344	5925	17555	296	2962
MIX 4 (10% N-C)	1599	5865	17404	587	2933

Precedentemente alle operazioni di confezionamento e getto degli impasti, sono stati allestiti i casseri metallici rivestendoli internamente con due strati di nastro adesivo: il primo di carta gommata ed il secondo di nastro adesivo, in modo da poter rimuovere poi con facilità i provini, evitando il rischio di romperli senza applicare l'olio disarmante che andrebbe ad influenzare la superficie del provino compromettendo le prove successive.



Fig. 9: casseri rivestiti internamente di nastro adesivo.

La prima fase di preparazione consiste nel determinare mediante un'apposita bilancia le quantità di materiale che occorrono per la produzione delle 4 malte.



Fig. 10: secchi di sabbia e calce NHL 5 appena pesati.

Dopo aver pesato ogni singolo componente, con una cazzuola vengono mescolate sabbia e calce, inserendole gradualmente in un apposito contenitore più grande. In questo modo si riesce a semplificare le fasi successive, come l'aggiunta della sospensione nano-consolidante e dell'acqua. Successivamente viene aggiunta una parte dell'acqua necessaria al confezionamento, mentre si prosegue con la miscelazione manuale. Poi, continuando a mescolare, si ha cura di inclinare e ruotare periodicamente, di circa 90°, il recipiente, così da ottenere una maggiore omogeneità. Infine, è inserita la soluzione di nano-calce.

La miscelazione delle componenti solide deve avvenire per almeno 5 minuti.

Infine, si introduce nella miscela l'acqua d'impasto residua, dopo averla usata per ripulire il cilindro graduato con cui è stato misurato il corretto quantitativo di nano-consolidante da inserire. Una volta impastati a mano tutti gli ingredienti, si completa il confezionamento utilizzando per circa 3 minuti un miscelatore elettrico; prestando particolare attenzione al mescolamento delle zone più critiche, come i bordi ed il fondo, così da non lasciare porzioni di materiale non idratato.



Fig. 11: confezionamento dell'impasto mediante un miscelatore elettrico.



Fig. 12: malta gettata nei casseri e posizionata sul tavolo vibrante per completare il costipamento.

Dopo aver misurato la lavorabilità e la densità allo stato fresco delle miscele, operazioni descritte rispettivamente nei paragrafi 4 e 5, quest'ultime vengono gettate nei casseri utilizzando una cazzuola. In questa fase, con l'aiuto di una spatola piatta, ci si assicura che l'impasto raggiunga anche gli spigoli e, dopo aver riempito una metà circa del contenitore, si procede a batterlo manualmente per rimuovere eventuali bolle d'aria. Poi, si procede l'operazione di getto riempiendo i casseri interamente e si completa il costipamento mediante un tavolo vibrante che viene azionato per 30 secondi o comunque fino al costipamento.

Completato il getto, si avvolgono tutti i casseri con la pellicola in PVC per poi sigillarli con il nastro adesivo, così da evitare scambi di umidità con l'ambiente esterno, garantendo una stagionatura umida ed infine riporli per 2 giorni in camera di stagionatura.

Dopo aver lasciato indurire i provini per 2 giorni in camera di stagionatura ad una $T = 20 \pm 2$ °C ed $UR = 95 \pm 5$ % costanti, i provini vengono rimossi dai casseri in cui sono stati gettati. Per facilitare le operazioni di distacco ed estrazione dei campioni prismatici, le pareti metalliche vengono percosse lievemente con un martello. Complessivamente si ottengono, per ognuna delle 4 miscele, 27 prismi, 8 campioni cilindrici ed altri 8 provini cilindrici più piccoli. In conclusione, tutti i provini, rimossi dai rispettivi casseri, sono avvolti e sigillati con della pellicola in PVC e del nastro adesivo, contrassegnati in base al mix di appartenenza e giorno di getto ed infine vengono riposti in camera di stagionatura. La maggior parte dei provini prismatici e tutti i campioni cilindrici subiscono la stagionatura per più di 28 giorni. Nelle prime 2 settimane, si lasciano maturare i provini in piccoli gruppi sigillati con pellicola e nastro adesivo, così da evitare scambi di umidità con l'ambiente e fra i campioni stessi.

Trascorse le prime 2 settimane, la pellicola in PVC ed il nastro dai provini sono rimossi lasciandoli esposti all'aria nella camera di stagionatura per 14 giorni, in condizioni di $UR = 65 \pm 5\%$ ed una $T = 20 \pm 2$ °C. Si è deciso di allungare la stagionatura a umido da 7 giorni, come indicato dalla normativa sulle malte da intonaco, a 14 giorni per evidenziare l'eventuale capacità delle particelle di nano-calce di agire come ulteriori siti di nucleazione per la crescita di nuovi C-S-H.

In questo secondo periodo di maturazione è promossa la carbonatazione dei campioni, ovvero l'anidride carbonica atmosferica si combina con l'idrossido di calcio, presente come

prodotto della reazione precedente e come nano-consolidante, formando carbonato di calcio CaCO_3 e contribuendo all'aumento progressivo della resistenza meccanica.



Fig. 13: stagionatura di una parte dei campioni durante la seconda fase di maturazione.

Raggiunto il periodo di 28 giorni, vengono rimossi i provini dalla camera di stagionatura per poi riporli all'esterno e lasciarli maturare all'aria.



Fig. 14: stagionatura dei campioni all'esterno durante l'ultima fase della maturazione.

4. LAVORABILITÀ

4.1. Teoria

La lavorabilità è una proprietà caratteristica degli impasti freschi che rappresenta la loro attitudine a muoversi, ovvero la facilità delle miscele ad esser trasportate, gettate e a compattarsi, in modo da espellere l'aria intrappolata per raggiungere la massima densità possibile. Inoltre, questa qualità influenza fortemente le prestazioni della malta indurita. Esistono diverse tipologie di prove per classificare gli impasti analizzati secondo le classi di consistenza, in questa tesi si adoperava la tavola a scosse.

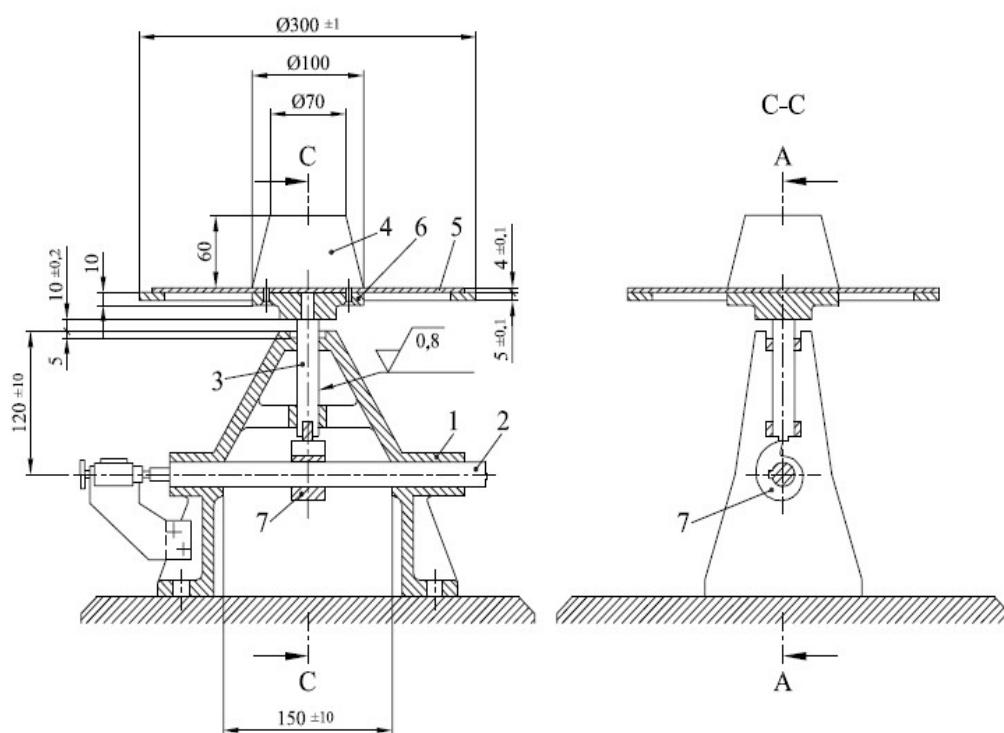


Fig. 15: tavola a scosse: 1 Supporto; 2 albero orizzontale; 3 asta di sollevamento; 4 stampo troncoconico; 5 disco; 6 piano rigido; 7 camma di sollevamento. Tutte le dimensioni sono in mm. ^[27]

^[27] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, "UNI EN 1015-3 Metodi di prova per malte per opere murarie. Parte 6: Determinazione della massa volumica apparente della malta fresca (mediante tavola a scosse)", pag. 6, 2007.

Per determinare la fluidità delle 4 miscele fresche, si esegue la procedura descritta nella norma UNI EN 1015-3, ove “il valore di fluidità viene misurato tramite il diametro medio di un campione di prove della malta fresca che è stato posizionato su un disco definito di una tavola a scosse, per mezzo di uno stampo definito e che, è quindi sottoposto ad un certo numero di impatti verticali”.^[28]

4.2. Metodo

Prima della prova, si mescola manualmente l'impasto mediante una cazzuola, così da poter indagarne una porzione rappresentativa, assicurandosi che il disco e lo stampo siano puliti. Poi, lo stampo troncoconico viene posizionato al centro del disco e si procede con l'inserimento della miscela con una cazzuola, mentre eventuali bolle d'aria sono eliminate utilizzando una spatola piatta. Una volta riempita la forma, si va a rimuovere la malta eccedente e dopo aver sollevato lentamente lo stampo in direzione verticale, viene azionata la tavola a scosse, vibrando 15 colpi, alla frequenza di un colpo al secondo. Subito dopo aver azionato la macchina del test, si valuta lo spandimento, misurando i diametri nelle due direzioni perpendicolari, così da calcolare il valore medio delle misure e determinare la classe di consistenza corrispondente a ciascuna miscela. Infatti, viene effettuata la classificazione degli impasti in base al diametro misurato e poi sono suddivisi in: rigido se è minore di 140 mm; plastico quando è compreso fra 140 e 200 mm; soft per spandimenti maggiori ai 200 mm, in accordo alla normativa UNI EN 1015-6.

^[28] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, “UNI EN 1015-3 Metodi di prova per malte per opere murarie. Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse)”, pag. 3, 2007.

4.3. Risultati e discussione

Di seguito si riportano le immagini degli spandimenti misurati nelle 2 direzioni perpendicolari dei 4 mix.



Fig. 16: nel mix 1 si ottiene uno spandimento di 133 e 134 mm.



Fig. 17: nel mix 2 si ottiene uno spandimento di 132 e 133 mm.



Fig. 18: nel mix 3 si ottiene uno spandimento di 130 e 136 mm.



Fig. 19: nel mix 4 si ottiene uno spandimento di 136 e 137 mm.

Tab. 9: risultati della tavola a scosse.

MISCELA	DIAMETRI (mm)	SLUMP medio (mm)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	133,0	133,5
	134,0	
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	132,0	132,5
	133,0	
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	130,0	133,0
	136,0	
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	136,0	136,5
	137,0	

Tab. 10: variazione percentuali degli slump degli impasti.

MISCELA	SLUMP medio (mm)	VARIAZIONE SLUMP (%)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	133,5	0 RIFERIMENTO
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	132,5	- 0,7
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	133,0	- 0,4
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	136,5	+ 2,0

Dalla tabella precedente è possibile notare che i valori degli slump, misurati nelle miscele in analisi, si discostano minimamente dal valore dello slump del primo mix che funge da riferimento. Nello specifico le miscele 2 e 3, che contengono rispettivamente il 2,5 ed il 5% di nano-calce hanno uno spandimento inferiore di percentuali minori al 1%, mentre nel mix 4, nel quale si trova la maggiore dose di nano-consolidante, si registra un aumento dello spandimento di circa il 2%. Complessivamente, i 4 impasti presi in esame, nonostante le variazioni minime rispetto alla miscela di riferimento, sono caratterizzati da slump minori di 140 mm, perciò sono tutti classificabili come rigidi. In conclusione, si può affermare che l'aggiunta della nano-calce non determina modifiche significative della lavorabilità degli impasti.

5. DENSITÀ ALLO STATO FRESCO

5.1. Teoria

La densità è una proprietà caratteristica di ogni sostanza e rappresenta il rapporto tra la massa ed il volume. In questa tesi vengono calcolate sia le densità delle miscele allo stato fresco, cioè le masse volumiche apparenti secondo la procedura indicata dalla norma UNI EN 1015-6, sia le densità delle malte indurite. La norma infatti si basa sul principio per cui “la massa volumica di una malta fresca viene determinata dal rapporto tra la sua massa ed il volume che occupa quando viene introdotta o introdotta e compattata in modo predeterminato, in un recipiente di misurazione avente capacità nota”. ^[29]

^[29] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, “UNI EN 1015-6 Metodi di prova per malte per opere murarie. Parte 6: Determinazione della massa volumica apparente della malta fresca”, pag. 2, 2007.

5.2. Metodo

Prima della prova, si procede col miscelare brevemente l'impasto con una spatola per assicurarsi di eseguire campionature rappresentative e determinare la tara del contenitore vuoto che si va a riempire di malta. Infine, dopo aver determinato la massa di 200 cm³ per ognuna delle 4 miscele, si calcola la loro massa volumica allo stato fresco. I risultati vengono poi riportati nella seguente tabella.

Tab. 11: densità alo stato fresco delle quattro miscele.

MISCELA	MASSA (g)	ρ (g/cm ³)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	413,140	2,066
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	412,370	2,062
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	411,240	2,056
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	398,110	1,991



Fig. 20: determino la massa del recipiente con 200 cm³ all'interno utilizzando una bilancia.

5.3. Risultati e discussione

Confrontando le masse volumiche delle miscele contenenti diverse percentuali di nano-calce, con la miscela 1 priva di nano-consolidante così da utilizzarla come riferimento, si nota che la presenza di nano-calce influenza lievemente le densità degli impasti allo stato fresco, determinando riduzioni del 0,2% per il mix 2, del 0,5% per il mix 3 ed un calo maggiore del 3,6% nel caso del mix 4.

Tab. 12: variazioni delle densità allo stato fresco, rispetto al mix 1.

MISCELA	ρ (g/cm ³)	VARIAZIONE ρ (%)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	2,066	0 (RIFERIMENTO)
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	2,062	- 0,200
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	2,056	- 0,500
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	1,991	- 3,600

6. DENSITÀ ALLO STATO INDURITO

6.1. Metodo

Si indagano le masse volumiche dei provini dopo 7, 14, 28 e 140 giorni di stagionatura, così da ricavare le masse e le densità dei campioni prima di sottoporli alle prove distruttive, utili a valutarne le resistenze meccaniche a flessione e compressione. Inizialmente, si determina la massa di due prismi per ciascuno dei quattro mix e dopo 7, 14, 28 e 140 giorni di stagionatura, mediante una bilancia poi, conoscendone le dimensioni, è possibile calcolarne le densità applicando la seguente formula:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad [\rho] = \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

dove m : massa(g)
 v : volume(cm³)

Utilizzando questa modalità è possibile ricavare i valori delle masse e delle densità dei provini prismatici dopo 7, 14, 28 e 140 giorni di maturazione riportandoli nelle 3 tabelle seguenti.

Tab. 13: densità a 7 giorni dal getto.

MISCELA	MASSA (g)	ρ (g/cm ³)	ρ_m (g/cm ³)
MIX 1 (0% nano-calce)	574,38	2,24	2,17
	538,95	2,11	
MIX 2 (2,5% nano-calce)	542,47	2,12	2,11
	538,88	2,11	
MIX 3 (5% nano-calce)	535,90	2,09	2,09
	535,72	2,09	
MIX 4 (10% nano-calce)	543,57	2,12	2,13
	547,74	2,14	

Tab. 14: densità a 14 giorni dal getto.

MISCELA	MASSA (g)	ρ (g/cm ³)	ρ_m (g/cm ³)
MIX 1 (0% nano-calce)	533,77	2,09	2,13
	555,52	2,17	
MIX 2 (2,5% nano-calce)	530,86	2,07	2,11
	549,18	2,15	
MIX 3 (5% nano-calce)	532,38	2,08	2,07
	528,96	2,07	
MIX 4 (10% nano-calce)	548,51	2,14	2,12
	536,12	2,09	

Tab. 15: densità a 28 giorni dal getto.

MISCELA	MASSA (g)	ρ (g/cm ³)	ρ_m (g/cm ³)
MIX 1 (0% nano-calce)	495,68	1,94	1,89
	473,42	1,85	
MIX 2 (2,5% nano-calce)	484,70	1,89	1,90
	489,92	1,91	
MIX 3 (5% nano-calce)	483,42	1,89	1,89
	482,11	1,88	
MIX 4 (10% nano-calce)	dato mancante	dato mancante	dato mancante
	dato mancante	dato mancante	

Tab. 16: densità a 140 giorni dal getto.

MISCELA	MASSA (g)	ρ (g/cm ³)	ρ_m (g/cm ³)
MIX 1 (0% nano-calce)	479,08	1,87	1,89
	488,13	1,91	
MIX 2 (2,5% nano-calce)	472,73	1,85	1,86
	479,66	1,87	
MIX 3 (5% nano-calce)	473,33	1,85	1,83
	461,10	1,80	
MIX 4 (10% nano-calce)	484,50	1,89	1,86
	469,14	1,83	

I valori della massa e della densità consentono lo svolgimento di ulteriori analisi e correlazioni, poiché la densità dei provini allo stato solido è utilizzata per ricavare indirettamente il modulo elastico dinamico, mentre si adoperano le masse per indagare le variazioni di peso che avvengono durante la maturazione.

6.2. Risultati e discussione

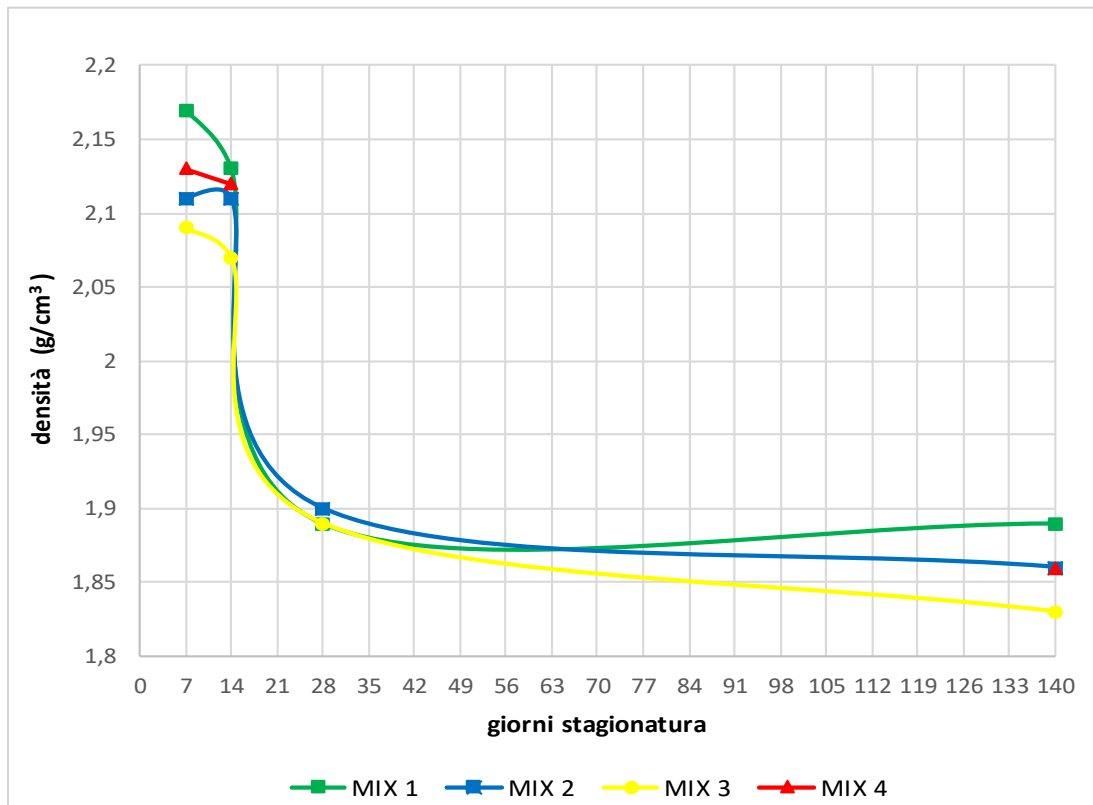


Fig. 21: andamento delle densità dei campioni nel tempo.

Osservando il grafico, riportato nella figura 21, si nota che le densità misurate sui provini a 28 giorni sono minori di circa il 10-13% rispetto a quelle calcolate sui prismi a 7 giorni da getto. Nella tabella seguente sono state riportate le variazioni delle densità allo stato indurito rispetto al mix 1, utilizzato come riferimento. Esse sono state calcolate su provini sottoposti a 4 diversi periodi di stagionatura. In questo modo si va a ricercare gli effetti dei diversi dosaggi di nano-calce sulle masse volumiche.

Tab. 17: variazione della densità a 7, 14, 28 e 140 giorni dal getto.

STAGIONATURA	PROVINO	$\rho_{\text{media}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	VARIAZIONE ρ_{m} (%)
7 GIORNI	MIX 1	2,17	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	2,11	- 3,00
	MIX 3	2,09	- 4,00
	MIX 4	2,13	- 2,00
14 GIORNI	MIX 1	2,13	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	2,11	- 1,00
	MIX 3	2,07	- 3,00
	MIX 4	2,12	- 1,00
28 GIORNI	MIX 1	1,89	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	1,90	+ 1,00
	MIX 3	1,89	0,00
	MIX 4	DATO MANCANTE	DATO MANCANTE
140 GIORNI	MIX 1	1,89	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	1,86	- 2,00
	MIX 3	1,83	- 3,00
	MIX 4	1,86	- 2,00

Osservando i valori della tabella, le densità analizzate nei provini stagionati 7 giorni, presentano riduzioni del 3% per il mix 2, del 4% per il mix 3 e del 2% per il mix 4 rispetto alla densità del mix 1, che è il riferimento. È possibile rilevare un andamento simile anche nei provini maturati per 14 giorni, dove le densità diminuiscono del 1% nel mix 2, del 3% nel mix 3 e del 1% nel mix 4.

Invece, leggendo i valori delle densità e le rispettive variazioni contenuti nella tabella delle misurazioni svolte sui provini prismatici dopo 28 giorni di maturazione, si registra un leggero aumento pari allo 1% per il mix 2 ed una densità costante per il mix 3. Infine, osservando i dati relativi alle densità misurate a 140 giorni di stagionatura, è possibile osservare che si manifesta l'andamento delle precedenti misurazioni a 7 e 14 giorni. Infatti, le masse volumiche diminuiscono del 2% nella miscela 2, del 3% nella miscela 3 e del 2% nella miscela 4.

Tab. 18: variazioni delle densità dei provini maturati 28 giorni e quelli stagionati 140 giorni.

MISCELA	$\rho_{,m 28}$ (g/cm ³)	$\rho_{,m 140}$ (g/cm ³)	VARIAZIONE $\rho_{,m}$ (%)
MIX 1 (0% nano-calce)	1,89	1,89	0,00
MIX 2 (2,5% nano-calce)	1,90	1,86	- 2,00
MIX 3 (5% nano-calce)	1,89	1,83	- 3,00
MIX 4 (10% nano-calce)	dato mancante	1,86	dato mancante

Quest'ultima tabella permette di constatare che la tendenza, evidenziata in modo sintetico dal grafico precedente, si manifesta, in modo più attenuato, anche nei provini sottoposti a stagionature prolungate. Infatti, andando a confrontare le densità dei prismi stagionati a 140 giorni, si nota un calo del 2% per il mix 2 e del 3% per il mix 3 rispetto alle masse volumiche misurate a 28 giorni dal getto ad eccezione del mix 1, la cui massa volumica si mantiene costante.

Dalle analisi e dai confronti delle densità calcolate su provini appartenenti a diverse miscele e stagionati per periodi differenti, si evince che le percentuali di nano-calce inserite negli impasti influenzano le densità dei prismi.

Le perdite di peso maggiore ed i conseguenti cali delle densità dei prismi, vengono registrati nel periodo che va dai 14 ai 28 giorni dal getto, che corrisponde al passaggio dalla stagionatura umida a quella normale. Poi le diminuzioni della massa volumica riscontrate durante le lunghe stagionature sono trascurabili.

7. RESISTENZE MECCANICHE A FLESSIONE E COMPRESSIONE

7.1. Teoria

Le resistenze meccaniche vengono definite in base alla tipologia di forza applicata e rappresentano alcune delle proprietà più importanti dal punto di vista ingegneristico, perché rivelano il massimo sforzo che le porzioni di materiale geometricamente definite riescono a sopportare prima del collasso. I componenti meccanici delle malte indurite sono influenzati dalla porosità, soprattutto quella capillare che dipende dalla composizione e dalla stagionatura dell'impasto e dalla zona di transizione, ovvero l'interfaccia tra l'aggregato e la matrice formata dai prodotti derivanti dalla reazione del legante, che nonostante le dimensioni ridotte condiziona le proprietà compressive, favorendo l'inesco e la propagazione delle micro-fessure.

7.2. Metodo

Questa tesi intende indagare le resistenze meccaniche a flessione e compressione dei provini prismatici di dimensione 40x40x160 mm, seguendo la normativa UNI EN 1015-11 che prescrive di incominciare i test distruttivi con la rottura a flessione su 3 punti, per poi sottoporre i monconi derivanti dalla rottura precedente ad una prova di compressione. I test distruttivi, necessari a valutare le prestazioni meccaniche, si svolgono utilizzando 2 diversi porta-campione. Il primo utile per valutare la resistenza a flessione su 3 punti. Esso è composto da 3 rulli in acciaio: un rullo superiore di carico e 2 rulli inferiori di sostegno distanziati di 100 mm. Mentre l'altro porta-campione serve per determinare la resistenza a compressione, costituita da 2 piastre quadrate in risalto, una superiore e l'altra inferiore, di lato pari a 40 mm. Entrambi i porta-campione vengono posizionati in una pressa idraulica dotata di una cella di carico che va ad applicare uno spostamento a velocità costante, fino a raggiungere il collasso del provino e, grazie ad un terminale connesso alla pressa, si riesce ad elaborare i dati della prova in controllo di spostamento, così da ricavare il massimo carico sopportato.

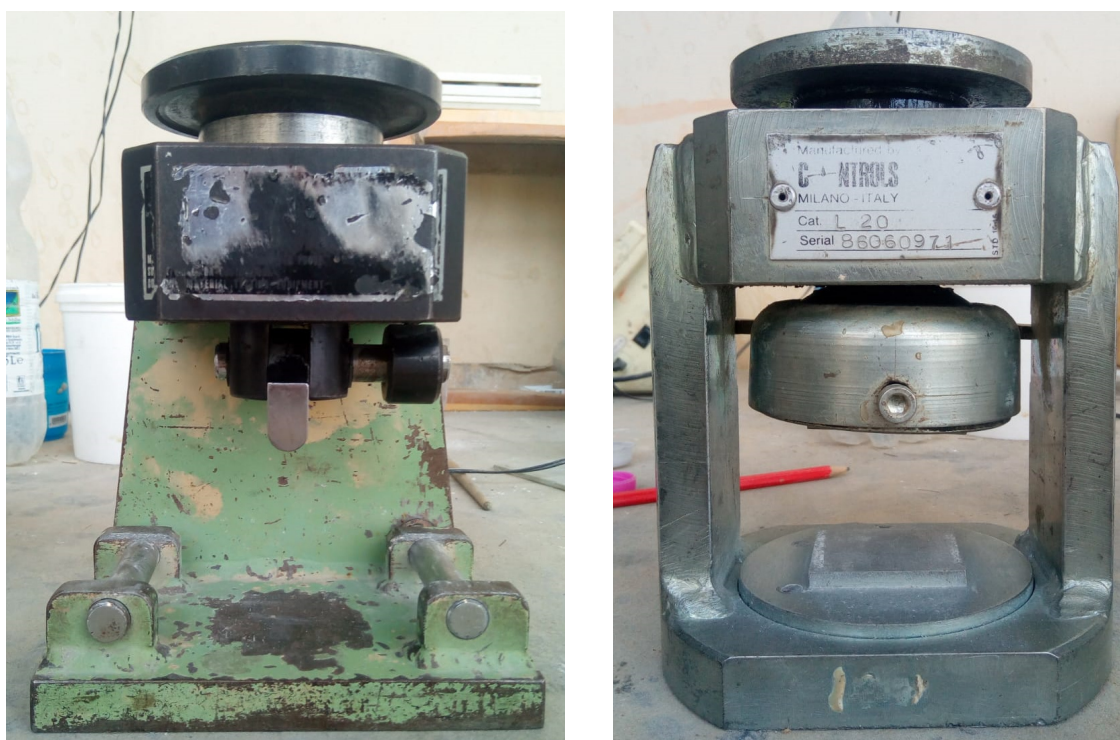


Fig. 22: porta-campione per rottura a flessione a sinistra ed a compressione a destra.

Le immagini rappresentano i porta-campione utilizzati nei test, precisamente nella foto a destra è raffigurato un porta-campione adatto alla resistenza a flessione su 3 punti, mentre a sinistra è rappresentato quello per la compressione. Per ottenere dati significativi e confrontabili viene rotta una coppia di provini prismatici, per ciascuna delle 4 miscele in analisi, dopo 7, 14, 28 e 140 giorni di maturazione. In questo modo si riesce ad analizzare eventuali variazioni delle resistenze meccaniche nel tempo delle malte a base di calce, indotte da diverse aggiunte percentuali di nano-calce.

Quindi, basandosi sulle prescrizioni riportate dalla norma UNI EN 1015-11,^[30] si va ad indagare la resistenza a flessione R_f , posizionando il provino prismatico, delle dimensioni di 40x40x160 mm, nell'apposito porta-campione avendo cura di poggiare sui rulli di appoggio le superficie del campione gettate precedentemente contro le facce metalliche dello stampo.

^[30] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, "UNI EN 1015-11 Metodi di prova per malte per opere murarie. Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita", 2007.

È molto importante assicurarsi la pulizia dei rulli e dei lati del prisma, strofinandoli preventivamente con un panno per rimuovere eventuali particelle non inglobate di aggregato o altri materiali. Dopo aver posizionato il porta-campione nella pressa, viene applicato lo spostamento a velocità costante finché non si raggiunge la rottura del prisma, mentre il terminale, collegato alla cella, elabora i dati in termini di abbassamento e forza corrispondente, così da registrare anche quello responsabile del collasso. Infine, conoscendo le geometrie ed il carico critico, è possibile ricavare la resistenza a flessione applicando la seguente formula:

$$R_{flessione} = \frac{3 \cdot f \cdot d}{2 \cdot a^2 \cdot h} \quad \left[R_{flessione} \right] = \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

dove:

- f è la forza applicata [kN];
- d è la distanza tra i rulli di appoggio [mm];
- a, h, l sono le dimensioni del prisma [mm].

d (mm)	a (mm)	h (mm)	l (mm)
100	40	40	160

Nelle tabelle successive sono riportate le resistenze a flessione su 3 punti e le relative medie, dei 2 provini prismatici rotti dopo 7, 14 e 28 giorni di maturazione, per ognuna delle 4 miscele esaminate.

Tab. 19: sviluppo resistenza a flessione MIX 1.

MIX 1 (0% NANO-CALCE)			
GIORNI	$R_{f,1}$ (N/mm ²)	$R_{f,2}$ (N/mm ²)	$R_{f,m}$ (N/mm ²)
7	0,70	0,77	0,74
14	1,22	1,01	1,11
28	0,82	0,81	0,82

Tab. 20: sviluppo della resistenza a flessione MIX 2.

MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)			
GIORNI	$R_{f,1}$ (N/mm ²)	$R_{f,2}$ (N/mm ²)	$R_{f,m}$ (N/mm ²)
7	0,66	0,47	0,56
14	0,70	0,61	0,66
28	1,13	1,22	1,17

Tab. 21: sviluppo della resistenza a flessione MIX 3.

MIX 3 (5% NANO-CALCE)			
GIORNI	$R_{f,1}$ (N/mm ²)	$R_{f,2}$ (N/mm ²)	$R_{f,m}$ (N/mm ²)
7	0,35	0,38	0,36
14	0,91	0,82	0,87
28	0,82	0,80	0,81

Tab. 22: sviluppo della resistenza a flessione MIX 4.

MIX 4 (10% NANO-CALCE)			
GIORNI	$R_{f,1}$ (N/mm ²)	$R_{f,2}$ (N/mm ²)	$R_{f,m}$ (N/mm ²)
7	0,35	0,33	0,34
14	0,66	0,82	0,74
28	1,01	0,52	0,76

Nella prova precedente ogni prisma, rompendosi a flessione, ha dato origine a 2 mezzi prismi che sono sottoposti a schiacciamento per determinare la resistenza a compressione. La prima operazione consiste nel pulire le superfici delle piastre e le facce del provino con un panno, così da rimuovere eventuali impurità presenti che andrebbero ad influenzare i risultati, per poi andare a collocare il moncone nell'apposito porta-campione, prestando attenzione che il carico venga applicato su una delle facce gettate contro le pareti dello stampo.

Successivamente, si posiziona il porta-campione sulla pressa per eseguire la prova, applicando uno spostamento a velocità costante fino a causare la rottura del provino. Durante lo svolgimento della prova, il terminale processa i dati inviategli dalla cella di carico, restituendoli come abbassamento (Δl) e forza relativa, in modo da evidenziare quella critica per il provino. Quindi seguendo la norma UNI EN 1015-11, si analizza la resistenza a compressione schiacciando tre monconi per ognuno dei quattro mix in analisi, a 7, 14, 28 e 140 giorni di stagionatura. In questo modo è possibile prima ricavare la massima forza sopportata e poi, note le dimensioni, calcolare la resistenza a compressione R_c , applicando la seguente formula:

$$R_{compressione} = \frac{f}{a^2} \quad \left[R_{compressione} \right] = \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

dove:

- f è la forza applicata [kN];
- a è la misura del lato delle piastre [mm];

Di seguito, vengono riportate le tabelle contenenti le resistenze compressione e le relative medie, di 3 monconi schiacciati a 7, 14, 28 e 140 giorni di stagionatura, per ognuna delle 4 miscele prese in esame. Mentre, i rispettivi grafici sforzo-deformazione sono inseriti nell'appendice.

Tab. 23: sviluppo della resistenza a compressione MIX 1.

MIX 1 (0% NANO-CALCE)				
GIORNI	$R_{c,1}$ (N/mm ²)	$R_{c,2}$ (N/mm ²)	$R_{c,3}$ (N/mm ²)	$R_{c,m}$ (N/mm ²)
7	2,16	2,13	1,96	2,14
14	3,28	3,47	3,40	3,38
28	5,07	5,53	5,35	5,31
140	5,69	7,09	6,34	6,37

Tab. 24: sviluppo della resistenza a compressione MIX 2.

MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)				
GIORNI	$R_{c,1}$ (N/mm ²)	$R_{c,2}$ (N/mm ²)	$R_{c,3}$ (N/mm ²)	$R_{c,m}$ (N/mm ²)
7	2,37	2,34	2,26	2,33
14	2,94	2,89	2,29	2,71
28	5,74	5,20	5,76	5,57
140	5,42	6,01	5,29	5,58

Tab. 25: sviluppo della resistenza a compressione MIX 3.

MIX 3 (5% NANO-CALCE)				
GIORNI	$R_{c,1}$ (N/mm ²)	$R_{c,2}$ (N/mm ²)	$R_{c,3}$ (N/mm ²)	$R_{c,m}$ (N/mm ²)
7	1,29	1,46	1,56	1,44
14	2,40	2,31	2,32	2,34
28	4,58	4,72	4,89	4,73
140	4,53	3,12	4,27	3,97

Tab. 26: sviluppo della resistenza a compressione MIX 4.

MIX 4 (10% NANO-CALCE)				
GIORNI	$R_{c,1}$ (N/mm ²)	$R_{c,2}$ (N/mm ²)	$R_{c,3}$ (N/mm ²)	$R_{c,m}$ (N/mm ²)
7	1,71	1,76	1,61	1,69
14	2,55	2,76	2,81	2,71
28	5,39	5,09	4,38	4,95
140	6,70	6,43	5,27	6,13

7.3. Risultati e discussione

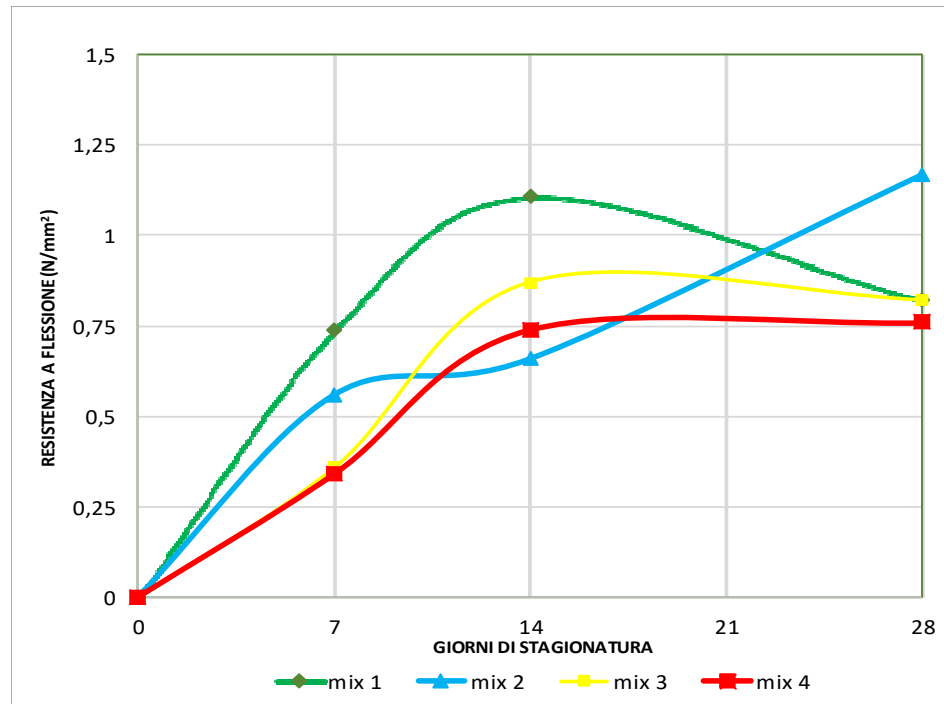


Fig. 23: la figura rappresenta il grafico dello sviluppo delle resistenze a flessione nel tempo.

Grazie al grafico che riporta gli andamenti delle resistenze meccaniche a flessione nel tempo, è possibile individuare facilmente come le aggiunte di nano-calce vadano a penalizzare di poco le resistenze a flessione su 3 punti che rimangono sempre inferiori a 1,5 MPa, anche dopo 28 giorni di stagionatura.

Tab. 27: incrementi o diminuzioni delle resistenze a flessione dopo 7, 14 e 28 giorni in base al contenuto di nano-calce.

STAGIONATURA	PROVINO	R _{f,m} (N/mm ²)	VARIAZIONI R _f (%)
7 GIORNI	MIX 1	0,74	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	0,56	- 24,00
	MIX 3	0,36	- 51,00
	MIX 4	0,34	- 54,00
14 GIORNI	MIX 1	1,11	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	0,66	- 41,00
	MIX 3	0,87	- 22,00
	MIX 4	0,74	- 33,00
28 GIORNI	MIX 1	0,82	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	1,17	+ 43,00
	MIX 3	0,81	- 1,00
	MIX 4	0,76	- 7,00

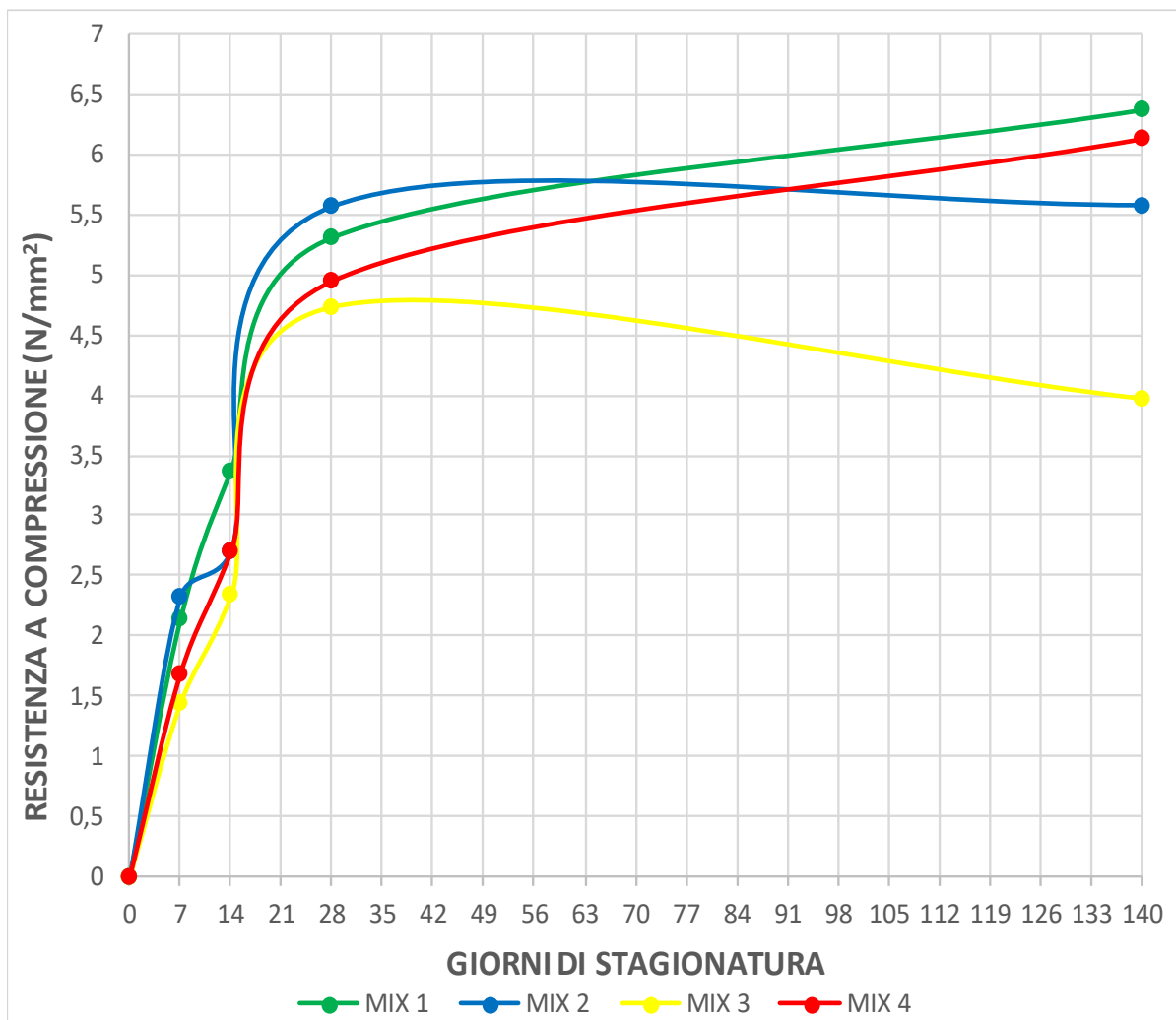


Fig. 24: la figura rappresenta il grafico dello sviluppo delle resistenze a compressione nel tempo.

Il grafico riportato nella figura 24 permette di apprezzare lo sviluppo delle resistenze a compressione nel tempo, perché sullo stesso piano raffigura gli incrementi progressivi, relativi alle 4 miscele in esame, in funzione del tempo di stagionatura.

Nella tabella seguente vengono riportate le resistenze a compressione di provini stagionati per 7, 14, 28 e 140 giorni e le relative variazioni rispetto i valori registrati nel mix 1.

In questo modo si possono determinare gli effetti dei diversi dosaggi di nano-calce sulle resistenze a compressione.

Tab. 28: incrementi o diminuzioni delle resistenze a compressione dopo 7, 14, 28 e 140 giorni in base al contenuto di nano-calce.

STAGIONATURA	PROVINO	$R_{c,m}$ (N/mm ²)	VARIAZIONI R_c (%)
7 GIORNI	MIX 1	2,14	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	2,33	+ 9,00
	MIX 3	1,44	- 33,00
	MIX 4	1,69	-21,00
14 GIORNI	MIX 1	3,38	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	2,71	- 20,00
	MIX 3	2,34	- 31,00
	MIX 4	2,71	- 20,00
28 GIORNI	MIX 1	5,31	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	5,57	+ 5,00
	MIX 3	4,73	- 11,00
	MIX 4	4,95	- 7,00
140 GIORNI	MIX 1	6,37	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	5,58	- 12,00
	MIX 3	3,97	- 38,00
	MIX 4	6,13	- 4,00

Osservando i valori della tabella misurati dopo 28 giorni di stagionatura, si nota un aumento della resistenza del 5% nel mix 2, mentre sono registrate discrete diminuzioni pari al 11% nel mix 3 ed al 7% nel mix 4, rispetto al mix 1 utilizzato come riferimento.

Le resistenze calcolate su provini stagionati per 140 giorni e rapportate a quelle misurate nel mix 1, evidenziano riduzioni della resistenza a compressione: del 12% per il mix 2; del 38% per il mix 3; del 4% per il mix 4.

Tab. 29: incrementi o diminuzioni delle resistenze a compressione nei provini stagionati per 140 giorni rispetto a quelli stagionate per 28 giorni in base al contenuto di nano-calce.

MISCELA	$R_{c\ 28,m}$ (N/mm ²)	$R_{c\ 140,m}$ (N/mm ²)	VARIAZIONI R_c (%)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	5,31	6,37	+ 20,00
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	5,57	5,58	+ 0,20
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	4,73	3,97	- 16,00
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	4,95	6,13	+ 24,00

In quest'ultima tabella sono indicate le variazioni delle resistenze raggiunte dopo 140 giorni, rispetto a quelle misurate a 28 giorni dal getto e si propone di analizzare gli effetti dei diversi dosaggi di nano-calce sulle resistenze a lungo termine.

Infatti, è possibile osservare che le resistenze aumentano del 20% nella miscela 1, priva di nano-calce e di un trascurabile 0,2% nella miscela 2, mentre nelle miscele ove si è operato una maggiore sostituzione della calce idraulica naturale con il nano-consolidante, si registrano una riduzione della resistenza a compressione pari al 16% nel mix 3 ed un notevole incremento pari al 24% nel mix 4.

Le resistenze meccaniche sono fortemente influenzate dai rapporti fra gli ingredienti degli impasti e le tecniche di realizzazione. Perciò, in questa tesi, sono stati adottati gli stessi rapporti: acqua/legante; inerte/legante e le medesime lavorazioni in tutti i provini confezionati, per far sì che le variazioni tra le resistenze dei campioni, appartenenti ai 4 mix presi in analisi, dipendano soltanto dalle addizioni di nano-consolidante effettuate nelle 4 miscele prese in esame. Analizzando e confrontando i risultati ottenuti dai test distruttivi, si può affermare che le aggiunte di nano-calce influenzano notevolmente le resistenze meccaniche dei provini in malta di calce idraulica naturale.

Infatti, si nota che a 28 giorni di stagionatura, il mix 2 presenta un incremento delle resistenze a flessione e compressione; invece nei mix 3 e 4, caratterizzati da aggiunte di percentuali di nano-consolidante maggiori, si registrano riduzioni delle resistenze meccaniche.

Durante i primi 14 giorni di stagionatura a umido, nonostante dopo 7 giorni di maturazione il mix 2 ha fatto registrare un valore di R_c leggermente superiore rispetto al mix di riferimento, dopo 14 giorni anche questo beneficio svanisce. Pertanto, la nano-calce agendo come possibile sito di nucleazione di nuovi C-S-H nella realtà non riesce a compensare la penalizzazione di resistenza meccanica indotta dall'aggiunta di nano-consolidante nella miscela. Anche nella successiva stagionatura all'aria per ulteriori 14 giorni (28 giorni di stagionatura totali), l'aumento delle prestazioni meccaniche, dovute alla carbonatazione della nano-calce aggiunta all'impasto, sono stati sufficienti per compensare la penalizzazione delle resistenze meccaniche dovute al minor contenuto di prodotti di idratazione generati dal legante idraulico, in seguito all'aggiunta della nano-calce, solo nel mix 2 (2,5% di nano-calce).

Invece, confrontando le resistenze meccaniche a compressione misurate dopo 140 giorni di stagionatura con quelle calcolate a 28 giorni dal getto, si riscontra un considerevole aumento delle resistenze a lunghe stagionature per il mix 1 e per il mix 4, mentre si registra un aumento quasi trascurabile nel mix 2 ed addirittura una diminuzione nel mix 3.

Dopo aver discusso e confrontato i dati precedenti, è possibile affermare che solo l'aggiunta di nano-calce pari al 2,5% in peso del legante idraulico, consente di migliorare anche solo di poco le resistenze meccaniche a 28 giorni di stagionatura (14 giorni a umido e 14 giorni all'aria). Inoltre, questo miglioramento viene perso dopo 135 giorni di maturazione all'aria. Grazie allo studio delle porosità si potrà misurare la quantità e la distribuzione dei pori, così da poter interpretare i risultati delle resistenze meccaniche.

8. MODULO ELASTICO

8.1. Teoria

Il modulo elastico o modulo di Young è una proprietà specifica di ogni materiale e ne rappresenta la sua rigidità, ovvero il rapporto tra la tensione σ e la deformazione ε corrispondente.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Quindi il modulo E indica la resistenza che il materiale oppone alle deformazioni elastiche causate da una tensione, perciò un valore alto del modulo di elasticità è caratteristico di un materiale molto rigido che si deforma poco se sollecitato, mentre un modulo di Young basso identifica un materiale più deformabile.

Osservando i grafici delle prove di compressione eseguite sui provini in malta di calce, si nota la non linearità nella correlazione sforzo-deformazione al crescere dello sforzo.

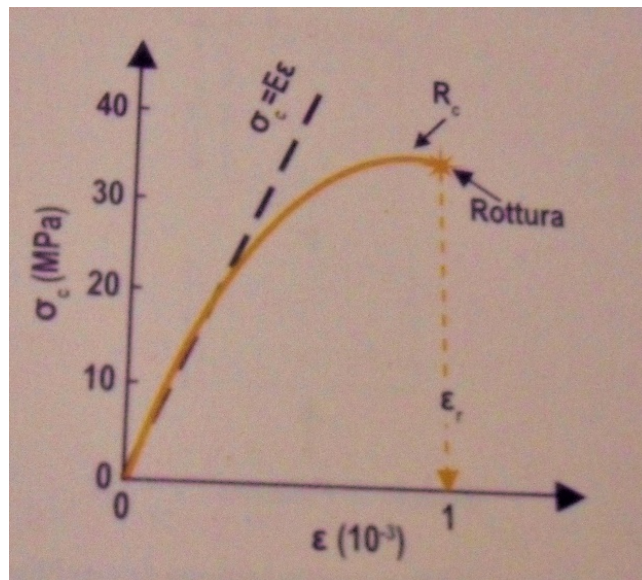


Fig. 25: correlazione sforzo-deformazione di un provino in calcestruzzo sottoposto a compressione. ^[31]

^[31] M. Colleparidi, S. Colleparidi, R. Troli, "Il nuovo calcestruzzo", Tintoretto, Treviso, pag. 445, 2009.

Infatti, le malte a base di calce essendo formate da materiali diversi presentano delle zone di transizione ove si concentrano difetti e microfessurazioni. È possibile constatare che in corrispondenza di sforzi di compressione inferiori al 40% della resistenza totale del materiale, le micro-fessure si mantengono stabili determinando un andamento lineare della parte iniziale del grafico. Poi, al crescere degli sforzi, le fessure vanno ad amplificarsi e a diffondersi all'interno dell'interfaccia pasta-aggregato, causando la non linearità della correlazione sforzo-deformazione, finché le tensioni oltrepassano il 70-75% della resistenza a compressione “creando un reticolo di fessure interconnesse che sono responsabili, a seguito dell'ulteriore incremento dello sforzo, della rottura. [...] Pertanto, il modulo di elasticità o di Young, che individua la pendenza della retta che lega lo sforzo alla deformazione può, a rigore, esser individuato soltanto nel tratto iniziale del ramo ascendente per valori della tensione applicata corrispondenti alla fase in cui le microfessure non subiscono alcuna modificazione.”^[32]

8.2. Metodo

In questo elaborato vengono calcolati il modulo elastico secante ed il modulo elastico istantaneo dei campioni appartenenti a ciascuno dei quattro mix, dopo 28 giorni di stagionatura. Il modulo elastico secante si ricava dal rapporto tra la tensione di compressione e la deformazione corrispondente, facendo riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni che affermano “per modulo elastico istantaneo del calcestruzzo va assunto quello secante tra la tensione nulla e $0,40 f_{cm}$ ”.^[33]

Dato che f_{cm} rappresenta la resistenza a compressione dei provini cilindrici e conoscendo che la relazione tra le resistenze a compressione dei provini cilindrici e cubici è uguale a:

$$f_{cm} = 0,83 \cdot R_{cm}$$

^[32] L. Coppola, “Concretum”, McGraw-Hill, Milano, pag. 335, 2007.

^[33] D.M. 17.01.2018, “Norme Tecniche per le Costruzioni”, pag. 313.

Quindi il 40% della resistenza a compressione di un provino cilindrico corrisponde al 33% della resistenza a compressione di un provino cubico. Infine, si determina il modulo elastico secante dei campioni, applicando la seguente formula:

$$E = \frac{\sigma_{1/3}}{\varepsilon_{1/3}}$$

Dove:

- $\sigma_{1/3}$ è lo sforzo di compressione generato dallo $0,33 \cdot R_{cm}$;
- $\varepsilon_{1/3}$ è la deformazione che corrisponde ad un terzo dello sforzo di compressione.

Nelle tabelle successive si riportano i valori dei moduli elastici istantanei, ottenuti dall'elaborazione grafica delle curve dei mezzi prismi sottoposti a schiacciamento e la media per ciascuno delle 4 miscele dopo 7, 14, 28 e 140 giorni di stagionatura.

Tab. 30: tabella contenente i valori dei moduli elastici calcolati graficamente, dopo 7 giorni di stagionatura.

MISCELA	R (N/mm ²)	R _{1/3} (N/mm ²)	ε corrispondente	E (GPa)	E _m (GPa)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	2,16	0,72	27,83 · 10 ⁻⁴	0,26	0,26
	2,31	0,77	27,38 · 10 ⁻⁴	0,28	
	1,96	0,65	26,85 · 10 ⁻⁴	0,24	
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	2,37	0,79	23,08 · 10 ⁻⁴	0,34	0,33
	2,34	0,78	22,45 · 10 ⁻⁴	0,35	
	2,26	0,75	24,25 · 10 ⁻⁴	0,31	
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	1,29	0,43	26,95 · 10 ⁻⁴	0,16	0,20
	1,46	0,49	22,46 · 10 ⁻⁴	0,22	
	1,56	0,52	22,45 · 10 ⁻⁴	0,23	
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	1,71	0,57	26,95 · 10 ⁻⁴	0,21	0,28
	1,76	0,59	17,89 · 10 ⁻⁴	0,33	
	1,61	0,54	17,97 · 10 ⁻⁴	0,30	

Tab. 31: tabella contenente i valori dei moduli elastici calcolati graficamente, dopo 14 giorni di stagionatura.

MISCELA	R (N/mm ²)	R _{1/3} (N/mm ²)	ε corrispondente	E (GPa)	E _m (GPa)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	3,28	1,09	23,36 · 10 ⁻⁴	0,48	0,45
	3,47	1,16	287,2 · 10 ⁻⁴	0,40	
	3,40	1,13	23,35 · 10 ⁻⁴	0,48	
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	2,94	0,98	27,84 · 10 ⁻⁴	0,35	0,33
	2,89	0,96	29,18 · 10 ⁻⁴	0,33	
	2,29	0,76	24,25 · 10 ⁻⁴	0,31	
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	2,40	0,80	32,34 · 10 ⁻⁴	0,25	0,24
	2,31	0,77	31,44 · 10 ⁻⁴	0,24	
	2,32	0,77	33,74 · 10 ⁻⁴	0,23	
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	2,55	0,85	30,53 · 10 ⁻⁴	0,28	0,32
	2,76	0,92	30,11 · 10 ⁻⁴	0,31	
	2,81	0,94	25,70 · 10 ⁻⁴	0,37	

Tab. 32: tabella contenente i valori dei moduli elastici calcolati graficamente, dopo 28 giorni di stagionatura.

MISCELA	R (N/mm ²)	R _{1/3} (N/mm ²)	ε corrispondente	E (GPa)	E _m (GPa)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	5,07	1,69	27,39 · 10 ⁻⁴	0,60	0,54
	5,53	1,84	35,48 · 10 ⁻⁴	0,53	
	5,35	1,78	35,03 · 10 ⁻⁴	0,49	
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	5,74	1,91	34,13 · 10 ⁻⁴	0,55	0,49
	5,20	1,73	36,38 · 10 ⁻⁴	0,48	
	5,76	1,92	44,91 · 10 ⁻⁴	0,43	
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	4,58	1,53	40,42 · 10 ⁻⁴	0,39	0,37
	4,72	1,57	38,18 · 10 ⁻⁴	0,41	
	4,89	1,63	53,00 · 10 ⁻⁴	0,31	
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	5,39	1,80	38,62 · 10 ⁻⁴	0,47	0,45
	5,09	1,70	39,52 · 10 ⁻⁴	0,43	

Tab. 33: tabella contenente i valori dei moduli elastici calcolati graficamente, dopo 140 giorni di stagionatura.

MISCELA	R (N/mm ²)	R _{1/3} (N/mm ²)	ε corrispondente	E (GPa)	E _m (GPa)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	5,69	1,89	28,75 · 10 ⁻⁴	0,66	0,62
	7,09	2,36	39,72 · 10 ⁻⁴	0,59	
	6,34	2,11	34,13 · 10 ⁻⁴	0,62	
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	5,42	1,81	28,74 · 10 ⁻⁴	0,63	0,65
	6,01	2,00	24,61 · 10 ⁻⁴	0,81	
	5,29	1,76	35,37 · 10 ⁻⁴	0,50	
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	4,53	1,51	34,40 · 10 ⁻⁴	0,44	0,39
	3,12	1,04	36,83 · 10 ⁻⁴	0,28	
	4,27	1,42	32,33 · 10 ⁻⁴	0,44	
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	6,70	2,23	46,25 · 10 ⁻⁴	0,48	0,49
	6,43	2,14	36,83 · 10 ⁻⁴	0,58	
	5,27	1,76	42,66 · 10 ⁻⁴	0,42	

Invece in fase di progettazione per determinare il modulo elastico, si utilizza una formula proposta dalla normativa:

$$E_{cm} = 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$$

dove:

- f_{cm} indica la resistenza cilindrica.

Siccome in questo studio si ricerca la compressione sui provini prismatici, viene applicata la seguente correlazione per trasformare le resistenze a compressione, ricavate su provini cubici, in resistenze a compressione cilindriche.

$$f_{cm} = 0,83 \cdot R_{cm}$$

Nelle tabelle successive sono poi trascritti i risultati dei moduli elastici in fase di progettazione, misurati sui provini schiacciati dopo 7, 14, 28 e 140 giorni di maturazione.

Tab. 34: valori del modulo elastico secante delle 4 miscele dopo 7 giorni di stagionatura.

MISCELA	R_c (N/mm²)	f_{cm} (N/mm²)	E (GPa)	E_{cm} (GPa)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	2,16	1,79	13,14	13,10
	2,31	1,92	13,40	
	1,96	1,63	12,76	
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	2,37	1,97	13,51	13,43
	2,34	1,94	13,46	
	2,26	1,88	13,32	
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	1,29	1,07	11,25	11,62
	1,46	1,21	11,68	
	1,56	1,29	11,91	
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	1,71	1,41	12,25	12,21
	1,76	1,46	12,35	
	1,61	1,34	12,03	

Tab. 35: valori del modulo elastico secante delle 4 miscele dopo 14 giorni di stagionatura.

MISCELA	R_c (N/mm²)	f_{cm} (N/mm²)	E (GPa)	E_{cm} (GPa)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	3,28	2,72	14,89	15,03
	3,47	2,88	15,14	
	3,4	2,82	15,05	
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	2,94	2,44	14,41	14,04
	2,89	2,39	14,34	
	2,29	1,90	13,37	
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	2,4	1,99	13,56	13,46
	2,31	1,91	13,40	
	2,32	1,93	13,42	
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	2,55	2,12	13,81	14,05
	2,76	2,29	14,14	
	2,81	2,33	14,22	

Tab. 36: valori del modulo elastico secante delle 4 miscele dopo 28 giorni di stagionatura.

MISCELA	R_c (N/mm ²)	f_{cm} (N/mm ²)	E (GPa)	E_{cm} (GPa)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	5,07	4,21	16,97	17,21
	5,53	4,59	17,42	
	5,35	4,44	17,24	
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	5,74	4,76	17,61	17,34
	5,20	4,32	17,10	
	5,76	4,78	17,63	
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	4,58	3,80	16,46	16,62
	4,72	3,92	16,61	
	4,89	4,06	16,79	
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	5,39	4,47	17,28	16,84
	5,09	4,23	17,00	
	4,38	3,64	16,25	

Tab. 37: valori del modulo elastico secante delle 4 miscele dopo 140 giorni di stagionatura.

MISCELA	R_c (N/mm ²)	f_{cm} (N/mm ²)	E (GPa)	E_{cm} (GPa)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	5,69	4,72	17,56	18,15
	7,09	5,88	18,76	
	6,34	5,26	18,14	
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	5,42	4,50	17,31	17,46
	6,01	5,00	17,87	
	5,29	4,39	17,19	
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	4,53	3,76	16,41	15,73
	3,12	2,59	14,67	
	4,27	3,54	16,11	
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	6,70	5,56	18,45	17,95
	6,43	5,34	18,23	
	5,27	4,37	17,16	

I valori dell'elasticità descrivono la deformabilità del materiale ed è possibile constatare che il loro andamento è simile a quello delle resistenze meccaniche poiché, la formula riportata sopra è basata sulla proporzionalità diretta fra le due grandezze. Rispetto ai valori determinati con il **metodo grafico**, vengono considerati più affidabili i moduli elastici ricavati dalla formula proposta dalla normativa, poiché non sono influenzati dalla scelta dello zero nella correlazione sforzo-deformazione.

Per analizzare in modo più approfondito la deformabilità del materiale, viene esaminato il modulo elastico dinamico dei provini prismatici, prima di sottoporli ai test distruttivi per valutarne le resistenze meccaniche, seguendo le indicazioni prescritte dalla normativa UNI EN 12504-4. ^[34]

In questa operazione si determina in modo indiretto il modulo E_d , sottoponendo i campioni ad una prova non distruttiva, detta PUNDIT, che permette di valutarne l'omogeneità e l'eventuale presenza di vuoti o imperfezioni, misurando le velocità di propagazione delle onde ultrasoniche nei provini. Lo strumento è costituito da due sonde: una trasmittente che emette un impulso ultrasonico, il quale attraversa il provino in analisi; l'altra ricevente, invece raccoglie l'impulso inviato, permettendo così, tramite un apposito misuratore, di quantificare il tempo di percorrenza impiegato. È molto importante tarare lo strumento prima dell'utilizzo, adoperando l'apposito cilindro metallico, così da ricavare dati precisi e rappresentativi. Inoltre, si applica un sottile strato di gel conduttivo sulle superfici delle sonde e sulle estremità del provino ove sono state posizionate le due sonde: trasmittente e ricevente, in modalità di trasmissione diretta, in modo da assicurare una perfetta adesione con il campione.



Fig. 26: PUNDIT e cilindro metallico per tararlo.

^[34] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, "UNI EN 12504-4 Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici", 2005.

Quindi, dopo aver determinato il tempo di percorrenza dell'impulso fra i due trasduttori e conoscendo le dimensioni dei prismi, vengono calcolate le velocità di attraversamento delle onde ultrasoniche nei diversi provini applicando la formula:

$$v = \frac{d}{t} \quad [v] = \left[\frac{m}{s} \right]$$

Dove:

- d è la lunghezza del prisma espressa in metri, pari a 0,16 m;
- t è il tempo di percorrenza degli impulsi espresso in secondi.

Poi, ricavate le densità dei provini prismatici, le velocità con cui gli impulsi si propagano al loro interno ed assumendo il modulo di Poisson dinamico pari a quello del calcestruzzo, cioè uguale a 0,2: si misura il modulo elastico dinamico dei prismi in esame applicando la seguente formula:

$$E_d = \rho \cdot v^2 \cdot \frac{[(1 + \nu_d) + (1 - 2 \cdot \nu_d)]}{(1 - \nu_d)} \quad [E_d] = [GPa]$$

Dove:

- ρ è la densità del provino in $[kg/m^3]$;
- v è la velocità di propagazione delle onde all'interno dei prismi;
- ν_d è il modulo di Poisson dinamico.

Le tabelle successive contengono la media dei valori del modulo E_d , calcolato su coppie di provini prismatici, rappresentative delle 4 miscele in analisi, prima delle rotture meccaniche a 7, 14, 28 e 140 giorni dal getto.

Tab. 38: media dei moduli E_d dei campioni stagionati 7 giorni.

PROVINO	ρ (Kg/m ³)	T (μ s)	v (m/s)	$E_{d,m}$ (GPa)
MIX 1	2107,00	82,05	1956,00	16,21
MIX 2	2110,00	87,15	1837,00	13,92
MIX 3	2090,00	83,50	1923,00	15,15
MIX 4	2130,00	107,40	1490,00	9,23

Tab. 39: media dei moduli E_d dei campioni stagionati 14 giorni.

PROVINO	ρ(Kg/m³)	T (μs)	v (m/s)	$E_{d,m}$ (GPa)
MIX 1	2130,00	65,60	2439,00	24,68
MIX 2	2110,00	67,90	2357,00	22,84
MIX 3	2070,00	71,85	2227,00	20,06
MIX 4	2120,00	76,45	2093,00	18,09

Tab. 40: media dei moduli E_d dei campioni stagionati 28 giorni.

PROVINO	ρ(Kg/m³)	T (μs)	v (m/s)	$E_{d,m}$ (GPa)
MIX 1	1890,00	76,50	2092,00	16,14
MIX 2	1900,00	83,85	1909,00	13,52
MIX 3	1890,00	83,80	1914,00	13,50
MIX 4	DATO MANCANTE	DATO MANCANTE	DATO MANCANTE	DATO MANCANTE

Tab. 41: media dei moduli E_d dei campioni stagionati 140 giorni.

PROVINO	ρ(Kg/m³)	T (μs)	v (m/s)	$E_{d,m}$ (GPa)
MIX 1	1890,00	86,50	1850,00	12,49
MIX 2	1860,00	85,20	1878,00	12,70
MIX 3	1830,00	80,87	1979,00	14,01
MIX 4	1859,00	91,30	1753,00	11,33

8.3. Risultati e discussione

In questo paragrafo vengono discussi i risultati relativi ai moduli elastici dei provini, confrontandoli tra loro in base alle diverse addizioni di nano-calce eseguite ed ai differenti periodi di stagionatura a cui sono stati sottoposti.

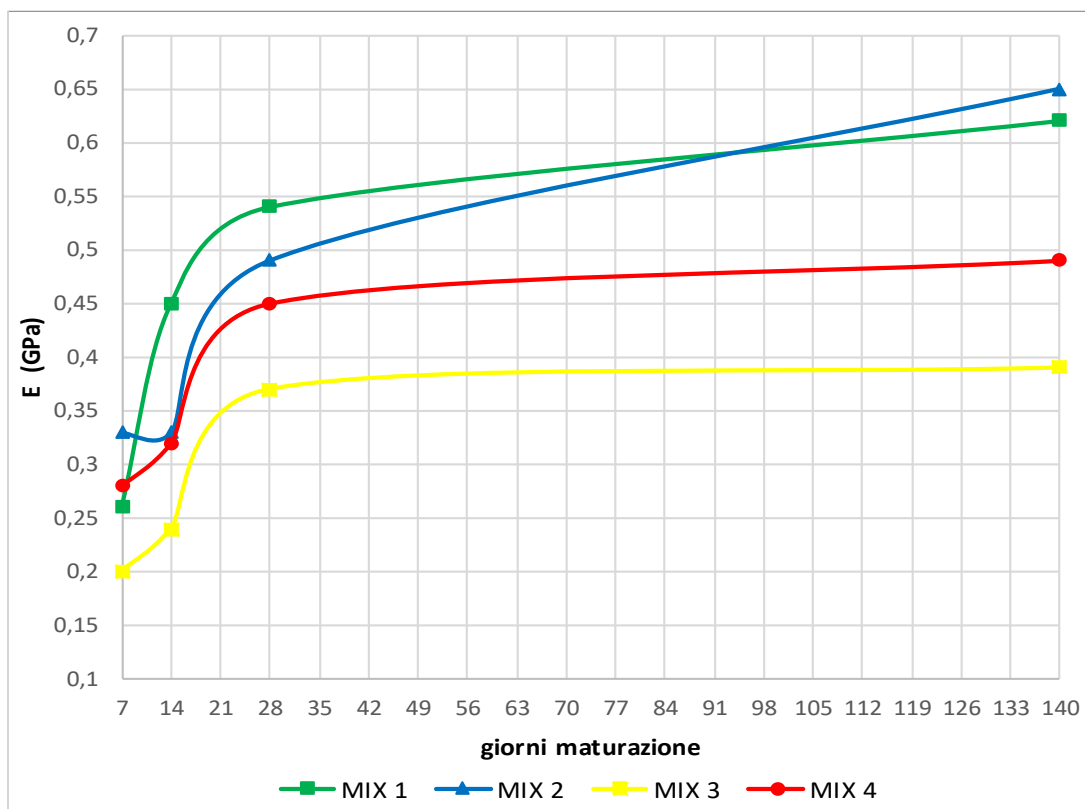


Fig. 27: andamento del modulo elastico, determinato graficamente, nel tempo.

Il grafico riportato nella figura 27 permette di apprezzare l'andamento dei moduli elastici, determinati graficamente, perché nello stesso piano vengono rappresentate le variazioni delle rigidità nel tempo, relative alle 4 miscele in analisi.

La tabella seguente contiene i moduli elastici ricavati dai grafici degli schiacciamenti dei provini stagionati per 7, 14, 28 e 140 giorni e le relative variazioni rispetto i valori registrati per il mix 1, i quali sono usati come riferimento in quanto privi di nano-consolidante.

In questo modo vengono indagati gli effetti dei diversi dosaggi di nano-calce sui moduli elastici determinati mediante metodo grafico.

Tab. 42: incrementi o diminuzioni dei moduli elastici, determinati con il metodo grafico, dopo 7, 14, 28 e 140 giorni in base al contenuto di nano-calce aggiunta all'impasto.

STAGIONATURA	PROVINO	E (GPa)	VARIAZIONI E (%)
7 GIORNI	MIX 1	0,26	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	0,33	+ 27,00
	MIX 3	0,20	- 23,00
	MIX 4	0,28	+ 8,00
14 GIORNI	MIX 1	0,45	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	0,33	- 27,00
	MIX 3	0,24	-47,00
	MIX 4	0,32	- 29,00
28 GIORNI	MIX 1	0,54	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	0,49	- 9,00
	MIX 3	0,37	- 32,00
	MIX 4	0,45	- 17,00
140 GIORNI	MIX 1	0,62	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	0,65	+ 5,00
	MIX 3	0,39	- 37,00
	MIX 4	0,49	- 21,00

Dall'analisi dei valori della tabella, si nota che i moduli elastici calcolati, nei provini dopo 7 giorni di stagionatura, presentano incrementi del 27% per il mix 2, del 8% per il mix 4 ed una riduzione del 23% per il mix 3, rispetto al mix 1. Invece, nei moduli elastici misurati a 14 giorni dal getto e rapportati con i moduli elastici relativi al mix di riferimento, si notano cali del 27% per il mix 2, del 47% per il mix 3 e del 29% per il mix 4.

Anche i risultati relativi ai moduli elastici, calcolati nei provini stagionati per 28 giorni, presentano diminuzioni del 9% per il mix 2, del 32% per il mix 3 e del 17% per il mix 4.

Infine, dal confronto dei moduli elastici calcolati dopo lunghi periodi di maturazione, a 140 giorni dal getto, si rileva un aumento pari al 5% nel mix 2 e delle riduzioni pari al 37% nel mix 3 ed al 21% nel mix 4, rispetto il mix 1, utilizzato come riferimento.

Tab. 43: incrementi o diminuzioni dei moduli elastici stagionate 140 giorni rispetto a quelle stagionate 28 gioni in base al contenuto di nano-calce.

MISCELA	$E_{28,m}$ (GPa)	$E_{140,m}$ (GPa)	VARIAZIONI E_m (%)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	0,54	0,62	+ 15,00
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	0,49	0,65	+ 33,00
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	0,37	0,39	+ 5,00
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	0,45	0,49	+ 9,00

Quest'ultima tabella permette di analizzare le variazioni dei moduli elastici nei provini sottoposti a lunghi periodi di maturazione, andando a confrontare i moduli elastici dei prismi stagionati per 140 giorni con quelli misurati a 28 giorni dal getto. In questo modo si possono notare degli incrementi del 15% per il mix 1, del 33% per il mix 2, del 5% per il mix 3 e del 9% per il mix 4.

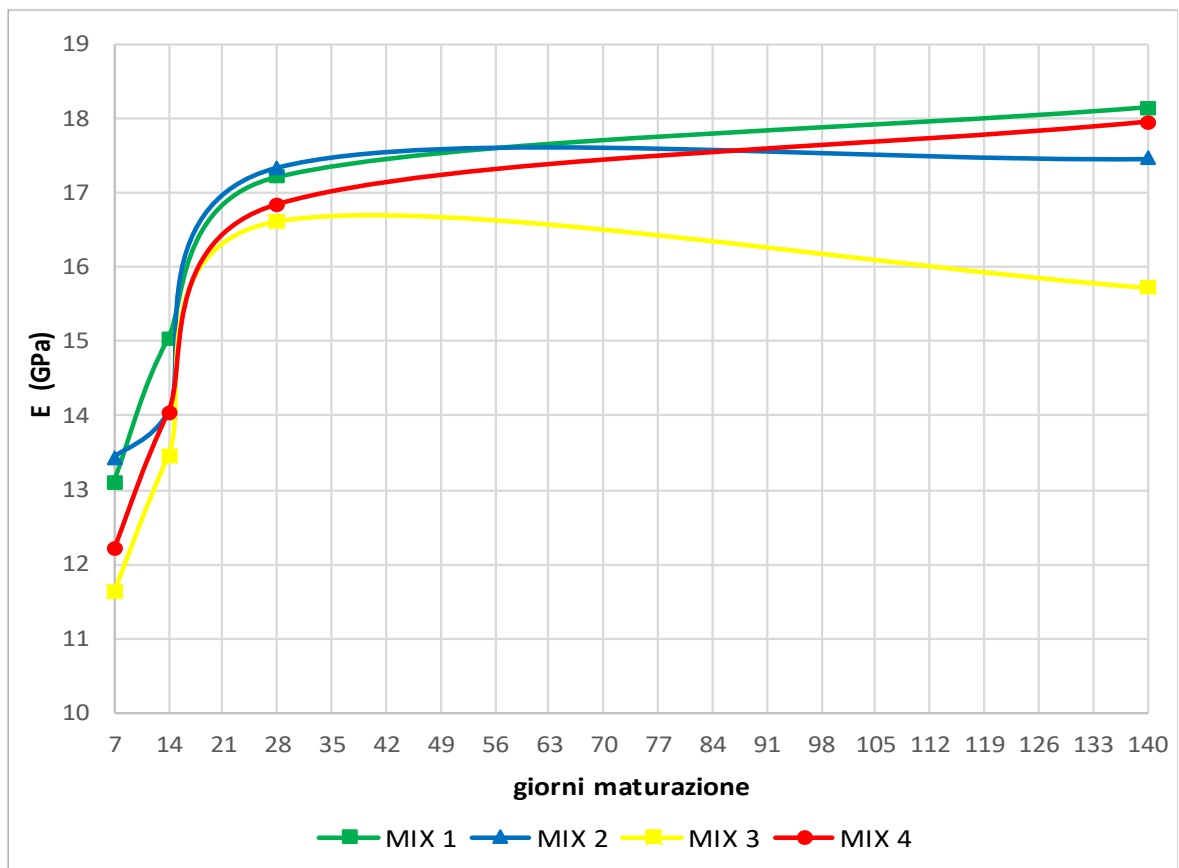


Fig. 28: andamento nel tempo del modulo elastico, calcolato con la formula proposta dalla normativa.

Dall'osservazione del grafico, riportato nella figura 28, si nota come i moduli elastici, determinati utilizzando la formula proposta dalla normativa, risentano nel tempo dei differenti quantitativi di nano-calce aggiunta negli impasti.

Nella seguente tabella si riportano i moduli elastici calcolati sui provini appartenenti alle 4 diverse miscele e sottoposti a differenti periodi di stagionatura.

Tab. 44: incrementi o diminuzioni dei moduli elastici, determinati con la formula proposta dalla normativa, dopo 7, 14, 28 e 140 giorni in base al contenuto di nano-calce aggiunta all'impasto.

STAGIONATURA	PROVINO	E_{media} (GPa)	VARIAZIONI E_m (%)
7 GIORNI	MIX 1	13,10	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	13,43	+ 3,00
	MIX 3	11,62	- 11,00
	MIX 4	12,21	- 7,00
14 GIORNI	MIX 1	15,03	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	14,04	- 7,00
	MIX 3	13,46	- 11,00
	MIX 4	14,05	- 7,00
28 GIORNI	MIX 1	17,21	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	17,34	+ 1,00%
	MIX 3	16,62	- 3,00%
	MIX 4	16,84	- 2,00
140 GIORNI	MIX 1	18,15	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	17,46	-4,00
	MIX 3	15,73	-13,00
	MIX 4	17,95	-1,00

Dalla lettura della tabella, si nota un incremento dei moduli elastici, misurati nei provini a 7 giorni dal getto, pari al 3% nel mix 2 e delle diminuzioni delle rigidezze pari al 11% nel mix 3 ed al 7% nel mix 4, rispetto al mix 1 utilizzato come riferimento. Anche confrontando le rigidità relative ai campioni maturati per 14 giorni, vengono riscontrate delle riduzioni dei moduli elastici pari al 7% nel mix 2, al 11% nel mix 3 ed al 7% nel mix 4.

La tendenza notata nelle prime 2 settimane si manifesta pure nei moduli elastici misurati su provini stagionati per 28 giorni, perché ad eccezione di un trascurabile aumento del 1% della rigidità nel mix 2, si osservano delle diminuzioni del modulo elastico pari al 3% nel caso del mix 3 ed al 2% nel caso del mix 4.

Infine, dal confronto delle rigidità misurate dopo 140 giorni di stagionatura e le relative variazioni rispetto i dati provenienti dai prismi del mix 1, si evidenzia un calo del modulo elastico del 4% nel 2, del 13% nel mix 3 e del 1% nel mix 4.

Tab 45: incrementi o diminuzioni dei moduli elastici stagionate 140 giorni rispetto a quelle stagionate 28 giorni in base al contenuto di nano-calce aggiunta alle miscele.

MISCELA	E _{28,m} (GPa)	E _{140,m} (GPa)	VARIAZIONI E _m (%)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	17,21	18,15	+ 6,00
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	17,34	17,46	+ 1,00
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	16,62	15,73	- 5,00
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	16,84	17,95	+ 7,00

La tabella, precedente, permette di confrontare i valori dell'elasticità dei campioni maturati per 140 giorni con quelli misurati su prismi a 28 giorni dal getto, così è possibile individuare le variazioni del modulo elastico dovute ai diversi dosaggi di nano-calce nei provini sottoposti a lunghe stagionature. Inoltre, si osserva che il modulo elastico aumenta del 6% nella miscela 1, priva di nano-calce, del 1% nella miscela 2 e del 7% nella miscela 4, mentre nella miscela 3 si registra una riduzione della rigidità del 5%.

In quest'ultima parte sono analizzati i moduli elastici dinamici misurati sui provini appartenenti alle diverse miscele prima di sottoporli a prove distruttive, così da studiarne in modo più approfondito la deformabilità dei campioni prismatici nel tempo a 7, 14, 28 e 140 giorni di stagionatura e le relative variazioni rispetto al mix 1.

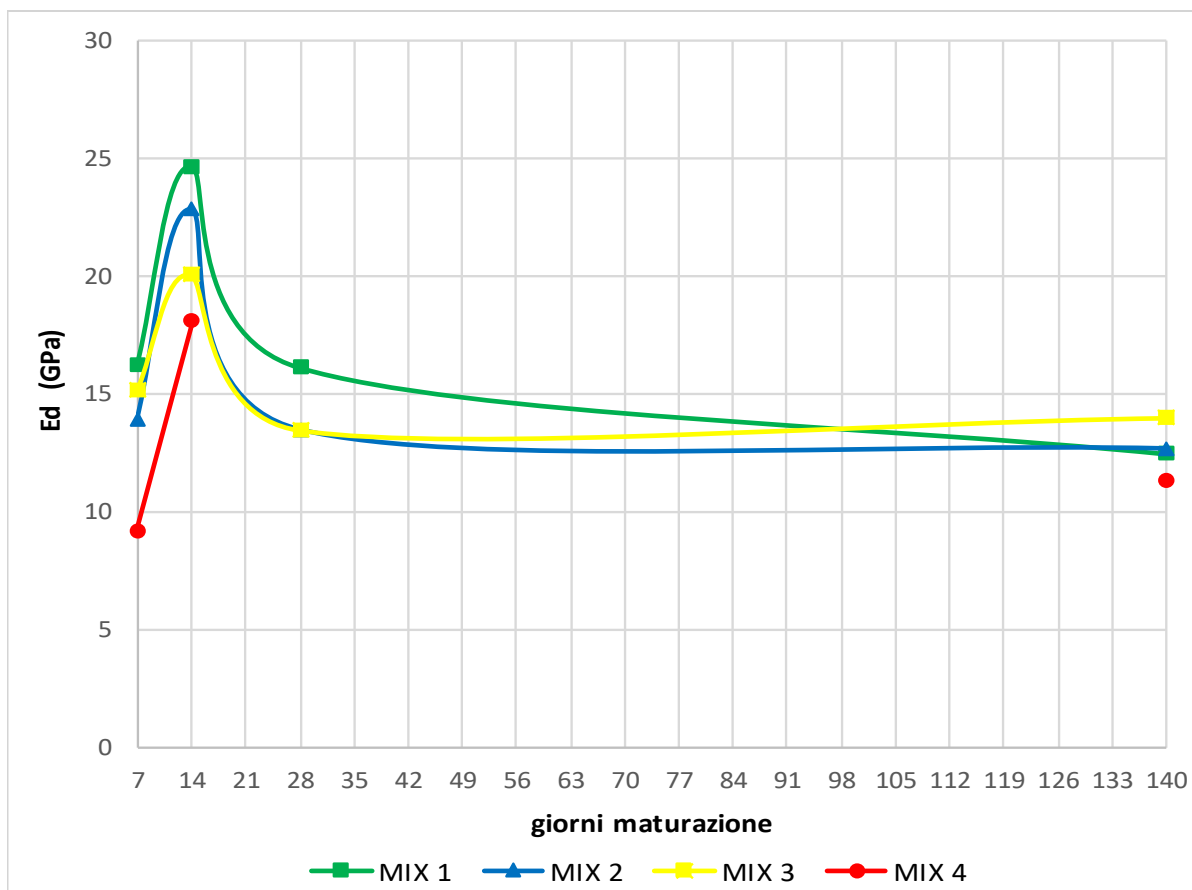


Fig. 29: andamento nel tempo del modulo elastico dinamico.

Dal grafico antecedente, riportato nella figura 29, si nota come le diverse quantità di nano-consolidante influenzino i moduli elastici dinamici, questi nelle prime 2 settimane di stagionatura diminuiscono in base al dosaggio di nano-calce contenuta nelle miscele.

Tale tendenza viene confermata anche dai risultati ricavati su campioni maturati per 28 giorni. Invece, trascorsi 140 giorni dal getto, si riscontra che le sostituzioni operate nei mix 2 e 3 determinano un incremento della rigidità dei provini.

Tab. 46: incrementi o diminuzioni dei moduli elastici, dopo quattro periodi di stagionatura diversi, in base al contenuto di nano-calce.

STAGIONATURA	PROVINO	E _d (GPa)	VARIAZIONI E _d (%)
7 GIORNI	MIX 1	16,14	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	13,91	- 14,00
	MIX 3	15,15	- 7,00
	MIX 4	9,23	- 43,00
14 GIORNI	MIX 1	24,68	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	22,84	- 8,00
	MIX 3	20,06	- 19,00
	MIX 4	18,09	- 27,00
28 GIORNI	MIX 1	16,14	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	13,52	- 16,00
	MIX 3	13,50	- 16,00
	MIX 4	DATO MANCANTE	DATO MANCANTE
140 GIORNI	MIX 1	12,49	0,00 RIFERIMENTO
	MIX 2	12,70	+ 2,00
	MIX 3	14,01	+ 12,00
	MIX 4	11,33	- 9,00

Leggendo la tabella è possibile notare che, trascorsi 7 giorni dal getto, il modulo elastico dinamico dei prismi diminuisce: del 14% nel mix 2, del 7% nel mix 3 e del 43% nel mix 4.

Questa tendenza, causata dalla sostituzione di quantitativi sempre maggiori di nano-calce, si manifesta anche dopo 14 giorni di stagionatura. Infatti, si rileva un calo della rigidità pari al 8% per il mix2, al 19% per il mix 3 e del 27% per il mix 4.

Nei provini maturati per 28 giorni si evidenziano riduzioni del modulo elastico del 16% nel mix 2 e del 16% nel mix 3. Invece, nei prismi sottoposti a lunghi periodi di stagionatura vengono registrati un incremento della rigidità pari al 2% nel mix 2 ed al 12% nel mix 3, mentre il modulo elastico dinamico del mix 4 si riduce del 9%.

Tab. 47: incrementi o diminuzioni dei moduli elastici stagionate 140 giorni rispetto a quelle stagionate 28 giorni in base al contenuto di nano-calce aggiunta alle miscele.

MISCELA	E_d 28 (GPa)	E_d 140 (GPa)	VARIAZIONI E_d (%)
MIX 1 (0% NANO-CALCE)	16,14	12,49	- 23,00
MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)	13,52	12,70	- 6,00
MIX 3 (5% NANO-CALCE)	13,50	14,01	+ 4,00
MIX 4 (10% NANO-CALCE)	DATO MANCANTE	11,33	DATO MANCANTE

In quest'ultima tabella sono indicate le variazioni dei moduli elastici raggiunti dopo 140 giorni, rispetto a quelli determinati a 28 giorni dal getto e si analizzano gli effetti dei diversi dosaggi di nano-calce sulle deformabilità a lungo termine.

Da un'attenta osservazione è possibile notare che i moduli elastici dinamici diminuiscono del 23% nella miscela 1, priva di nano-calce e del 6% nella miscela 2; mentre nelle miscele, ove abbiamo operato una maggiore aggiunta del nano-consolidante, si registrano incrementi della rigidità pari al 4% nel mix 3.

Dalle analisi svolte mediante test non distruttivi e dalle successive elaborazioni dei dati ricavati, si può affermare che la presenza del nano-calce influenza la deformabilità dei provini prismatici. Infatti, nei primi 14 giorni si riscontra una diminuzione della rigidità nei campioni, proporzionale al contenuto di nano-consolidante addizionato.

Poi, raggiunti i 28 giorni di maturazione, è possibile constatare un calo del modulo elastico dinamico nelle miscele contenenti nano-calce, mentre dopo 140 giorni di stagionatura si notano degli incrementi delle rigidità nelle miscele sottoposte ad aggiunte di nano-calce.

9. CONCLUSIONE

Il patrimonio culturale è costantemente minacciato da fenomeni deleteri, indotti dall'azione combinata degli agenti atmosferici, degli inquinanti e del cambiamento climatico.

Per preservare i manufatti e garantirne la conservazione nel tempo, sono state sviluppate diverse e molteplici modalità di intervento.

In questo elaborato, difatti, vengono analizzati gli effetti sulle malte a base di calce idraulica, sottoposte ad un innovativo trattamento consolidante, il quale consiste in aggiunte di nano-calce in diverse percentuali in peso del legante idraulico, nel nostro caso una calce idraulica naturale (NHL 5).

Inoltre, si indagano le variazioni inerenti a: lavorabilità, densità, resistenze meccaniche e rigidità delle miscele sottoposte all'intervento, così da valutarne la compatibilità con il substrato trattato.

In base ai risultati provenienti dalle analisi svolte sulle miscele allo stato fresco si evince che la lavorabilità, in seguito al trattamento, non subisce variazioni significative. Infatti, tutte e 4 le miscele esaminate sono classificate come rigide; mentre, le densità allo stato fresco manifestano la riduzione maggiore nel mix 4.

Confrontando le densità dei provini appartenenti alle 4 miscele e stagionati per periodi diversi, si riscontra che la quantità di nano-calce provoca cali trascurabili delle masse volumiche nei campioni induriti.

Anche paragonando i dati relativi alle prove di rottura a flessione e compressione, si nota con facilità, che le resistenze meccaniche sono fortemente influenzate dai contenuti di nano-calce inseriti nelle miscele.

Dopo 28 giorni di stagionatura, le resistenze a flessione su 3 punti aumentano nel mix 2, che contiene il minor dosaggio di nano-consolidante fra gli impasti sottoposti al trattamento. Mentre, nei mix 3 e 4 si riscontrano delle diminuzioni del massimo sforzo di flessione sopportato dal prisma. Questo andamento è presente anche nelle resistenze a compressione dei provini maturati per 28 giorni, ove vengono rilevati incrementi delle resistenze a schiacciamento soltanto nel mix 2, mentre nelle miscele 3 e 4 si registra un calo.

In seguito, per verificare le prestazioni meccaniche, dopo lunghi periodi di stagionatura, vengono confrontate le resistenze a compressione a 140 giorni dal getto con quelle misurate su provini maturati per 4 settimane. In questo modo è possibile constatare notevoli incrementi delle resistenze nel mix 1 e nel mix 4, un aumento minimo per il mix 2 ed una riduzione nel mix 3.

Perciò, dall'analisi degli andamenti delle resistenze meccaniche, misurate a 28 giorni dal getto, emerge che soltanto le aggiunte del 2,5% della nano-calce, consentono un incremento delle prestazioni meccaniche, soprattutto quelle a flessione. Mentre, dosi maggiori, pari al 5% ed al 10%, generano cali delle resistenze. Invece, dopo 140 giorni di maturazione i provini che incrementano maggiormente le resistenze a compressione nel tempo, sono quelli appartenenti al mix 1 ed al mix 4, confezionati rispettivamente con lo 0% ed il 10% di nano-calce.

Osservando e confrontando fra loro i risultati relativi sia al modulo elastico, calcolato graficamente, che al modulo elastico determinato con la formula proposta dalla normativa, è facile notare come la quantità di nano-consolidante vada ad influenzare le rigidezze dei provini in malta di calce.

Infatti, dalle analisi dei moduli elastici dei campioni prismatici stagionati per 28 giorni si riscontra un aumento della deformabilità nei mix 2, 3 e 4, legato all'aggiunta di nano-calce. Questa riduzione dei moduli elastici si manifesta anche dopo 140 giorni di stagionatura, fatta eccezione per un incremento della rigidità misurato nel mix 2, che contiene il minor dosaggio di nano-consolidante fra le malte trattate.

Poi, comparando i moduli elastici calcolati a 140 giorni dal getto con quelli misurati dopo 28 giorni di maturazione, si registra un incremento della rigidità per i mix 1, 2 e 4, mentre la miscela 3, contenente il 5,0% di nano-calce, risulta più deformabile.

Anche i risultati dei moduli elastici dinamici, calcolati indirettamente per valutare l'omogeneità e la rigidità dei provini, nei primi 28 giorni di stagionatura confermano un andamento caratterizzato da una maggiore deformabilità dei campioni prismatici, legata alle addizioni di nano-consolidante.

Dopo lunghe stagionature è possibile registrare un incremento di rigidità nei provini relativi ai mix 2 e 3. Successivamente, confrontando i moduli elastici dinamici misurati a 140 giorni

dal getto con quelli stagionati per 28 giorni, si riscontra che la presenza di nano-calce promuove aumenti dei moduli elastici dinamici.

Infine, è possibile affermare che le aggiunte, al volume d'impasto, di nano-calce durante il confezionamento, influenzano le proprietà delle miscele a base di calce idraulica naturale. Per valutare, in modo più approfondito, le compatibilità e le possibilità di impiego dei dosaggi di quest'innovativo nano-consolidante nel confezionamento di malte da restauro, sono necessarie ulteriori analisi al fine di indagare: i composti presenti, la microstruttura, la coesione superficiale, la durabilità, la porosità, la permeabilità al vapore e l'assorbimento di acqua capillare.

BIBLIOGRAFIA

U. Menicali, "I materiali nell'edilizia storica", NIS, Roma, 1992

L. Coppola, "Concretum", McGraw-Hill, Milano, 2007

M. Collepari, S. Collepari, R. Troli, "Il nuovo calcestruzzo", Tintoretto, Treviso, 2009.

Prof.ssa. F. Tittarelli, Università Politecnica delle Marche – Slide del corso di "Scienza e tecnologia dei materiali"

D.M. 17.01.2018, "Norme Tecniche per le Costruzioni".

Ente Nazionale Italiano di Unificazione, "EN 459-1 Calci da costruzione. Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità", 2010.

Ente Nazionale Italiano di Unificazione, "UNI EN 1015-3 Metodi di prova per malte per opere murarie. Parte 6: Determinazione della massa volumica apparente della malta fresca (mediante tavola a scosse)", 2007.

Ente Nazionale Italiano di Unificazione, "UNI EN 12504-4 Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici", 2005.

Ente Nazionale Italiano di Unificazione, "UNI EN 1015-6 Metodi di prova per malte per opere murarie. Parte 6: Determinazione della massa volumica apparente della malta fresca", 2007.

Ente Nazionale Italiano di Unificazione, "UNI EN 1015-11 Metodi di prova per malte per opere murarie. Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita", 2007.

Ente Nazionale Italiano di Unificazione, "UNI EN 12504-4 Metodi di prova sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici", 2005.

M. Mengucci, "Valorizzazione dei rifiuti RAEE in diverse catene di valore: effetto dell'impiego di frammenti di LCD in materiali da costruzione", Tesi di Laurea in Ingegneria Civile, 2019.

A. Bonazza, G. Vidoni, I. Natali, C. Ciantelli, C. Giosuè, F. Tittarelli, "Durability assessment to environmental impact of nano-structured consolidants on carrara marble by field exposure tests", Science of The Total Envir., vol. 757, pag. 23-32, 2017.

- C. Sabbioni, G. Zappia, G. Riontino, M. T. Blanco-Varela, J. Aguilera, F. Puertas, K. Van Balen, E. E. Toumbakari, "Atmospheric deterioration of ancient and modern hydraulic mortars", *Atmosph. Environ.*, vol. 35, no. 3, pag. 539- 548, 2001.
- C. Sabbioni, A. Bonazza, G. Zappia, "Damage on hydraulic mortars the Venice Arsenal", *Journal of Cultural Heritage*, vol. 3, no. 1, pag. 83-88, 2002.
- S. Fang, K. Zhang, H. Zhang, B. Zhang, "A study of traditional blood lime mortar for restoration of ancient buildings", *Cem. Conc. Res.*, vol. 76, pag. 232-241, 2015.
- T. Yang, X. Ma, B. Zhang, H. Zang, "Investigations into the function of sticky rice on the microstructures of hydrated lime putties", *Constr. and Build. Materials*, vol. 102, part. 1, pag. 105-112, 2016.
- L. Ventolà, M. Vendrell, P. Giraldez, L. Merino, "Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics", *Constr. and Build. Materials*, vol. 25, no. 8, pag. 3313-3318, 2011.
- V. Nežerka, Z. slížová, P. Tesárek, T. Plachý, D. Frankeová, "Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust", *Cem. Concr. Res.*, vol. 64, pag. 17-29, 2014.
- E. Ferraz, S. Andrejkovičová, A. L. Velosa, A. S. Silva, F. Rocha, "Synthetic zeolite pellets incorporated to air lime–metakaolin mortars: Mechanical properties", *Constr. and Build. Materials*, vol. 69, pag. 234-252, 2014.
- J. Otero, V. Starinieri, A. E. Charola, "Nanolime for the consolidation of lime mortars: A comparison of three available products", *Constr. and Build. Materials*, vol. 181, pag. 394-407, 2018.
- V. Daniele, G. Tagliere, L. Macera, G. Rosatelli, J. Otero, A. E. Charola, "Green approach for an eco-compatible consolidation of the Agrigento biocalcarenes surface", *Constr. and Build. Materials*, vol. 186, pag. 1188-1199, 2018.
- G. Taglieri, V. Daniele, L. Macera, A. Mignemi, "Innovative and green nanolime treatment tailored to consolidate the original mortar of the façade of a medieval building in L'Aquila (Italy)", *Constr. and Build. Materials*, vol. 221, pag. 643-650, 2019.
- J. Delgado Rodrigues, A. P. Ferreira Pinto, R. Nogueira, A. Gomes, "Consolidation of lime mortars with ethyl silicate, nanolime and barium hydroxide. Effectiveness assessment with microdrilling data", *Journal of Cultural Heritage*, vol. 29, pag. 43-53, 2018.

J. Otero, V. Starinieri, A. E. Charola, G. Taglieri, "Influence of different types of solvent on the effectiveness of nanolime treatments on highly porous mortar substrates", *Constr. and Build. Materials*, vol. 230, pag. 1171-1210, 2020.

G. Taglieri, V. Daniele, G. Rosatelli, S. Sfarra, M. C. Mascolo, C. Mondelli, "Eco-compatible protective treatments on an Italian historic mortar (XIV century)", *Journal of Cultural Heritage*, vol. 135, pag. 135-141, 2017.

RINGRAZIAMENTI

Giunto alla fine di questa tesi e della prima parte del mio percorso di studio e formazione, sento di dover ringraziare tutti quelli che mi hanno aiutato a raggiungere questo importante traguardo.

Un primo ringraziamento va alla Professoressa Tittarelli, che mi ha proposto questo interessante ed innovativo studio rendendosi sempre disponibile per ogni possibile chiarimento.

Ringrazio anche la Professoressa Giosuè per la sua pazienza e per l'aiuto in laboratorio.

Grazie alla mia famiglia: genitori, nonni, zii e cugine, per avermi supportato ed incoraggiato in questo lungo percorso, fatto di momenti lieti e duri.

Grazie a tutti i miei amici di Macerata: Alessandra, Alessandro, Caterina, Celio, Francesco, Giada, Matteo, Mattia, Picu e Veronica, per tutte le avventure trascorse insieme.

Grazie ai miei compagni dell'Università, nonché amici: Alessandro, Andrea, Daniele, Fabio, Francesco, Leonardo, Marco, Matteo, Poez, Raffaello, Riccardo e Simone per avermi aiutato in questo percorso, condividendone gioie e dolori.

Grazie ad Eleonora, compagna di tirocinio e Qaisar, dottorando, per avermi aiutato in laboratorio.

Grazie alla Brigliadori Fornace Calce s.r.l. per avermi fornito la “quasi introvabile” calce, indispensabile per questa ricerca.

APPENDICE

GRAFICI DELLE ROTTURE DEI PROVINI APPARTENENTI AL MIX 1 (0,0% NANO-CALCE)

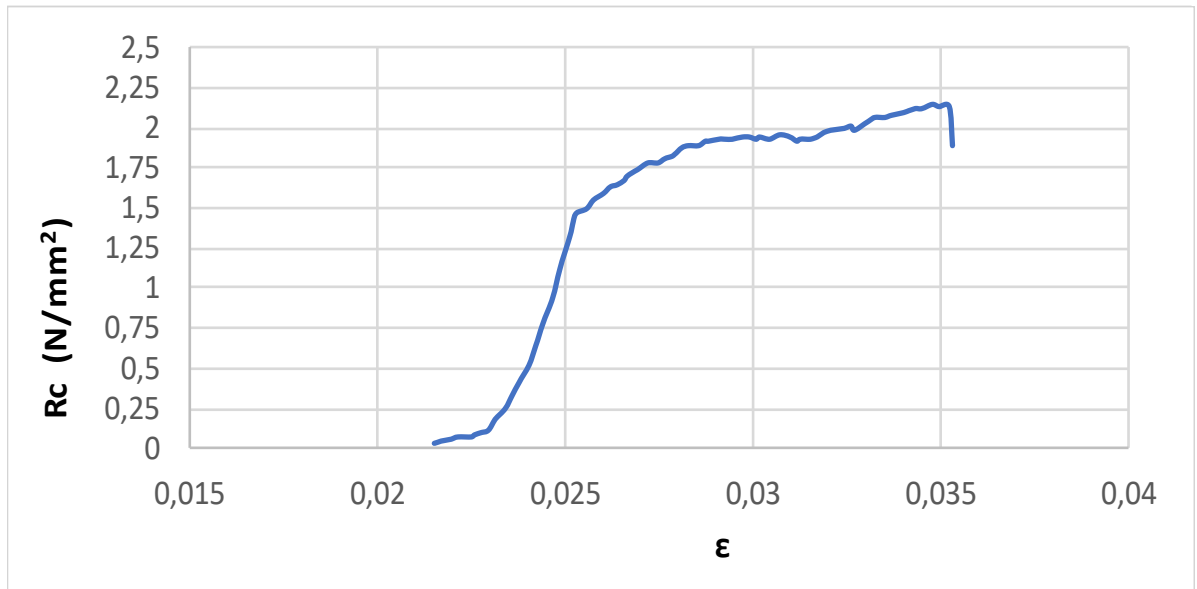


Fig. 30: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 7 giorni.

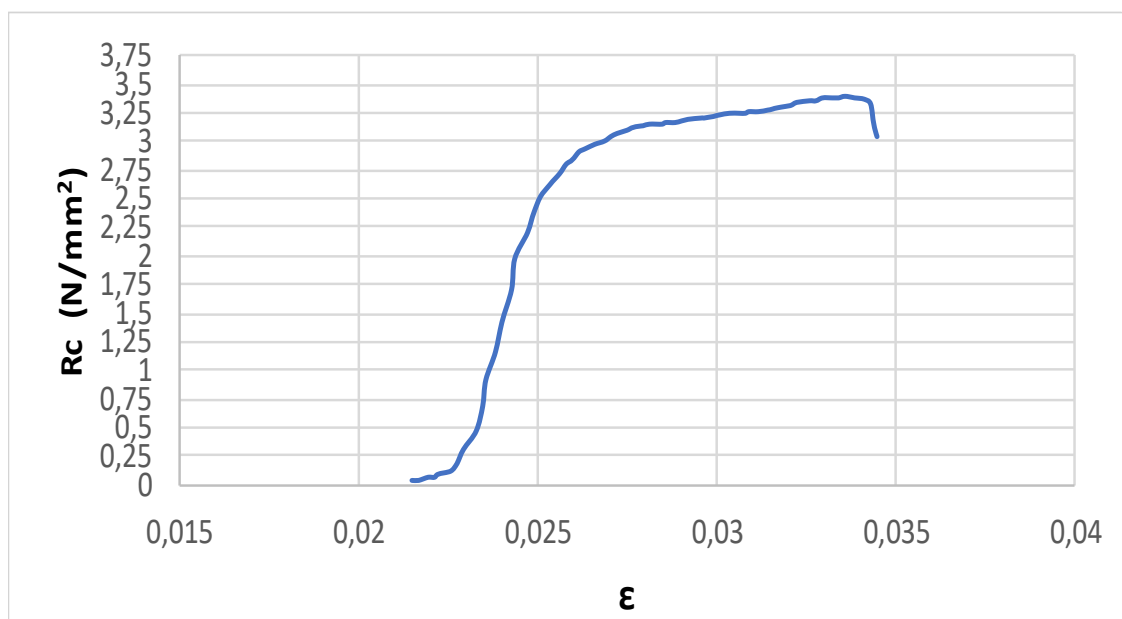


Fig. 31: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 14 giorni.

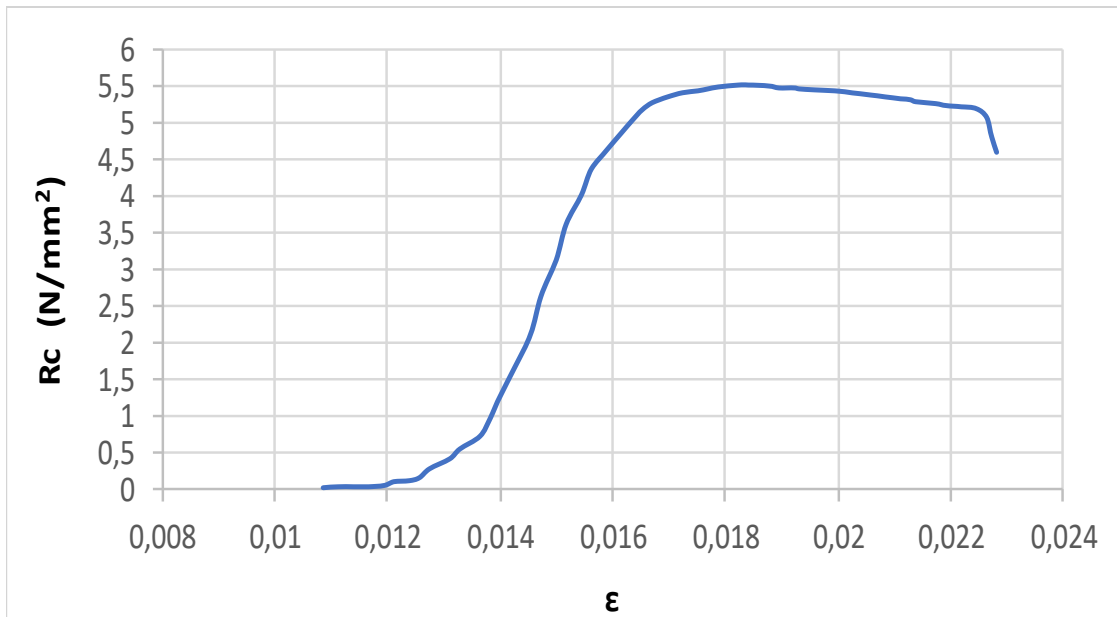


Fig. 32: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 28 giorni

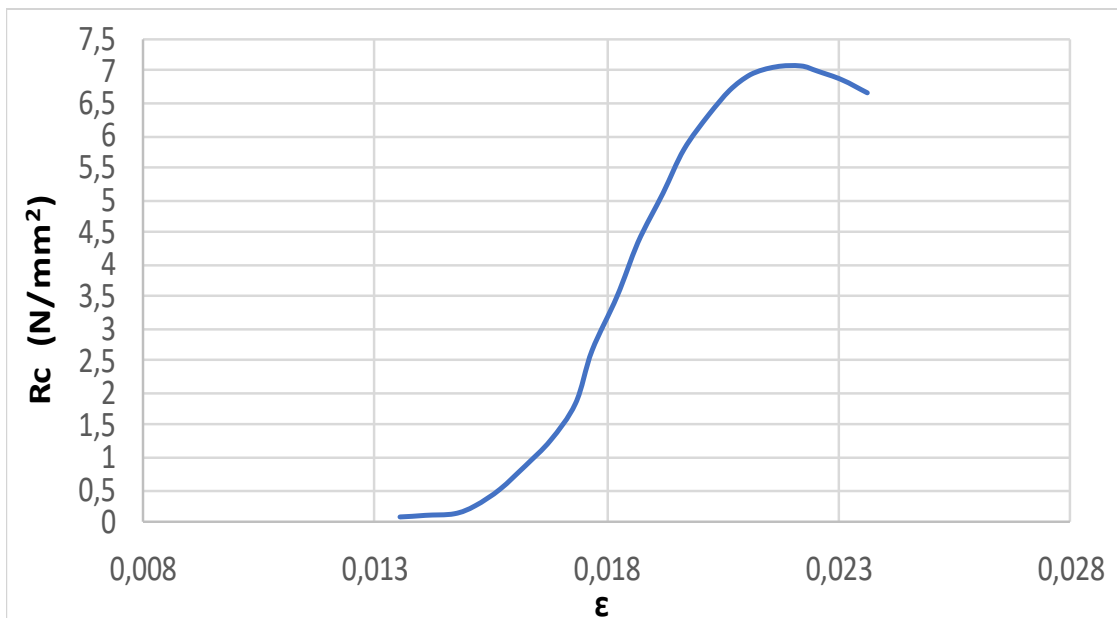


Fig. 33: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 140 giorni.

GRAFICI DELLE ROTTURE DEI PROVINI APPARTENENTI AL MIX 2 (2,5% NANO-CALCE)

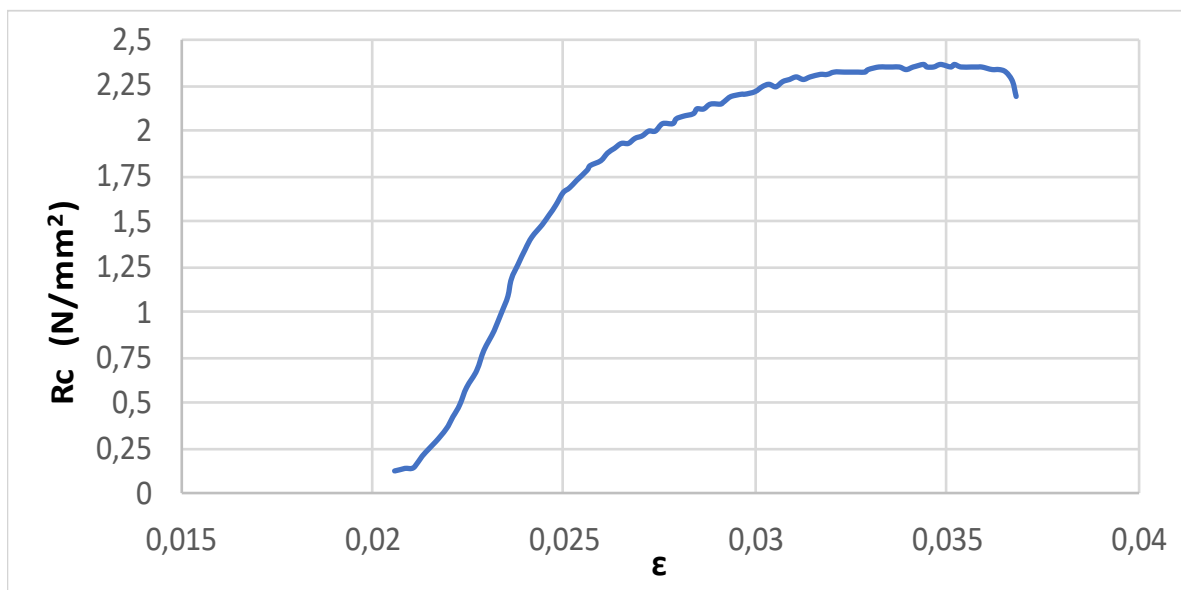


Fig. 34: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 7 giorni.

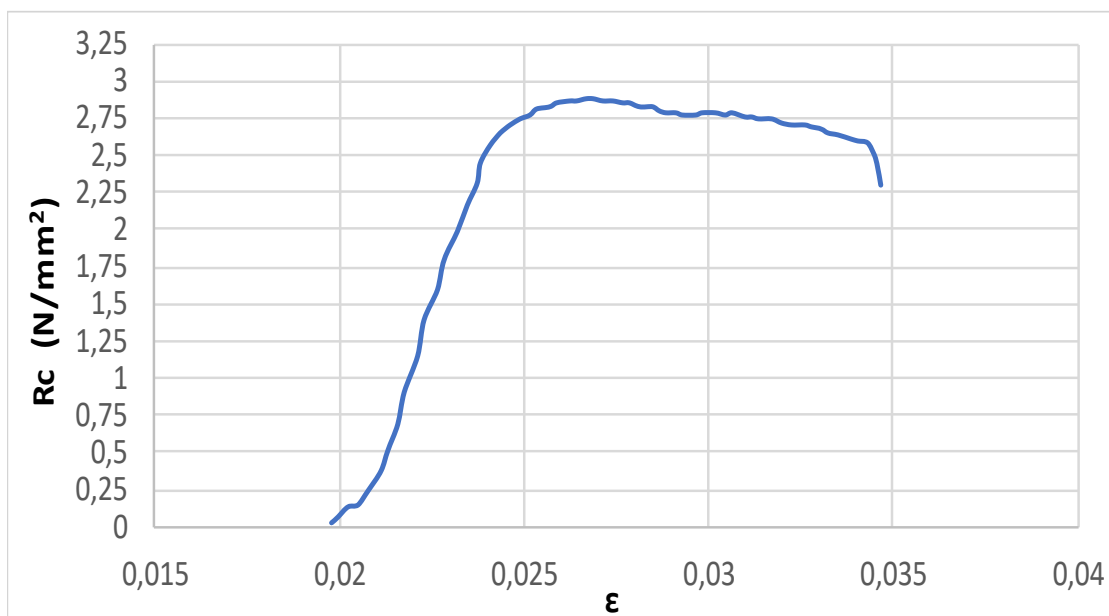


Fig. 35: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 14 giorni.

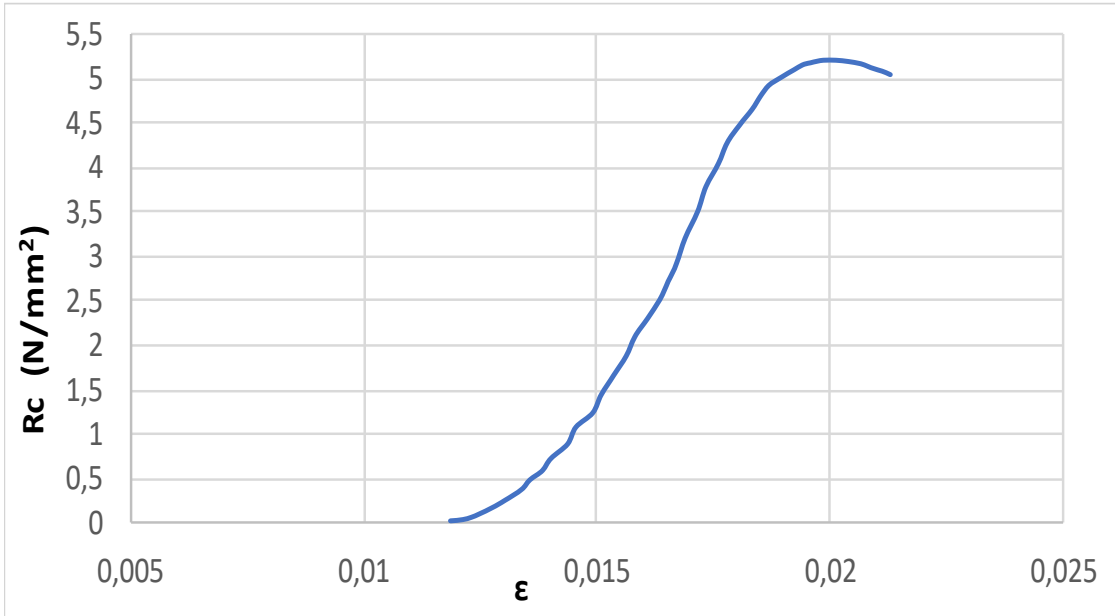


Fig. 36: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 28 giorni.

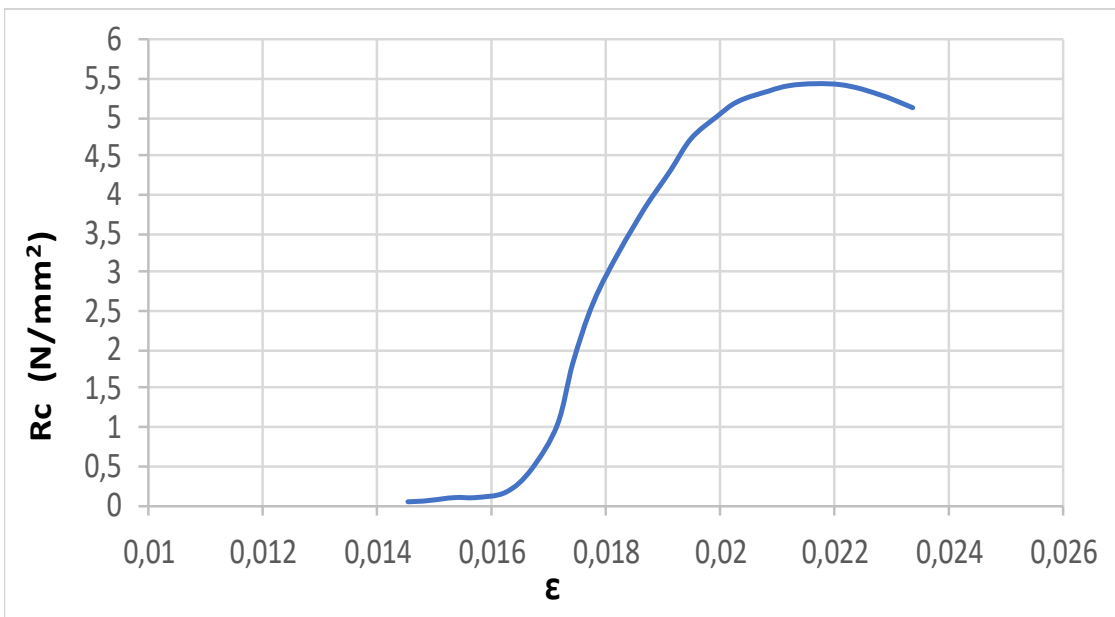


Fig. 37: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 140 giorni.

GRAFICI DELLE ROTTURE DEI PROVINI APPARTENENTI AL MIX 3 (5,0% NANO-CALCE)

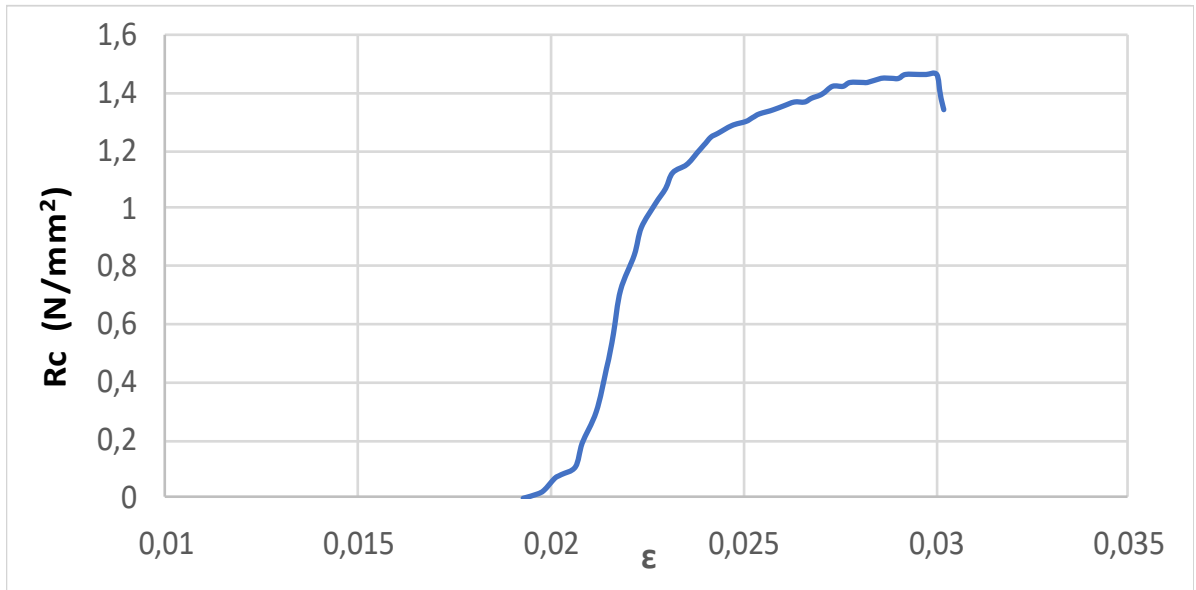


Fig. 38: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 7 giorni.

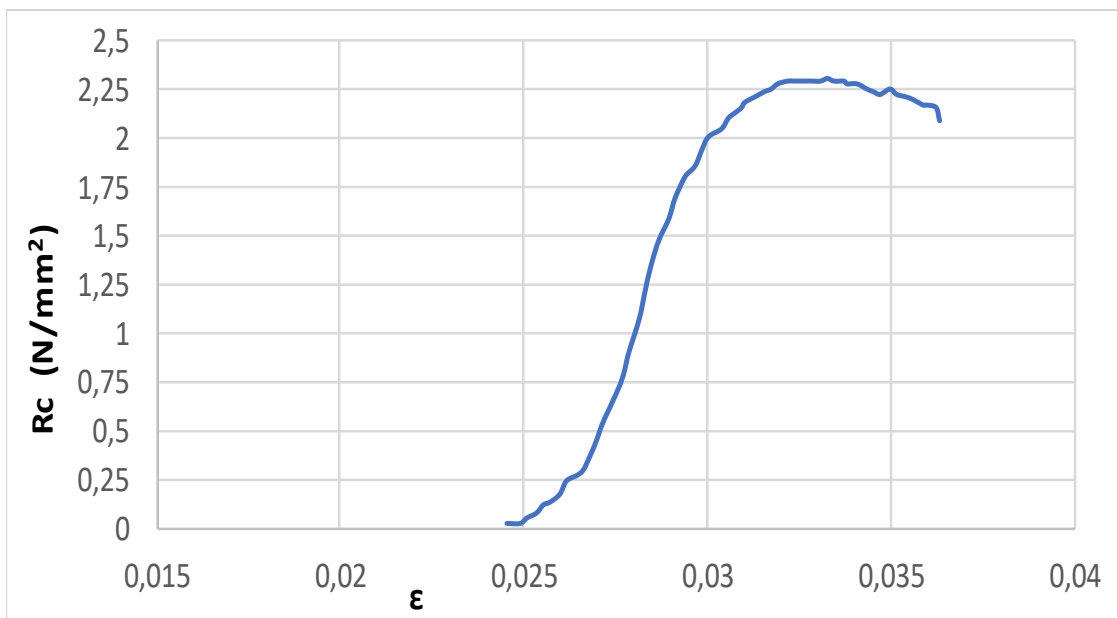


Fig. 39: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 14 giorni.

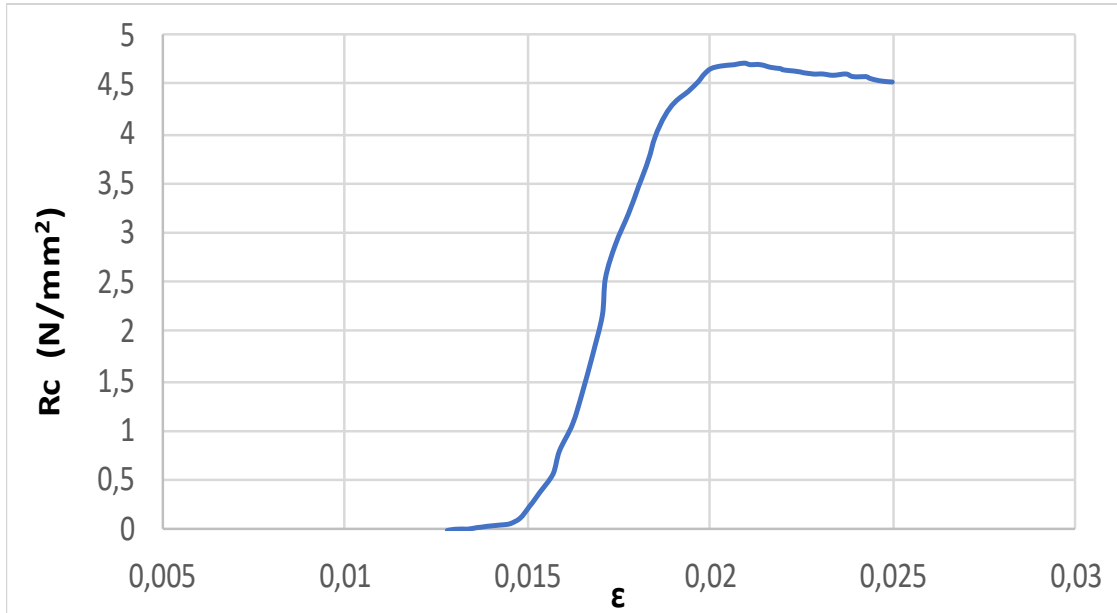


Fig. 40: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 28 giorni.

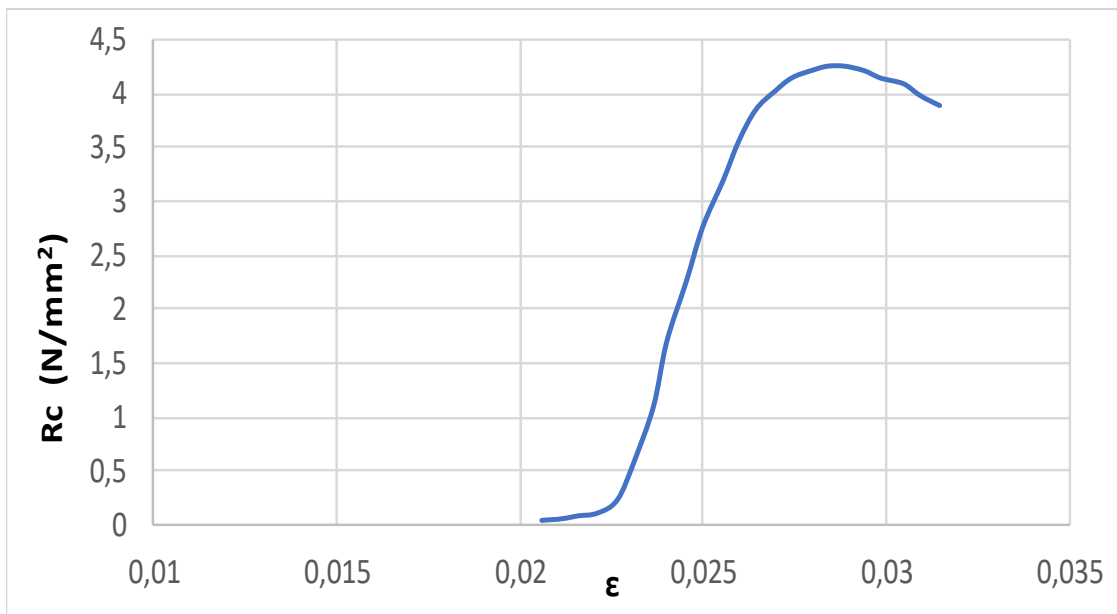


Fig. 41: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 140 giorni.

GRAFICI DELLE ROTTURE DEI PROVINI APPARTENENTI AL MIX 4 (10,0% NANO-CALCE)

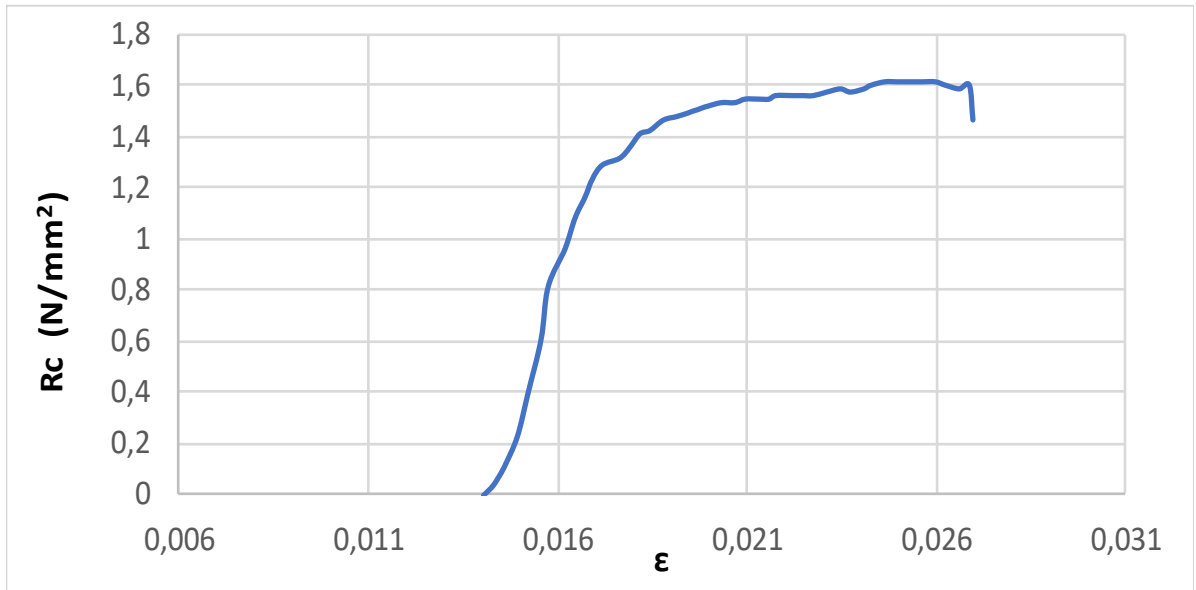


Fig. 42: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 7 giorni.

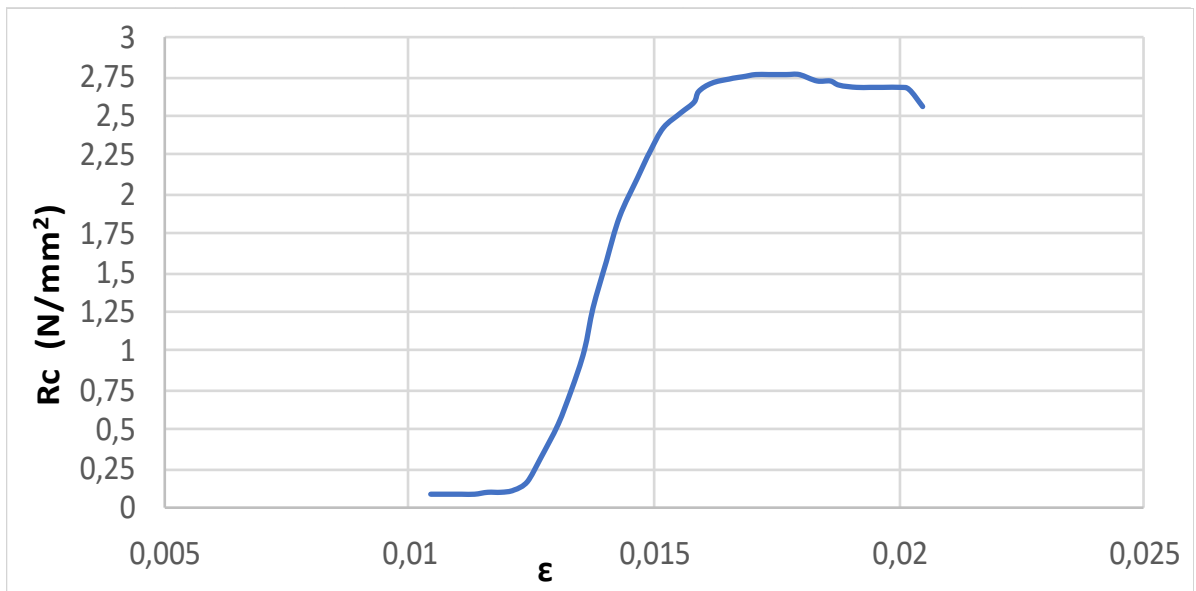


Fig. 43: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 14 giorni.

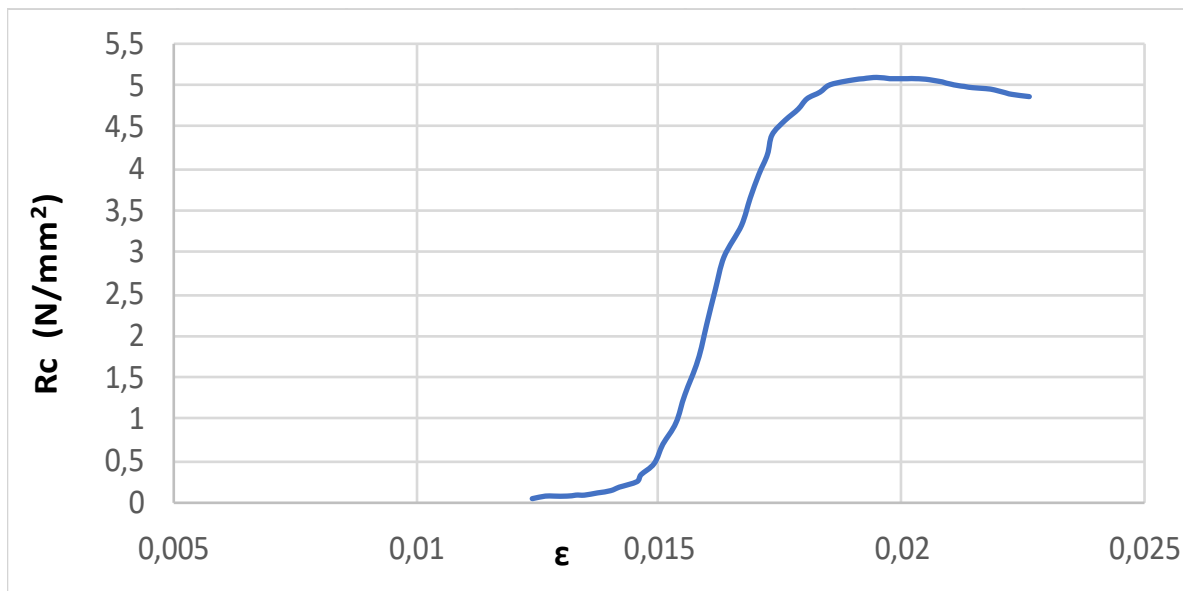


Fig. 44: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 28 giorni.

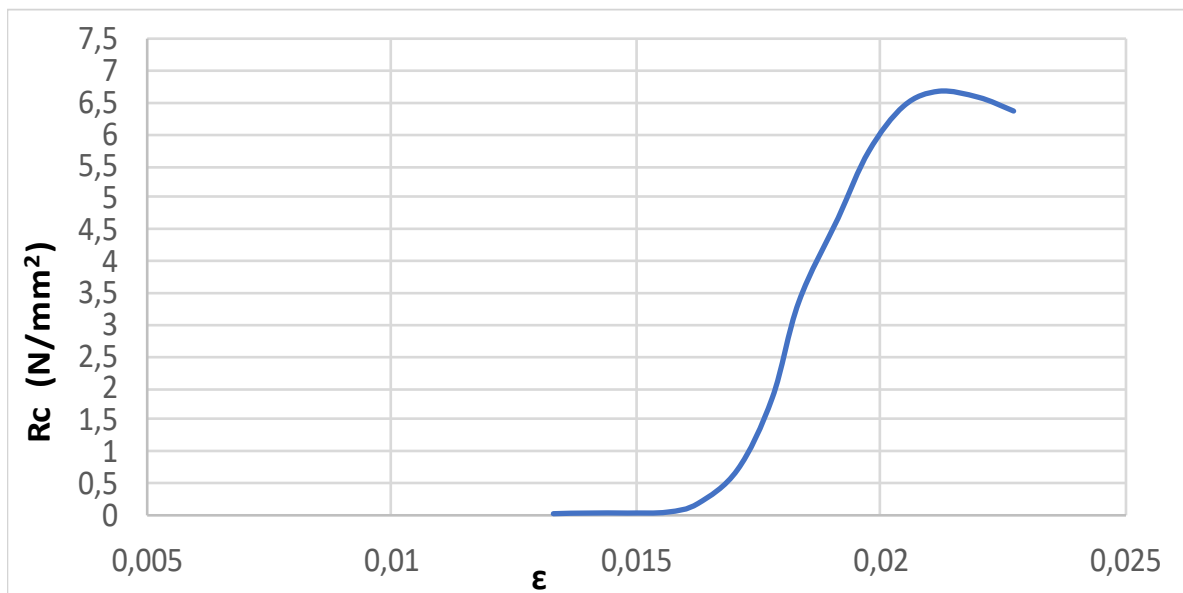


Fig. 45: andamento sforzo-deformazione dei provini stagionati per 140 giorni.

SCHEDA TECNICA CALCE IDRAULICA NATURALE NHL 5



BRIGLIADORI
FORNACE CALCE



EDILIZIA, RESTAURO & COSTRUZIONI

CALCE IDRAULICA NATURALE NHL 5

CE¹⁶

EN 459-1

Cod. prodotto 7

DESCRIZIONE E CAMPI DI IMPIEGO

La Calce Idraulica Naturale NHL 5 classificata secondo la norma EN 459-1:2010 è ottenuta dalla calcinazione di calcari marnosi molto ricchi di silice e allumina in forni verticali a strati con un processo lento e a temperature intorno ai 1000°C.

Il calcare cotto viene in parte idratato e successivamente macinato senza aggiunta di alcun materiale che modifichi la composizione naturale della marna. È una calce ideale nelle malte di allettamento e intonaci, nell'edilizia per il restauro storico e monumentale, nella bioedilizia e nelle costruzioni in genere.

Prodotto marcato CE con certificazione n. 0925 CPR Ce b n. 22/2016.

CARATTERISTICHE TECNICHE

Caratteristiche	Calce Idraulica Naturale NHL 5	Requisiti UNI EN 459-1:2010
Colore	nocciola-rosato	
Resistenza a compressione	a 7 gg > 2 MPa	a 7 gg > 2 MPa
Resistenza a compressione	a 28 gg > 5 MPa	a 28 gg ≥ 5 e ≤ 15 MPa
Tempo inizio presa	> 1 h	> 1 h
Tempo fine presa	≤ 11 h	≤ 15 h
Finezza residuo a 0,09 mm	< 10%	≤ 15%
Finezza residuo a 0,2 mm	< 0,5%	≤ 2%
Stabilità volume	≤ 0,5 mm	≤ 2 mm
Contenuto di solfato SO ₃	< 1%	≤ 2%
Contenuto di calce libera	> 15%	≥ 15
Massa volumica apparente	0,7 g/cm ³	
Contenuto di aria	≤ 5%	≤ 5%
Confezione	sacco 25 kg	

MESSA IN OPERA

Per interventi su vecchie strutture pulire e bagnare accuratamente i supporti, così pure se si riutilizzano vecchi mattoni o pietre.

Preparare il supporto asportando polvere, efflorescenze, parti inconsistenti, disarmani, ecc... Nel caso si debbano eseguire intonaci su muri fortemente ammalorati con forti presenze di sali è sempre bene consultarci.

Nei periodi freddi con temperature al di sotto dei +6°C o in caso di gelate notturne prendere i dovuti accorgimenti o evitare i lavori, così pure nei periodi troppo caldi e ventosi per evitare essiccazioni troppo rapide.

Non applicare la malta su pareti imbevute di acqua o dove ci sia la possibilità che l'intonaco entri in contatto, in particolare entro i primi giorni dall'applicazione, con acqua corrente o stagnante.

Non applicare su supporti in gesso o verniciati. Non applicare su calcestruzzo senza opportuna preparazione.

I supporti misti di tufo pietra mattoni devono avere un'adeguata preparazione preventiva (rinzafo, rete, ecc)

È sempre buona norma nelle costruzioni di intonaci applicare un primo rinzafo e lasciare asciugare.

Procedere poi per spessori di 1,5 cm per mano.

Impastare la Calce Idraulica Naturale NHL 5 in betoniera con sabbie del luogo prive di limo a granulometria ben distribuita nel rapporto 1:3 e aggiungere l'acqua necessaria per ottenere un impasto di giusta fluidità privo grumi (in funzione del tipo di sabbia effettuare prove preventive).

Lasciare riposare l'impasto per qualche minuto, aggiungere un poco di acqua e impastare nuovamente per un paio di minuti.

La Calce Idraulica Naturale NHL 5 avendo una presa abbastanza veloce va applicata possibilmente nell'arco di 45 minuti.

Negli interventi dove viene impiegata come legante per malte o finiture lasciate a vista si consiglia di utilizzare la Calce Idraulica Naturale NHL 5 di un unico lotto di produzione al fine di evitare differenze cromatiche. Essendo un prodotto naturale la Calce Idraulica Naturale NHL 5 può subire variazioni di colore.

Gli intonaci realizzati con la Calce Idraulica Naturale NHL 5 sono estremamente porosi e vanno rifiniti con finiture e pitture fortemente traspiranti.

AVVERTENZE

Mantenere in luogo coperto ed asciutto. Teme l'umidità.

I dati forniti sono ricavati da prove di laboratorio effettuate durante le normali procedure di controllo della produzione in condizioni standard; potranno quindi variare in funzione delle condizioni di messa in opera e sono da considerarsi indicativi.

La fase applicativa avviene in cantiere al di fuori del nostro controllo e la ditta Briigliadori Fornace Calce SRL non si assume nessuna responsabilità sull'esito dell'applicazione. L'azienda si assume unicamente la responsabilità del prodotto, mentre l'applicazione, l'impiego e la lavorazione sono di esclusiva responsabilità della clientela. L'azienda si riserva la possibilità di modificare nel tempo la composizione mantenendo naturalmente inalterate le caratteristiche. La presente scheda tecnica annulla e sostituisce le precedenti.

Prodotto a uso professionale.

Scheda aggiornata Maggio 2016

BRIGLIADORI FORNACE CALCE s.r.l.

Via Celleita dell'Olio 1731 - 47822 Santarcangelo di Romagna (RN) telefono +39 0541 626144 - fax +39 0541 626708 - C.F. e P.IVA 04241400409

www.fornacebrigliadori.it

Fig. 46: scheda tecnica calce idraulica naturale NHL 5 prodotta dalla fornace Briigliadori