



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea a ciclo unico in
INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

**MATRICI CEMENTIZIE E GEOPOLIMERICHE A PARI
RESISTENZA MECCANICA: CONFRONTO DEL
COMPORTAMENTO A CORROSIONE PER CARBONATAZIONE
DI ARMATURE IN ACCIAIO NERO E ACCIAIO ZINCATO**

**CEMENTITIOUS AND GEOPOLYMERIC MATRICES WITH THE
SAME MECHANICAL STRENGTH: COMPARISON OF THE
CORROSION BEHAVIOUR DUE TO CARBONATION OF BARE
AND GALVANIZED STEEL REINFORCEMENTS**

Relatore:

Prof.ssa Francesca Tittarelli

Tesi di Laurea di:

Andrea Torriero Pompa

Correlatore:

Prof. Tiziano Bellezze

A.A. 2020 / 2021

INDICE

PARTE PRIMA.....	5
I geopolimeri	5
Capitolo 1	5
Presentazione e caratteristiche dei geopolimeri.....	5
1.1 Introduzione	5
1.2 Terminologia e storia.....	6
1.3 Composizione chimica e proprietà	8
1.4 Classificazione dei geopolimeri.....	16
Capitolo 2	18
Presentazione delle malte	18
2.1 Introduzione	18
2.2 Terminologia e storia.....	18
2.3 Composizione e caratteristiche	19
2.4 Classificazione delle malte.....	22
2.5 Le malte geopolimeriche	24
Capitolo 3	25
I materiali utilizzati nella sperimentazione	25
3.1 Introduzione	25
3.2 Classificazione dei materiali	25
3.3 Acqua	29
3.4 Inerte	30
3.5 Leganti idraulici	35
3.5.1 La calce idraulica.....	36

3.5.2 Il cemento Portland	39
3.6 Leganti geopolimerici	47
3.7 Soluzione alcalina.....	48
PARTE SECONDA.....	51
Preparazione e caratterizzazione dei campioni in malta cementizia e geopolimerica.....	51
Capitolo 4	51
Impasti e campionatura.....	51
4.1 Introduzione	51
4.2 Classificazione	52
4.2.1 Le malte geopolimeriche	53
4.2.2 Le malte cementizie	68
4.3 Fasi di preparazione impasti.....	71
4.4 Campionatura e stagionatura	76
Capitolo 5	81
Stato fresco dei materiali trattati.....	81
5.1 Introduzione	81
5.2 Lavorabilità	82
5.3 Confronto e considerazioni finali	89
Capitolo 6	92
Prove meccaniche.....	92
6.1 Introduzione	92
6.2 Resistenza meccanica a flessione e a compressione	93
6.3 Modulo di elasticità dinamico.....	108

6.4 Prove di aderenza.....	120
6.5 Considerazioni finali.....	134
Capitolo 7	141
Porosimetria: analisi e confronti	141
7.1 Introduzione	141
7.2 Porosità: definizione ed esecuzione delle prove	142
7.2.1 Porosità nelle malte cementizie	144
7.2.2 Porosità nelle malte geopolimeriche	147
7.3 Considerazioni finali.....	155
Capitolo 8	160
Conducibilità termica	160
8.1 Introduzione	160
8.2 Campionatura e stagionatura	161
8.3 Conducibilità termica rilevata.....	161
8.3.1 Conducibilità termica nelle malte cementizie	163
8.3.2 Conducibilità termica nelle malte geopolimeriche	163
8.4 Confronto e conclusioni.....	164
PARTE TERZA	168
La durabilità delle armature e lo studio dei provini sulla carbonatazione.....	168
Capitolo 9	168
La durabilità delle armature.....	168
9.1 Introduzione	168
9.2 La corrosione: definizione e tipologia	168

9.3 Processo elettrochimico	170
9.4 La velocità di corrosione	171
9.5 Tecniche di campionamento	172
9.6 Corrosione per carbonatazione	175
9.7 Studio e analisi del processo di carbonatazione nelle malte ...	181
9.8 Misurazione del potenziale di corrosione	196
9.9 Misurazione della velocità di corrosione	206
9.10 Considerazioni finali.....	217
Conclusioni.....	219
Bibliografia	221
Norme di riferimento	227

PARTE PRIMA

I geopolimeri

Capitolo 1

Presentazione e caratteristiche dei geopolimeri

1.1 Introduzione

I geopolimeri sono materiali polimerici inorganici che mimano le rocce naturali e sono il prodotto di una geosintesi, ossia una reazione che ricostituisce dal punto di vista chimico le rocce. Essi sono dei materiali sintetici a base di alluminosilicati utilizzabili in svariati settori e che possono sostituire il cemento Portland.

Questi materiali sono stati introdotti alla fine degli anni '70 e appartengono alla classe dei materiali ceramici consolidati chimicamente. La tecnologia dei geopolimeri trova spazio in diversi settori industriali, quali ingegneria civile, industria automobilistica, trattamento dei rifiuti industriali, restauro, arte e decorazione, ecc., e permette la produzione di un'ampia gamma di materiali versatili.

Lo scopo principale delle ricerche attuali è di studiare ed esplorare la possibilità di produrre i geopolimeri in sostituzione del calcestruzzo prodotto con il cemento Portland, come accennato poc'anzi. I vantaggi di questa evoluzione sono la riduzione nell'emissione dell'anidride carbonica e la maggiore resistenza agli agenti chimici e alle temperature elevate.

1.2 Terminologia e storia

Negli anni '50, uno scienziato ucraino, Victor Glukhovsky, del KICE (Kiev Institute of Civil Engineering, dell'ex URSS), ha ricercato le differenze tra i cementi antichi e i calcestruzzi moderni¹. Il suo studio ha portato alla sintesi di vari leganti alluminosilicatici da ceneri vulcaniche, argille, scorie di vario genere e feldspati. Questi leganti mostrarono proprietà superiori a quelle dei materiali cementizi fino ad allora utilizzati.

Negli anni '70, il ricercatore francese, Joseph Davidovits (Figura 1), del Geopolymer Institute di Saint-Quentin di Francia, partendo dagli studi effettuati da Glukhovsky, ha sviluppato una nuova classe di materiali polimerici inorganici, ed ha introdotto per identificarli, il termine geopolimeri. Il prefisso *geo* indica che si tratta di un prodotto che imita materiali già presenti in natura, mentre con il suffisso *polimero* si intende il processo di produzione, cioè una polimerizzazione per policondensazione. Questo processo viene definito *geopolimerizzazione*, con cui si indica la reazione che si sviluppa tra una polvere di natura allumino silicatica e una soluzione acquosa di solito composta da idrossidi o silicati alcalini.

Davidovits aveva un grande interesse per l'archeologia dell'antico Egitto che unì alla sua esperienza nella chimica degli alluminosilicati e si convinse, attraverso i suoi studi e le sue osservazioni, che con il legante geopolimerico furono costruite alcune delle più belle piramidi egizie nell'epoca a.C.

¹ Glukhovsky V., Rostovskaja G. S., Rumyna G.V, 1980, Communications of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement.



Figura 1 Il Prof. Joseph Davidovits

Sulla base delle sue convinzioni e grazie alla disponibilità di alcune materie prime vicino alle piramidi, ha formulato un'ipotesi alternativa per spiegare la loro costruzione. Secondo lui i blocchi furono realizzati miscelando un calcare marnoso², contenente carbonato di calcio (CaCO_3) e argilla ($\text{H}_2\text{O-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$), mescolati con miscele di natron³, acqua e calce (CaO).

Davidovits ha studiato i geopolimeri come alternativa per i materiali compositi, infatti essi hanno molti vantaggi rispetto agli altri materiali organici, come la tolleranza al calore. Inoltre i compositi geopolimerici rinforzati con fibre di carbonio non bruciano quando sono sottoposti a fiamma diretta.

² La marna è una roccia sedimentaria, di tipo terrigeno composta da una frazione argillosa e una carbonatica data generalmente dal carbonato di calcio (CaCO_3), oppure da carbonato doppio di magnesio e calcio [$\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$].

³ Il natron è il carbonato decaidrato di sodio che si forma per evaporazione di acque ricche di sodio, la sostanza ha dato il nome all'antico luogo estrattivo Wadi el-Natrun, un lago quasi asciutto in Egitto che conteneva elevate quantità di carbonato di sodio (Na_2CO_3).

Successivamente, negli anni '90, J. Wastiels, ricercatore del Belgio, ha scoperto la possibilità di ottenere i geopolimeri ad alte prestazioni attivando chimicamente ceneri di centrali a carbone.

Negli anni tra 1998 e il 2002, ad opera di Davidovits, iniziarono una serie di conferenze internazionali dedicate al tema dei geopolimeri e nel 2005 per festeggiare i 26 anni del Geopolymer Institute, venne organizzato il congresso mondiale dei geopolimeri.

Da allora sono stati fatti diversi studi molto interessanti sui geopolimeri, che sono stati raccolti in diversi scritti, inoltre il numero dei paesi coinvolti nelle ricerche su questo tema è in crescita per via dell'interesse che il mondo accademico sta mostrando verso questa tipologia di materiali.

1.3 Composizione chimica e proprietà

La geopolimerizzazione è un processo che nasce quando si trovano a contatto materiali silicoalluminati con una soluzione attivatrice alcalina; la reazione dà luogo a catene polimeriche attraverso l'orientazione degli ioni nella soluzione. Le tipologie essenziali delle materie prime necessarie per la produzione dei geopolimeri sono più precisamente le seguenti (Figura 2):

- Polveri reattive alluminio silicatiche;
- Soluzione attivante alcalina;
- Eventuali additivi e/o cariche.



Figura 2 Materie prime necessarie per la produzione dei geopolimeri e la loro funzione.

La scelta delle polveri di partenza è molto importante, perché riveste un ruolo importante nel processo di formazione del geopolimero e dipende molto dall'applicazione di destinazione del materiale. La selezione viene fatta tenendo in considerazione numerosi parametri come la morfologia, caratteristiche chimico-composizionali, tenore di silicio e reattività. Per raggiungere lo scopo della geopolimerizzazione è necessario usare materie prime reattive ricche di silicio (come ad esempio ceneri volanti e scorie d'altoforno) e in alluminio.

Un altro parametro che può variare è la quantità di acqua al fine di avere una lavorabilità accettabile che influenza soprattutto le condizioni di stagionatura.

La caratteristica delle polveri è il rapporto tra silicio e alluminio: parametro fondamentale del mix-design di un geopolimero. Le polveri finora utilizzate sono:

- il caolino calcinato (metacaolino);
- le ceneri volanti;
- la loppa d'altoforno;
- le polveri minerali derivanti da scarti di lavorazione delle pietre;
- le pozzolane.

Di seguito sono spiegate nel dettaglio.

Il *metacaolino* è la materia prima per eccellenza nella produzione del geopolimero; la sua peculiare coordinazione cationica lo rende facilmente aggredibile dalle soluzioni alcaline e quindi reattivo. La reattività di queste polveri dipende soprattutto dalle caratteristiche morfologiche, di composizione e mineralogiche del materiale usato e dal suo grado di deidrossilazione⁴, agglomerazione e superficie specifica.

Il processo di deidrossilazione può essere di due tipi (Figura 3):

- intra-deidrossilazione che porta alla formazione di metacaolino con alluminio in pentacoordinazione;
- inter-deidrossilazione che porta alla formazione di metacaolino in coordinazione tetraivalente.

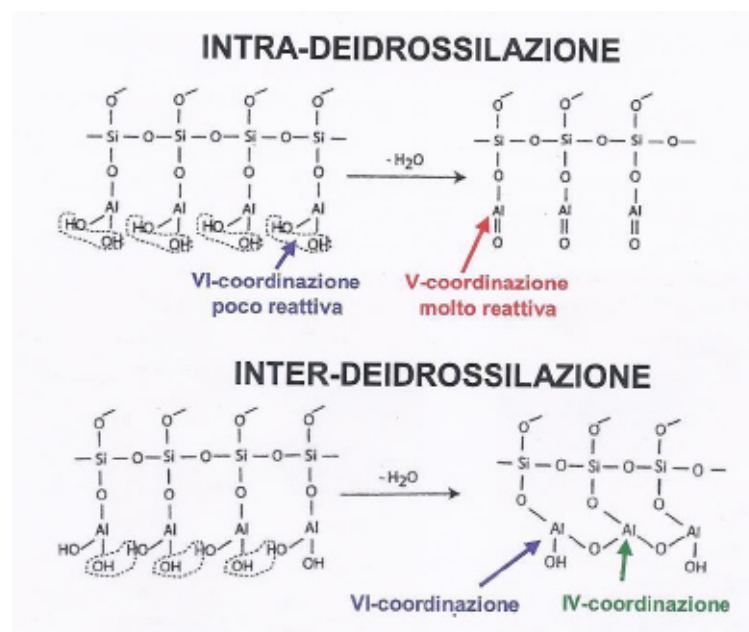


Figura 3 Possibili meccanismi di deidrossilazione durante il processo di calcinazione del caolino.

⁴ La deidrossilazione del caolino ha inizio ad una temperatura appena superiore ai 500°C dando origine al metacaolino, che è stabile tra i 600°C e i 900°C.

Questo tipo di polveri minerali viene generalmente utilizzato per applicazioni high-tech o per lavori e materiali ad alte temperature, come adesivi, rivestimenti, stampi, isolanti, ecc.

Le *ceneri volanti* risultano essere molto ricche in alluminio e silicio, sono il residuo solido della combustione del carbone in centrali termoelettriche⁵ e vengono impiegate come additivo nei cementi Portland. Il carbone, andando in combustione ad una temperatura di 1400 °C, fonde le sue impurità naturali presenti (quarzo, argilla, ecc.), creando delle goccioline di dimensioni molto ridotte, che attraverso i fumi fuoriescono dalla caldaia e subiscono un forte sbalzo di temperatura, raffreddandosi e solidificandosi sotto forma di celle simili a sfere chiamate *cenosfere*.

La struttura risulta principalmente amorfa per via del brusco raffreddamento e può presentare piccole percentuali di fasi cristalline⁶ (Figura 4).

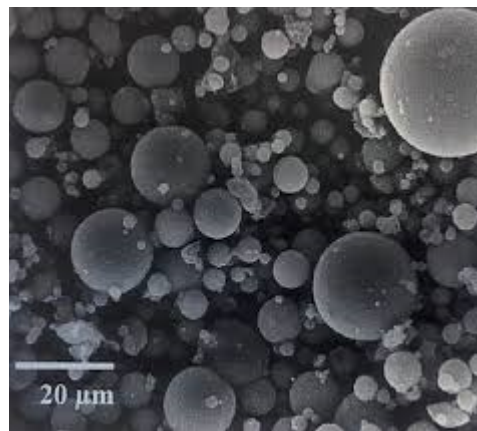


Figura 4 Micrografia SEM di una cenere volante.

La *loppa d'altoforno*, invece, è un sottoprodotto del processo di produzione della ghisa, composta per la maggior parte da calcio-alluminosilicatico.

⁵ Separate dai fumi attraverso appositi filtri elettrostatici o meccanici.

⁶ Tipo magnetite, ematite, quarzo o residui carboniosi.

Se si raffredda bruscamente all'uscita dall'altoforno, acquisisce delle caratteristiche idrauliche e si presenta granulata sotto forma di particelle irregolari e porose a struttura amorfa⁷. Nella fase successiva il materiale viene finemente macinato per massimizzare l'area superficiale e di conseguenza la sua reattività. Il processo sopradescritto si rende necessario, in quanto la loppa non macinata è inerte, tant'è vero che la reattività della loppa dipende molto dalla quantità di fase vetrosa, dalla finezza del macinato e dalla distribuzione granulometrica.

Le *polveri minerali derivanti da scarti di lavorazione delle pietre*, si ricavano con gli scarti della lavorazione da taglio e levigatura delle pietre ornamentali e risultano essere adatte nella creazione di impasti geopolimerici. Vengono chiamati *fanghi di segagione* e sono molto ricchi in silice estremamente dipendente dalla composizione del tipo di pietra lavorata.

Le *pozzolane* sono polveri naturali⁸ che provengono da eruzioni vulcaniche di tipo esplosivo e possiedono una struttura amorfa silicea e la loro composizione dipende dalla zona di provenienza.

Esse possiedono un certo grado di reattività in soluzione alcalina, che ben si adatta alla produzione dei geopolimeri e la loro reattività può essere aumentata con un trattamento termico di consolidamento; che avviene a 400 °C. L'utilizzo di questo materiale è destinato alla produzione dei geopolimeri impiegati in campo edile.

Il secondo componente del geopolimero è la *soluzione alcalina*.

Le soluzioni acquose di silicati alcalini sono prodotte dissolvendo in acqua ad elevata temperatura i silicati oppure mediante dissoluzione idrotermale⁹

⁷ Sostanza o corpo che allo stato solido è privo di struttura e/o aspetto cristallino.

⁸ Piroclastite sciolta: frammentazione di lava non consolidata durante l'attività esplosiva di un vulcano.

⁹ Azione chimica esercitata sulle rocce dalle acque calde circolanti nel sottosuolo.

di materiali ricchi in silice reattiva, generalmente sabbia, nell'idonea soluzione di idrossido-alcalina. Gli attivatori di solito impiegati sono idrossidi, solfati, carbonati e silicati alcalini, ad esempio NaOH (idrossido di sodio) e KOH (idrossido di potassio), questi ultimi sono maggiormente usati con il metacaolino (Figura 5).

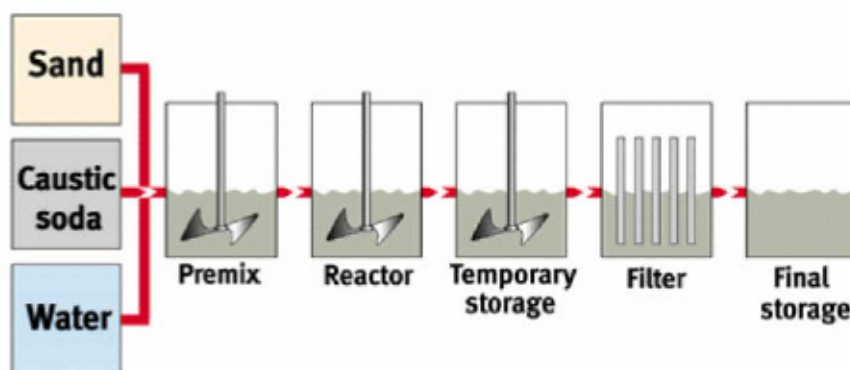


Figura 5 Schema del processo di produzione di soluzioni di silicati alcalini.

Le soluzioni ottenute, vengono poi filtrate e corrette in composizioni per arrivare al risultato specifico desiderato. I silicati alcalini in soluzione acquosa in genere non hanno una composizione chimica ben definita, ma derivano dalla combinazione di metalli alcalini e silicio e sono di solito indicabili con la formula $M_2O \cdot n SiO_2$, dove $M=Na, K, Li, Cs$ e n = rapporto molare (numero di moli di silice per mole di ossido di metallo alcalino).

Il ruolo di questa componente è quello di attivare il silicio e l'alluminio presenti nelle polveri di partenza, risulta fondamentale nei processi di geopolimerizzazione e innesca la trasformazione della struttura vetrosa in un composto solido e compatto.

La caratteristica alcalina della soluzione è importante perché influenza il grado di polimerizzazione ottenibile nel manufatto, per cui risulta essenziale concentrarsi, in fase progettuale, sulla corretta formulazione della soluzione

attivante. Il pH della soluzione viene regolato perché influenza la resistenza meccanica dei manufatti geopolimerici e il tempo richiesto per il loro indurimento (che diminuisce all'aumentare del pH).

Le *cariche e/o additivi* sono una classe di componenti (la cui natura può essere metallica, organica o inorganica) che possono avere molteplici effetti, tra cui:

- mantenimento della stabilità dimensionale durante la presa;
- variazione controllata della velocità di presa;
- ottimizzazione della reologia¹⁰;
- miglioramento delle proprietà meccaniche o termiche;
- funzionalizzazione del materiale.

La forma delle cariche influisce sulle proprietà meccaniche del manufatto, mentre la loro natura chimica ha effetti sulle proprietà termiche o chimico-fisiche.

La principale applicazione dei geopolimeri è l'utilizzo come materiale da costruzione in sostituzione al cemento e più in generale ai calcestruzzi, poiché le loro caratteristiche chimico-fisiche li rendono molto competitivi con questi materiali. Ad esempio, la diminuzione di emissioni di CO₂ in atmosfera e le possibilità di produrre geopolimeri partendo da residui di ceneri volanti di inceneritore o di combustione del carbone, hanno portato ad uno sviluppo in più della tecnica geopolimerica.

I vantaggi che ne derivano, diventano le proprietà dei geopolimeri e sono:

- elevata integrità strutturale e resistenza a compressione;
- buona resistenza all'abrasione;

¹⁰ Ramo della fisica che studia l'origine, la natura e le caratteristiche di deformazione dei corpi sotto l'azione di forze esterne.

- tempo di indurimento molto breve¹¹;
- bassa permeabilità ed alta resistenza all'attacco acido;
- resistenza al fuoco (superiore a 1000 °C) e alta resistenza ai cicli di gelo e disgelo;
- bassa conducibilità termica;
- basso consumo di energia per la loro fabbricazione e basse emissioni di CO₂ in atmosfera.

Tutte queste proprietà sono ottenute grazie all'utilizzo di specifiche materie prime e grazie alle particolari condizioni di reazione in cui avviene il processo di geopolimerizzazione. Queste proprietà permettono ai geopolimeri di essere utilizzati in diversi settori, dall'industria delle costruzioni a quella aerospaziale.

C'è da sottolineare che queste caratteristiche, che diventano proprietà dei geopolimeri, non sono presenti insieme in tutti i prodotti geopolimerici, ma possono manifestarsi da sole o in gruppo, previo adeguato design della miscela.

Alcuni dei parametri che, invece, possono influenzare sensibilmente tutte queste proprietà sono (Figura 6):

- microstruttura;
- porosità;
- composizione chimica, cristallinità, reattività e granulometria delle polveri minerali di partenza;
- rapporto molare Si/Al;
- scelta del processo produttivo;
- grado di polimerizzazione;

¹¹ A seconda delle condizioni di reazione, la resistenza e l'integrità strutturale sono ottenute in poco tempo, circa 60 minuti. Nella maggior parte dei casi il 70% della resistenza a compressione è ottenuta nelle prime quattro ore di stagionatura.

- distribuzione e durezza della fase non disciolta;
- tipologia, formulazione e pH della soluzione alcalina attivante;
- adesione interfaccia tra gel e fase non disciolta.

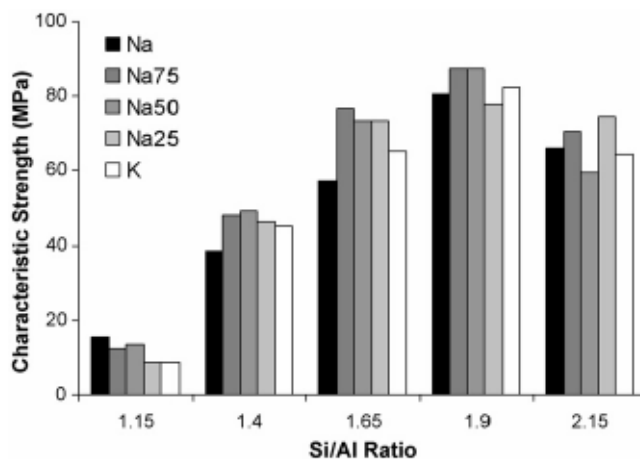


Figura 6 Dipendenza della resistenza a compressione a 7 giorni dal rapporto Si/Al.

1.4 Classificazione dei geopolimeri

Nella ricerca, i geopolimeri si classificano in dieci principali categorie di materiali a base geopolimerica¹², che a loro volta vengono differenziate in base ai materiali che contengono e dalle unità molecolari di cui sono composti:

- geopolimeri a base di metacaolino, poli (sialate-siloxo), Si/Al =2;
- geopolimeri a base di cenere volante;
- geopolimeri a base di potassio, poli (siloxonate), silicato solubile, Si/Al=1;
- geopolimeri a base di idrosodalite/caolinite, poli (Si/Al=1)
- geopolimeri a base di calcica (Ca, K, Na)-sialate (Si/Al=1,2,3)
- geopolimeri a base rocciosa, poli (sialate-multisiloxo) $1 < \text{Si/Al} < 5$;

¹² Geopolymer institute, "What is a geopolymer" (2012)

- geopolimeri a base di silice-legame sialate e legame siloxo in poli (siloxo), $\text{Si}/\text{Al} > 5$;
- geopolimeri a base di ferro-sialate
- geopolimeri a base di fosfato
- geopolimeri a base organico minerale¹³.

¹³ www.geopolymer.org/science/introduction/

Capitolo 2

Presentazione delle malte

2.1 Introduzione

Nell'architettura moderna, la malta, insieme al calcestruzzo è uno dei materiali da costruzione più utilizzati. La malta è un collante costituito da una miscela fatta di legante, acqua, inerti fini ed eventuali additivi. Tale miscela viene costituita in proporzioni tali da assicurare lavorabilità all'impasto fresco e resistenza meccanica allo stato indurito, dopo la fase di presa e di indurimento.

2.2 Terminologia e storia

Nonostante le malte siano alla base delle tecniche di costruzione nell'architettura moderna, le malte idrauliche possono ritenersi uno dei materiali da costruzione più antichi usati oggi, senza particolari differenze rispetto alla forma classica.

Alcuni tipi di malte erano già in uso presso antiche popolazioni.

Le malte idrauliche come le malte pozzolaniche o malte a base di *cocciopesto*¹⁴ erano perfettamente conosciute già dai Fenici e subirono una grande diffusione e un perfezionamento con la civiltà romana, che le utilizzò per costruire alcune delle più grandi opere dell'epoca antica. Gli antichi romani con esse costruirono e resero impermeabili i sistemi di adduzione dell'acqua come gli acquedotti e le cisterne.

¹⁴ www.wikipedia.com

Questa tecnica è alla base anche delle famose mura a sacco dei romani e con le malte è stato possibile realizzare la volta del Pantheon di Roma, pur se a livello tecnico è costituita da calcestruzzo, dato che oltre all'aggregato fine comprende anche un aggregato grossolano.

2.3 Composizione e caratteristiche

Le malte sono realizzate con della calce o del cemento, usati come leganti per gli aggregati inerti. La calce si ottiene dalla calcinazione delle pietre calcaree, il carbonato di calcio CaCO_3 si decompone in calce CaO e in diossido di carbonio CO_2 . Questo tipo di calce viene definita *calce aerea*, poiché l'indurimento (fase di presa), non si può ottenere che con il diossido di carbonio contenuto nell'aria. Una malta che viene realizzata con questo tipo di calce presenta proprietà meccaniche mediocri, che non le permettono di resistere al tempo. D'altro canto, quando oltre al calcare le pietre contengono anche alluminosilicati, o per meglio spiegare se viene aggiunta una certa quantità di argilla, dopo la calcinazione, il prodotto che si ottiene si presenta migliore e indurirà senza la presenza di aria (ad esempio sott'acqua). In questo caso, la calce viene detta *idraulica* e le sue proprietà meccaniche sono più elevate. Inoltre, si può ottenere un cemento, se la proporzione di alluminosilicati diventa notevole unita alla presenza di altri elementi tipo il ferro, gli ossidi di alluminio, la manganese, ecc.

Le pozzolane, sono prodotti naturali di origine vulcanica, composti per la maggior parte da ossidi di alluminio, da ferro e silicio e presentano, per loro natura delle proprietà idrauliche; il che spiega la durabilità dei monumenti dei romani costruiti con della malta contenente della pozzolana del Vesuvio.

Oggigiorno queste qualità si riottengono calcinando dell'argilla o delle ceneri volatili raccolte nelle centrali termiche funzionanti a carbone¹⁵.

A seconda delle caratteristiche che si vogliono ottenere dal composto indurito, l'impasto viene fatto da distinti elementi.

Le caratteristiche delle malte fanno capo a due processi fondamentali che ne regolano l'utilizzo e sono; la *presa* e l'*indurimento*. Questi processi dipendono esclusivamente dalla natura del legante utilizzato.

Una prima classificazione deriva perciò da presa e indurimento e si distinguono in:

- malte aeree: malte formate da un legante aereo, gesso o calce aerea, che induriscono soltanto al contatto con l'aria. In questa categoria non ci sono distinzioni tra i processi di presa e indurimento.
- malte idrauliche: malte composte da leganti idraulici, come il cemento e la calce idraulica, che induriscono anche in assenza di aria. In questo caso il processo di indurimento è successivo al processo di presa, ed è influenzato dal tipo di legante utilizzato. L'indurimento di questo tipo di malte è regolato dal principio per cui la presenza di ossidi acidi di alluminio e di silicio sono capaci di reagire in presenza di acqua con l'idrossido basico di calcio.

Questa reazione diminuisce la porosità della malta e garantisce un'eccezionale aderenza tra sabbia e legante. La combinazione di questi due fattori contribuisce alla drastica riduzione della permeabilità dell'impasto.

Alle due categorie appena descritte, si aggiunge una terza categoria, quella delle malte cosiddette *parzialmente idrauliche* o *malte bastarde*, ottenute da

¹⁵ www.geopolymer.org, geopolymers institute, 1995, adattamento alla rivista Arts et Métiers Magazine, n. 180, Settembre 1993, pagg.8-16

un legante misto tra calce aerea e cemento e caratterizzata dal dosaggio dei leganti. Via via, si è iniziato ad utilizzare il termine “malte bastarde” anche per individuare gli impasti di malta prodotti dalla mescolanza di diversi tipi di leganti idraulici (come le malte composte da cemento Portland e calce idraulica).

Infine, vi è da specificare, che ad ognuna delle malte sopradescritte possono essere aggiunti degli additivi per migliorare e regolare la presa, la lavorabilità ed altre caratteristiche.

I leganti generalmente impiegati per confezionare le malte sono:

- il cemento;
- la calce idraulica naturale in polvere ottenuta dalla cottura di marne naturali e successivo spegnimento e macinazione;
- calce idraulica artificiale in polvere, ottenuta dalla cottura di mescolanze omogenee di calcare e materie argillose e successivo spegnimento e macinazione;
- calce eminentemente idraulica naturale o artificiale in polvere, ottenuta come la calce idraulica naturale e artificiale;
- calce idraulica artificiale pozzolanica in polvere, miscela omogenea ottenuta dalla macinazione di pozzolane e calce aerea idratata;
- calce idraulica artificiale siderurgica in polvere, miscela omogenea ottenuta dalla macinazione di loppa basica granulare d’altoforno e calce aerea idratata;
- calce pozzolanica, ottenuta da miscelazione di calce aerea pura e pozzolane naturali;
- calce idrata, impiegata anche come additivo fluidificante nelle malte cementizie.

2.4 Classificazione delle malte

Una classificazione delle malte può essere fatta in base alle caratteristiche che le compongono; malte aeree, malte idrauliche, malte idrauliche plastiche, malte cementizie, malte composte o bastarde e malte additive.

- Malte aeree: composte da gesso o calci aeree (calce viva in zolle o idrata più sabbia e acqua), hanno avuto per anni molto successo soprattutto grazie al rendimento volumetrico della calce viva (le malte che ne risultano sono grasse e facilmente lavorabili, ma presentano dei difetti, come la resistenza molto limitata, indurimento molto lento e grande sensibilità agli attacchi del gelo).
- Malte idrauliche: composte da calci eminentemente idrauliche o agglomeranti cementizie, più sabbia e acqua, o anche calce aerea più pozzolane e acqua (malte pozzolaniche). Queste malte si impiegano con la stessa facilità delle malte aeree e servono sia per intonaci esterni che per murature moderatamente sollecitate, in ambienti umidi e freddi.
- Malte idrauliche plastiche: composte da calci eminentemente idrauliche o agglomeranti cementizi plastici, più sabbia e acqua. Questo tipo di malta è caratterizzata da una perfetta plasticità, da ottima capacità di ritenuta di acqua e grande lavorabilità, per questo ha tutte le qualità per essere una malta ottima da muratura e per intonaci.
- Malte cementizie: composte da cementi più sabbia e acqua. Sono malte caratterizzate da uno sviluppo rapido delle resistenze, i cui valori finali sono maggiori che nelle malte precedenti.
- Malte composte o bastarde: contenenti due o più leganti insieme, più sabbia e acqua. I più comuni sono quelli che si ottengono aggiungendo alla calce idraulica una percentuale variabile di cemento; questo serve

a conferire alle malte una resistenza meccanica progressivamente maggiore. Un'altra malta composta è quella che si ottiene aggiungendo ad una malta cementizia una piccola percentuale di calce idrata, che la rende di maggiore lavorabilità e meno soggetta a ritiro e alle fessurazioni (ad esempio si può aggiungere gesso al cemento per ottenere un rallentamento della presa).

Un'altra combinazione può essere la calce idrata, più la calce idraulica, più il cemento per ottenere una malta per gli intonaci esterni.

- Malte additivate: le malte precedenti più un additivo, che può essere un plastificante (quando nella miscela è presente parzialmente o totalmente la calce), un impermeabilizzante (sono sostanze idrofobe che servono ad ovviare alla scarsa compattezza delle malte ai fini di una maggiore impermeabilità delle stesse), un antigelo (sono prodotti che accelerano il processo di idratazione del cemento e abbassano il punto di congelamento dell'acqua), un ritardatore o acceleratore di presa (si possono ottenere accelerazioni modeste o molto rapide della presa della pasta pura o della malta, ma esistono anche dei prodotti che ritardano i tempi di presa del legante), ecc.

Le malte sopra elencate, si possono distinguere in base al tipo di fabbricazione secondo il seguente elenco:

- malte confezionate in cantiere;
- malte confezionate in cantiere con prodotti premiscelati secchi;
- malte preconfezionate pronte per l'impiego.

2.5 Le malte geopolimeriche

I processi di geopolimerizzazione accennati in precedenza, sono un'ottima e nuova alternativa all'uso del cemento Portland. In seguito, nella presente tesi, si parlerà di malte geopolimeriche, che sono malte ottenute tramite leganti alluminosilicati di varia derivazione e sono usate in sostituzione del cemento e della calce idraulica che tramite soluzione alcalina possono essere di composizione variabile in base alle proprietà di cui ha bisogno la malta.

Lo studio è stato proiettato portando particolare attenzione al confronto del comportamento a corrosione per carbonatazione di armature in acciaio nero ed acciaio zincato.

L'obiettivo prefissato è stato quello di sperimentare delle malte alternative a quelle usate comunemente nell'edilizia. Per meglio dire, lo scopo è stato quello di trovare malte eco-compatibili realizzate con l'uso di materiali di scarto o di materiali che non richiedono particolari quantità di inquinanti per la loro lavorazione.

Capitolo 3

I materiali utilizzati nella sperimentazione

3.1 Introduzione

In questo capitolo si elencano e si descrivono i vari materiali utilizzati per produrre gli impasti di malte cementizie e geopolimeriche, che vengono classificati nel dettaglio e vengono dedicati ad alcune sostanze di rilevante importanza dei paragrafi specifici.

3.2 Classificazione dei materiali

I materiali usati per realizzare le malte geopolimeriche per la sperimentazione sono i seguenti:

- *il metacaolino*: la polvere a base allumino-silicatica più reattiva nel processo di geopolimerizzazione.

Infatti, il metacaolino, a causa della sua particolare coordinazione cationica, è più facilmente aggredito da soluzioni alcaline. La sua reattività dipende sia dalle caratteristiche intrinseche del caolino di partenza (morfologia, composizione chimica e mineralogica), sia dal grado di deidrossilazione, agglomerazione e superficie specifica, che sono funzione della tecnologia di produzione, cioè del tipo di forno e della temperatura di calcinazione. Non tutti i metacaolini, pertanto, reagiscono allo stesso modo o portano a prodotti analoghi durante il processo di geopolimerizzazione.

- *Le ceneri volanti*: si ottengono come sottoprodotto della combustione di carbone polverizzato nelle centrali termoelettriche. Le ceneri volanti chimicamente sono costituite in prevalenza da silice, allumina,

ossido di ferro (Fe_2O_3). Esse sono costituite da un solido particellare che viene separato dai fumi di combustione attraverso filtri elettrostatici o meccanici.

Le ceneri volanti si presentano come una polvere di colore grigio, costituita da particelle sferiche vetrose il cui diametro è compreso tra 1 e 100 μm (quindi di dimensioni molto più piccole a quelle costituenti il cemento). Le particelle possono presentarsi piene e più spesso porose, e la loro forma sferica favorisce la lavorabilità dell'impasto.

Le ceneri volanti, nei calcestruzzi, agiscono come filler (contributo fisico) grazie alla finezza dei componenti e danno soprattutto un contributo chimico grazie al loro comportamento pozzolanico poiché prendono parte alla reazione di idratazione del cemento. Esse garantiscono calcestruzzi più impermeabili, duraturi e compatti.

La cenere volante può avere natura silico-alluminosa e silico-calcareo. Secondo la norma UNI EN 197/1, in base alla loro natura, si dividono in due tipologie, di seguito elencate:

- La cenere volante silicea (o di classe F secondo la ASTM C618): residuo della combustione di carboni bituminosi o dell'antracite ed è la cenere volante disponibile in Italia. È costituita da silice (SiO_2) e allumina reattiva (Al_2O_3). Si presenta come una polvere finissima di natura pozzolanica; la proporzione dell'ossido di calcio reattivo (CaO) deve essere $\leq 5\%$ in massa mentre il tenore di silice reattiva dev'essere $\geq 25\%$ in massa. La cenere volante di classe F è quella più usata nel calcestruzzo.
- Le cenere volante calcica (o di classe C secondo la ASTM C618): residuo della combustione della lignite e dei carboni sub-bituminosi. Non è disponibile in Italia e contiene essenzialmente alluminio, silicio e ossido di calcio reattivo. La

sua forma è di polvere finissima con proprietà idrauliche, dovute alla presenza di calcio, e pozzolaniche, dovuta alla presenza di allumina e silice reattiva. L'ossido di calcio reattivo deve essere $\geq 5\%$ in massa. Se i valori di ossido di calcio sono compresi tra il 5 e il 15%, la cenere volante deve avere un tenore di silicio $\geq 25\%$ in massa. Questa cenere volante viene anche chiamata cenere volante idraulica.

- *La sabbia:* La sabbia calcarea viene distinta in base allo spessore dei granelli e alla loro funzione. Può essere sabbia a 0/3, sabbia a 0/8, graniglia e misto tondo. I numeri 0/3 e 0/8 identificano l'intervallo dei millimetri dello spessore dei granelli. La sabbia 0/3 viene generalmente usata per intonaci e muratura, mentre la sabbia 0/8 viene utilizzata per la formazione di massetti. Invece la graniglia come inerte per malte tecniche, per depolverizzazione strade combinata con emulsione bituminosa e per giardinaggio. Il misto tondo, infine si usa per la produzione di betoncini, per protezione guaine bituminose su solai di copertura. La sabbia utilizzata, per realizzare le malte trattate in questa tesi, è la sabbia Esincalce a 0/8.

Per gli inerti, nello specifico si rimanda al paragrafo successivo 3.4¹⁶.

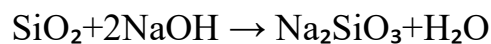
- *Il silicato di sodio:* è un composto chimico con la formula Na_2SiO_3 . Può presentarsi sia allo stato solido che allo stato liquido a seconda del processo di produzione; a temperatura ambiente è allo stato solido. Per via della sua elevata solubilità, se unita all'acqua viene utilizzato per la produzione di soluzioni alcaline. Infatti, si presenta stabile in soluzioni neutre o basiche, mentre nelle soluzioni acide reagisce fino a formare acido siliceo. La parte basica del composto è formato dall'ossido di sodio (Na_2O), la parte acida dall'anidride silicica

¹⁶ www.esincalce.com/prodotti

(SiO₂). Il silicato di sodio viene usato in diversi settori dall'industria edile, a quelle tessile e nell'arte. Lo si trova in uso come:

- Insetticida, acaricida e fungicida;
- Insieme ad altri materiali nella composizione del vetro solubile (in inglese waterglass);
- In edilizia, come ignifugo e come accelerante del calcestruzzo proiettato (ad esempio nella costruzione di gallerie);
- Nell'industria tessile per il candeggio o la tintura dei tessuti del cotone;
- Mescolato ad altre sostanze, come adesivo;
- Nell'arte viene utilizzato dal 1825 come agente protettivo per le pitture murali.

Per la sua produzione in fase liquida (lo stato di maggior utilizzo nelle industrie) vengono versate soda caustica, sabbia di quarzo e acqua in un serbatoio di miscelazione e grazie ad un reattore e all'introduzione del vapore nella miscela, si ottiene la reazione in formula seguente:



e quindi il prodotto ricercato.

- *Il cemento Portland e il cemento alluminoso*: tra i molteplici tipi di cemento in uso, i più utilizzati in questo lavoro sono il cemento Portland e il cemento alluminoso.

Il cemento Portland è il cemento più utilizzato ed è usato come legante per il calcestruzzo. Il cemento Portland si ottiene miscelando il clinker con l'aggiunta di gesso nella quantità necessaria per regolare il processo di idratazione; più precisamente è costituito per il 95% da clinker in misura variabile da 0 a 5% da costituenti minori e utilizzato nella fabbricazione di calcestruzzi armati semplici e precompressi.

Il cemento alluminoso è un legante idraulico ottenuto con la macinazione di clinker costituito essenzialmente da alluminati idraulici di calcio. In questo caso le materie prime per ottenere il clinker sono calcare e bauxite. Le principali caratteristiche di questo cemento sono il rapidissimo indurimento anche a bassa temperatura e l'elevata resistenza ai solfati¹⁷. La bauxite, costituita per lo più da ossidi idrati di alluminio, contiene talvolta anche in quantità rilevanti ossidi anidri e idrati di ferro, silice, silicati idrati di alluminio e piccole percentuali di biossido di titanio.

3.3 Acqua

L'acqua ha un ruolo importante nella composizione degli impasti, che caratterizza e valorizza il conglomerato finale.

La scelta del tipo di acqua da utilizzare e le sue caratteristiche è fondamentale affinché si abbia un risultato più o meno perfetto. Una scelta sbagliata del tipo di acqua potrebbe determinare fenomeni di ritardo dei tempi di presa e di indurimento, oppure problemi di natura estetica sulla superficie dei manufatti. Nei casi più gravi si potrebbe verificare la generazione di forme di degrado precoce delle strutture. I requisiti di accettazione delle acque, tra cui le acque potabili, le acque di riciclo dell'industria del calcestruzzo, le acque dei pozzi artesiani ecc., vengono regolati e fissati dalla Norma UNI EN 1008.

L'esame dell'acqua, solitamente, si basa su una valutazione finalizzata ad escludere che inquinanti di natura organica possano rallentare la cinetica di idratazione, che eventuali tensioattivi possano promuovere indesiderati inglobamenti di aria nell'impasto con conseguente abbattimento delle prestazioni meccaniche, che tracce di olio di grasso possano determinare sia

¹⁷ www.aitecweb.com

un rallentamento dello sviluppo delle resistenze che una diminuzione dell'adesione dell'interfaccia pasta aggregato con irrimediabili riduzioni delle prestazioni meccaniche, che la presenza di sostanze acide produce forti ritardi dell'idratazione del cemento con conseguenze molto più dannose dall'eccesso di sostanze di natura organica.

Di seguito è riportata una tabella che descrive i valori massimi consentiti da alcune sostanze delle acque destinate al confezionamento del conglomerato cementizio (Tabella 1).

Tabella 1. Valori massimi consentiti di alcune sostanze nelle acque destinate al confezionamento del conglomerato cementizio.

SOSTANZE	CONTENUTO MASSIMO AMMISSIBILE (mg/l)
Cloruri	1000
Solfati	2000
Alcali	1500
Zuccheri	100
Fosfati	100
Nitrati	500
Piombo	100
Zinco	100

3.4 Inerte

Il termine “inerte”, viene definito dai dizionari di lingua italiana come qualcosa di estraneo, per necessità, a qualsiasi partecipazione attiva.

In chimica è una sostanza che non presenta reattività nei confronti di altre sostanze.

In questo lavoro, il termine inerte è inteso nel suo significato di materiale usato nell'edilizia e più precisamente, nella tecnologia dei cementi, per cui si definisce inerte, il materiale (ghiaia, sabbia, pietrisco, ecc.) che non subisce trasformazione durante la presa.

Gli inerti, propriamente detti aggregati, sono una vasta categoria di materiali minerali granulari particellari grezzi usati nelle costruzioni e possono essere naturali, artificiali o riciclati da materiali usati per precedenti costruzioni.

Gli inerti naturali devono essere costituiti da elementi non gelivi, privi di parti friabili, terrose, polverulente e di sostanze comunque nocive all'indurimento del conglomerato ed alla conservazione dell'armatura. Il fatto di non essere gelivi, comporta che non devono sfaldarsi quando saturati di acqua e portati a temperature tali da provocare la formazione di ghiaccio. La gelività degli inerti è legata alla loro porosità, in questo caso è importante la dimensione dei pori: i più pericolosi sembrano essere quelli pari a 3-5 μm perché consentirebbero all'acqua di penetrare al loro interno e di gelare senza consentirne una rapida fuoriuscita.

Gli inerti sono utilizzati in edilizia come componenti di materiali compositi, come i conglomerati cementizi, i conglomerati bituminosi e gli intonaci. Essi costituiscono l'ossatura del conglomerato; nel caso dei conglomerati cementizi non partecipano all'indurimento del cemento, ma svolgono un ruolo molto importante sulle caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi, in funzione della loro qualità. Per ottenere un buon conglomerato, è importante oltre alla qualità degli inerti (è data dalla loro durezza e dalla loro purezza), anche la composizione granulometrica.

Infatti, la caratteristica più evidente dell'inerte è la sua granularità, cioè il fatto che si presenta in forma di granuli sciolti. La dimensione dei singoli granuli caratterizza il tipo di inerte; se è minore di 0,063 mm vengono detti finissimi, se vanno da 0,063 a 4 mm, sono fini come la sabbia e la graniglia. Mentre vengono definiti inerti grossi quelli i cui granuli superano i 4 mm, detto ghiaietto/pietrischetto da 4-15 mm e ghiaia/pietrisco da 15-40 mm. La ghiaia è di origine alluvionale o di forma tondeggianti, mentre il pietrisco, di solito proviene dalla frantumazione della roccia ed è di forma irregolare.

L'inerte utilizzato in questo lavoro è sabbia di tipo calcareo, con diametro dei grani ≤ 8 mm utilizzata in condizioni di sabbia umida, o in condizioni di sabbia satura a superficie asciutta (SSA). In particolare:

- *Sabbia umida*: viene utilizzata la sabbia nello stato in cui viene fornita dal rivenditore, cioè contenente una rilevante dose di acqua rispetto al peso della sabbia asciutta. L'umidità della sabbia usata nella presente ricerca si attesta al 10%. Il valore è stato rilevato mediante pesatura di un campione di inerte precedentemente e successivamente alla sua essiccazione in forno.
- *Sabbia satura a superficie asciutta*: viene realizzata aggiungendo all'inerte secco (essiccato in forno) il 2% della sua massa in acqua. Una volta assorbita questa quantità di acqua la sabbia è considerata satura, cioè incapace di assorbire l'acqua preposta all'innesco dei processi di indurimento, ma asciutta sulla superficie, cioè non può rilasciare l'acqua durante la fase di getto.

Non tutti gli inerti sono idonei alla produzione del calcestruzzo; esistono dei requisiti fondamentali in assenza dei quali il calcestruzzo rischia di essere degradato anche se esposto in ambienti non aggressivi. Questi requisiti prevedono l'assenza di sostanze nocive alla durabilità del calcestruzzo.

Gli aggregati non devono contenere cloruri che comportano il rischio di corrosione delle armature; di solito ciò accade quando si utilizzano sabbie di origine marina che possono essere utilizzate previo preliminare trattamento in un impianto di lavaggio.

Gli inerti devono essere privi inoltre di impurità quali ad esempio:

- *Limo, argilla, humus (terreni vegetali)*: la loro presenza può compromettere l'adesione tra inerte e matrice cementizia determinando una riduzione della resistenza meccanica del materiale, ma non determina alcuna riduzione del grado di durabilità del

calcestruzzo. Questi inquinanti possono essere eliminati mediante lavaggio.

- *Materie organiche*: possono compromettere il processo di idratazione del cemento e rallentare o ridurre lo sviluppo delle resistenze meccaniche. Anche in questo caso si tratta di un inconveniente che riduce le prestazioni del calcestruzzo senza un vero e proprio pregiudizio per la durabilità dell'opera.
- *Silice amorfa*: alcune forme di silice presenti nell'aggregato possono reagire con gli alcali del cemento (sodio e potassio) per formare silicati alcalini idrati dal carattere espansivo e fortemente dirompenti nei confronti della matrice cementizia. Questa reazione, nota come reazione alcali-silice, si manifesta attraverso fessurazioni irregolari o espulsioni localizzate di materiale (pop-out) che possono pregiudicare seriamente la durabilità delle opere in calcestruzzo. Attualmente la presenza di silice reattiva nell'inerte rappresenta la più insidiosa forma di degrado del calcestruzzo.

Di seguito l'analisi granulometrica della sabbia utilizzata nella presente tesi e il grafico del passante cumulativa % ai vari vagli (Tabella 2, Figura 7).

Tabella 2. Analisi granulometrica della sabbia di tipo calcareo 0-8 mm.

Vaglio (mm)	Peso setaccio (g)	Peso lordo setaccio (g)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
FONDELLO	440,90	449,18	8,28	0,83	100,00	0,00
0,063	495,20	422,98	27,78	2,78	99,18	0,83
0,090	402,31	403,21	0,90	0,09	96,40	3,61
0,125	412,47	442,36	29,89	2,99	96,31	3,70
0,150	402,78	460,52	57,74	5,77	93,32	6,69
0,250	423,64	526,15	102,51	10,25	87,55	12,46
0,500	460,52	601,30	140,78	14,08	77,22	22,71
1,000	397,04	480,86	83,82	8,38	63,22	36,79
1,400	535,39	669,30	133,91	13,39	54,83	45,17
2,000	438,70	566,79	128,09	12,81	41,44	58,56
2,800	561,60	719,97	158,37	15,84	28,63	71,37
4,000	569,15	655,02	85,87	8,59	12,80	87,21
4.760	539,31	581,41	42,10	4,21	4,21	95,79
8,000	535,38	535,38	0,00	0,00	0,00	100,00

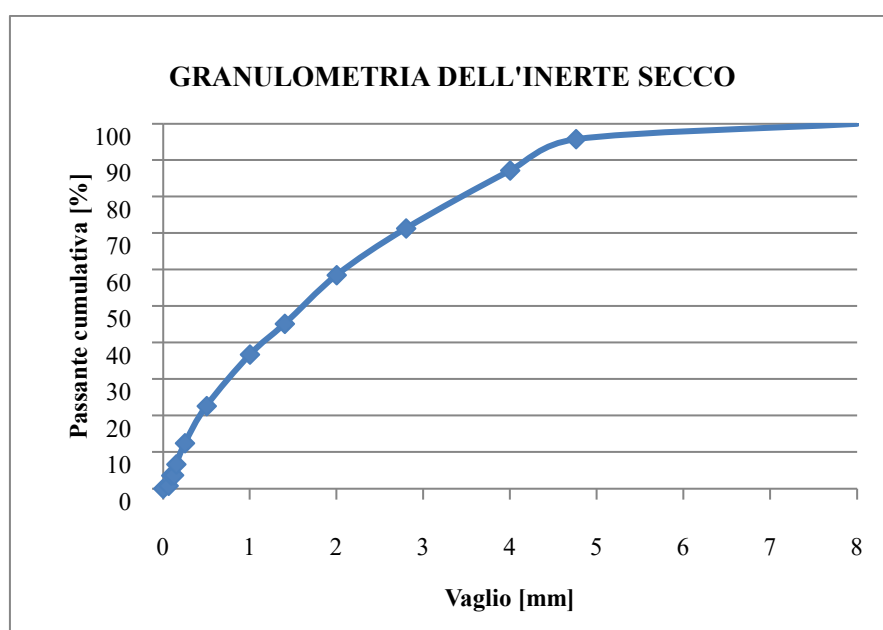


Figura 7 Grafico del passante cumulativo % ai vari vagli della sabbia di tipo calcareo 0-8 durante l'analisi granulometrica

3.5 Leganti idraulici

I leganti idraulici sono dei materiali inorganici che vengono finemente macinati e uniti con elementi solidi inerti; una volta mescolati con acqua formano una pasta che all'inizio si presenta lavorabile e deformabile e in seguito si indurisce gradualmente sia all'aria che in acqua fino ad assumere una consistenza pietrosa. Questa proprietà è dovuta alla formazione di composti idrati, insolubili o scarsamente solubili, alluminati e ferriti di calcio presenti nel legante. Questo processo rende i leganti idraulici capaci di rimanere durevolmente solidi se esposti all'aria e all'acqua.

Come si è potuto già notare, il loro processo di indurimento è in gran parte successivo al processo di presa e vengono definiti "idraulici" perché sono capaci di sviluppare la relazione anche non a contatto con l'aria.

Si riconoscono come leganti idraulici la calce idraulica e i cementi.

La calce idraulica originale deve la sua proprietà alla presenza di composti argillosi che induriscono per via di una reazione con l'acqua. Si otteneva attraverso la cottura di calcari. Questa si differenzia dalla calce aerea perché contiene "idrauliti" (silicati alluminati simili a quelli del cemento). Oggigiorno viene chiamata così una miscela di calcare e argilla (la calce idraulica artificiale) o un semplice aggregato ottenuto miscelando cemento Portland e calce idrata. Le differenze rilevanti tra la calce idraulica e il cemento sono in realtà poche, ma è importante sottolineare la presenza nella prima di ossido di calcio libero, a causa della temperatura di cottura più bassa.

Il cemento è il legante idraulico più usato e viene mescolato con aggregati inerti e acqua per produrre malta e calcestruzzo.

3.5.1 La calce idraulica

La calce idraulica condivide con il cemento tutte le caratteristiche strutturali, ma differisce per il tempo di cottura in fase di lavorazione e nelle quantità di argilla contenuta.

Nell'antichità venivano usati calcari marnosi, cioè contenenti quantità intorno al 25% di argilla, cotti in forni che potevano arrivare ad una temperatura massima di circa 1000 °C. Il prodotto ottenuto in cottura dalla fusione del calcare con l'argilla fu chiamato dai romani calce idraulica, perché era un legante che aveva come caratteristica la possibilità di indurire sia all'aria aperta che sott'acqua (idro), come accennato precedentemente. Questa si differenzia dalla *calce idrata*, in quanto appartengono a due famiglie diverse.

La calce comune (*calce idrata*, *calce viva*, *calce spenta*, *grassello di calce*) e che si usa in edilizia e in agricoltura è data dalla cottura di sabbie calcaree pure, appartiene alla famiglia dei leganti aerei, cioè non ha la capacità di indurire sott'acqua.

La calce idraulica invece appartiene alla famiglia dei leganti idraulici, cioè alla famiglia dei cementi. Infatti oltre ad essere chiamata calce idraulica viene comunemente detta “cemento povero”. Infatti ne ha tutte le caratteristiche sia di struttura che di resistenza. Un laboratorio moderno riuscirebbe a malapena a distinguere un sacchetto di calce idraulica da uno di cemento. Le uniche due cose in cui si differenziano sono il tempo di cottura e la quantità di argilla contenuta nell'una e nell'altra. I tempi di cottura vanno dalle 36 ore circa a 1000 °C della calce idraulica naturale ai 45 minuti circa a 1450 °C per il cemento. Le quantità di argilla invece vanno dal 20-22% per la calce idraulica ai 25-27% per il cemento.

Oggi si possono ottenere calci idrauliche naturali anche dalla cottura di calcari silicei anziché argillosi, sicuramente questo metodo è molto più

rapido ed economico, consente di ottenere un prezzo di mercato più competitivo, ma ha anche dei contro. In particolare ha il difetto della silice contenuta nella sabbia silicea usata al posto dei calcari marnosi in cottura, e che quindi troveremo nel prodotto finito. La presenza di quest'ultima obbliga ad uno smaltimento come rifiuto pericoloso o speciale del materiale e ad una protezione minuziosa dei lavoratori esposti. Si può comunque venire a conoscenza delle protezioni individuali da usare durante il contatto attraverso le schede di sicurezza dei prodotti.

La calce idraulica vera e propria può essere naturale o artificiale; le norme prevedono anche altre categorie di calci idrauliche che si possono definire di *miscela*.

Tra le calci naturali esistono due tipologie di calci super idrauliche:

- la calce idraulica naturale in polvere;
- la calce eminentemente idraulica naturale in polvere.

Vengono ottenute dalla cottura di marne naturali e successivo spegnimento e macinazione. Nel caso in cui il carbonato di calcio (CaCO_3), nella sua composizione mineralogica, presenti contenuti argillosi in quantità variabili (per residuo di calce libera superiore al 15%, dopo cottura fino a 1250 °C della marna, si avrà una NHL 3,5; vedi normativa vigente EN 459-1) si otterrà una calce capace di indurire anche in presenza d'acqua, questa è definita come calce idraulica naturale “NHL” ottenibile solo da calcare marnoso lavorabile in zolle o in polvere e mai in grassello altrimenti reagendo con l'acqua, indurirebbe direttamente nella fase di spegnimento. L'idratazione deve avvenire, per nebulizzazione, in maniera controllata durante la fase di spegnimento della calce viva mantenuta a circa 120 °C. L'idraulicità è data da componenti mineralogici specifici, in particolar modo dagli elementi vetrosi presenti nella marna, trasformati ed usati come i

silicati e gli alluminati. Questi composti chimici si ottengono in una NHL dal legame che avviene in fase di cottura tra l'ossido di calcio presente nel calcare marnoso e la presenza nello stesso di ossido di allumina e ossido di silice data dalla componente argillosa; il tutto si trasforma durante la cottura:

- ossido di calcio + ossido di silice = SILICATI
- ossido di calcio + ossido di allumina = ALLUMINATI

La calce libera che influisce anche sull'indice: NHL 2, NHL3,5, NHL5; rappresenta la quantità di ossido di calcio + H₂O (detto anche portlandite) in eccesso e non combinato in fase di cottura come visto precedentemente. Più è alta la presenza di calce libera più bassa sarà la resistenza meccanica e il livello di idraulicità.

Poi ci sono le calce definite di miscela che si suddividono in:

- calce idraulica artificiale pozzolanica in polvere: miscela omogenea ottenuta dalla macinazione di pozzolana e calce aerea idratata.
- calce idraulica artificiale siderurgica in polvere: miscela omogenea ottenuta dalla macinazione di loppa basica granulare d'altoforno e calce aerea idratata.

Le proprietà idrauliche sono dovute nel primo caso ai prodotti di reazione fra pozzolana e la calce (cemento pozzolanico) nel secondo caso ai prodotti di idratazione della scoria granulare attivata alla presenza dell'idrossido di calcio (attività idraulica latente).

Per studio di questo lavoro si è utilizzata come legante la calce idraulica prodotta dalla Plastocem con le caratteristiche menzionate nella norma UNI 10892. La classificazione corrispondente è una LIC 3.0. La sua superficie specifica è 10.000 cm²/g e la percentuale di trattenuto a 180 µm è minore del 2%.

3.5.2 Il cemento Portland

Il cemento Portland è il tipo di cemento oggi più utilizzato ed è il materiale su cui si basa gran parte della moderna edilizia. Se viene mescolato con acqua diventa adesivo, pertanto si dice che possiede proprietà idrauliche.

È uno dei prodotti più commercializzati al mondo in relazione al peso; l'Italia si classifica al primo posto tra i paesi produttori di cemento a livello europeo e al tredicesimo a livello mondiale¹⁸.

L'uso dei leganti in architettura è noto già dall'epoca antica, si è perfezionata grazie ai Romani come accennato precedentemente, e ancor più in epoca classica. Tra il XVIII e il XIX secolo si cominciarono a porre le basi per lo sviluppo dei leganti idraulici.

Tra questi il cemento Portland fu inventato dal muratore inglese Joseph Aspdin nel 1824 (deve il nome alla somiglianza nell'aspetto con la roccia di Portland, un'isola nella contea di Dorset, Inghilterra) e si presenta come un prodotto che si ottiene dalla miscelazione del *clinker*, con l'aggiunta di gesso nella quantità necessaria per regolarizzare il processo di idratazione. L'analisi microscopica eseguita su pezzi di cemento scorificato ha rilevato la presenza di quattro componenti principali e precisamente l'alite (silicato tricalcico che si idrata meno rapidamente degli alluminati e pertanto durante le prime ore non contribuisce allo sviluppo della resistenza meccanica del cemento Portland), la belite (silicato bicalcico che ha un'idratazione più lenta dell'alite ed è il maggiore responsabile dell'aumento della resistenza meccanica a lungo termine), la celite (alluminato tricalcico che si idrata molto rapidamente e non contribuisce allo sviluppo della resistenza meccanica finale) e la fase ferrica (ferro alluminato tetracalcico che si idrata

¹⁸ Martinelli, "Le conseguenze del cemento", 2011

molto rapidamente e non contribuisce all'incremento della resistenza meccanica se non durante le prime ore dopo il getto).

Le fasi del processo per la produzione del cemento sono le seguenti:

- Estrazione materie prime;
- Controllo caratteristiche materie prime;
- Frantumazione;
- Pre-omogeneizzazione;
- Essiccazione e macinazione materie prime per produzione della miscela cruda ("farina");
- Controllo caratteristiche della farina;
- Deposito e omogeneizzazione della farina;
- Preparazione dei combustibili;
- Cottura clinker;
- Controllo caratteristiche del clinker;
- Deposito clinker;
- Deposito costituenti e additivi;
- Controllo caratteristiche dei costituenti;
- Deposito additivi cromoriducenti;
- Macinazione cemento;
- Controllo caratteristiche dei cementi prodotti;
- Deposito nei silos dei cementi;
- Insaccamento;
- Controllo di conformità del cemento CE;
- Spedizione sfuso e sacchi.

Le materie prime per la produzione del cemento Portland sono minerali contenenti: ossido di calcio (44%), ossido di silicio (14,5%), ossido di alluminio (3,5%), ossido di ferro (2%) e ossido di magnesio (1,6%). L'estrazione avviene in miniere, in sotterraneo o a cielo aperto, poste in

prossimità della fabbrica, che in genere hanno già la composizione desiderata, mentre in alcuni casi è necessario aggiungere argilla o calcare, oppure minerale di ferro, bauxite o altri materiali residui di fonderia.

La miscela viene riscaldata in un forno speciale costituito da un enorme cilindro (chiamato *kiln*) disposto orizzontalmente con leggera inclinazione e ruotante lentamente (Figura 8).

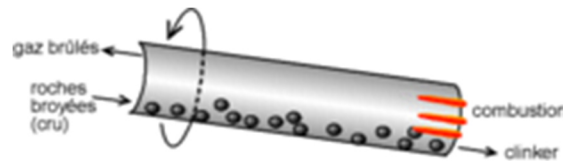


Figura 8 Schema di forno Kiln

La temperatura cresce lungo il cilindro fino a circa 1450 °C ed è determinata in modo che i minerali si aggregino ma non fondano e vetrifichino. Nella sezione a temperatura minore il carbonato di calcio (calcare) si scinde in ossido di calcio e biossido di carbonio (CO₂). Nella zona ad alta temperatura l'ossido di calcio reagisce con i silicati a formare metasilicato di calcio (CaSiO₃ e Ca₂Si₂O₅). Si forma anche una piccola quantità di alluminato tricalcico Ca₃(AlO₃)₂ e di alluminato ferrito tetracalcico (C₄AF, risultato della reazione 4CaO+Al₂O₃+Fe₂O₃). Il materiale risultante è complessivamente denominato clinker. Il clinker può essere conservato per anni prima di produrre il cemento, a condizione di evitare il contatto con l'acqua.

Per migliorare le caratteristiche del prodotto finito al *clinker* viene aggiunto circa il 2% di gesso o di solfato di calcio e la miscela è finemente macinata. La polvere ottenuta è il cemento pronto per l'uso. Il cemento ottenuto ha una composizione del tipo (Figura 9):

- 64% ossido di calcio

- 21% ossido di silicio
- 6,5% ossido di alluminio
- 4,5% ossido di ferro
- 1,5% ossido di magnesio
- 1,6% solfati
- 1% altri materiali, tra cui soprattutto acqua.

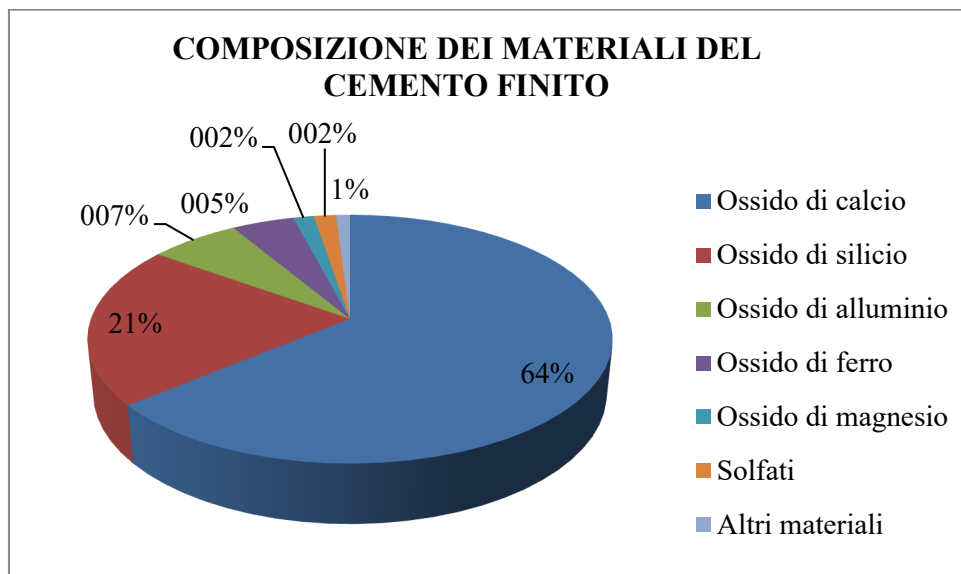


Figura 9 Composizione in percentuale dei materiali del cemento finito

Quando il cemento Portland viene miscelato con l'acqua, il prodotto solidifica in alcune ore e indurisce progressivamente nell'arco di diverse settimane. L'indurimento iniziale è provocato dalla reazione tra acqua, gesso e l'alluminato di tricalcico, a formare una struttura cristallina di alluminato di calcio idrato (C-A-H), ettringite (Aft) e monosolfato (Afm). Il successivo indurimento e lo sviluppo di forze interne di tensione derivano dalla più lenta reazione dell'acqua con il silicato di tricalcico, a formare una struttura amorfa chiamata silicato di calcio idrato (C-S-H gel). In entrambi i casi le strutture avvolgono e legano i singoli granuli di materiale presenti. Un'ultima reazione produce il gel di silice (SiO_2). Tutte e tre le reazioni sviluppano calore.

Con l'aggiunta al cemento di particolari materiali (calcare e calce) si ottiene il cemento plastico, di più rapida presa e maggiore lavorabilità. La malta preparata usando una miscela di cemento Portland e calce è nota come malta bastarda. Questo materiale è usato in particolare per rivestire le superfici esterne degli edifici (intonaco).

La composizione finale sarà costituita dalle seguenti percentuali in peso (Figura 10):

- 50% (silicato tricalcico);
- 25% (silicato bicalcico);
- 12% (alluminato tricalcico);
- 8% (ferrito alluminato tetracalcico).

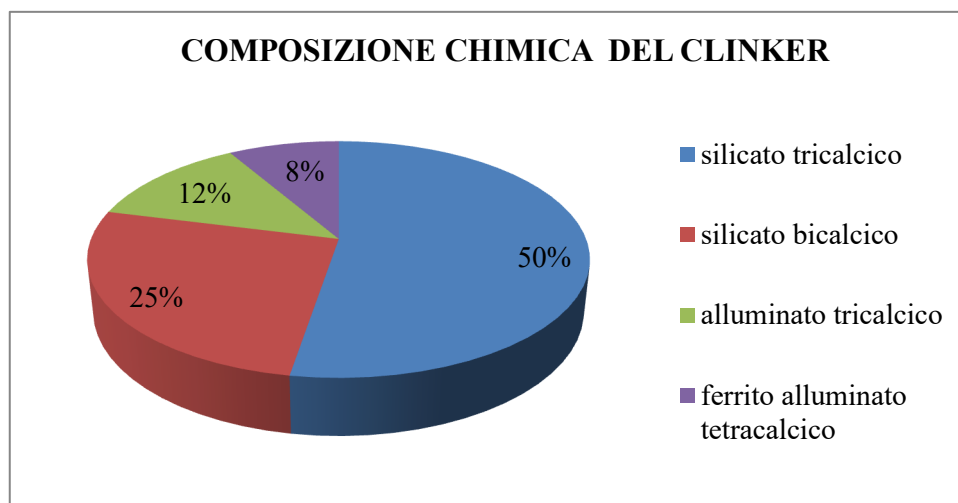


Figura 10 Composizione chimica del clinker.

Il fenomeno di presa e indurimento di un calcestruzzo è legato alle trasformazioni chimico-fisiche che avvengono tra il cemento e l'acqua d'impasto.

Il meccanismo di idratazione della pasta cementizia è molto complesso e quindi ci si limita a descrivere solo le fasi più importanti.

Le reazioni chimiche che si sviluppano grazie all'azione chimica dell'acqua nei confronti dei granuli della polvere di cemento avvengono in successione temporale:

- l'idratazione della celite con la formazione di una fase colloidale. Questo processo si compone di due reazioni quanti sono i componenti della stessa. La prima riguarda l'idratazione dell'alluminato tricalcico (C_3A) ed è molto rapida e fortemente esotermica (circa 215 kcal/kg di C_3A):

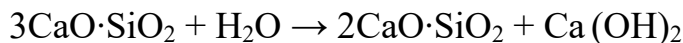


- la seconda reazione consiste in una scissione idrolitica dell'alluminato-ferrito tricalcico (C_4AF):



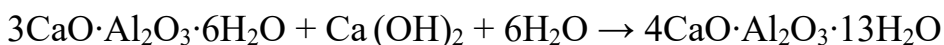
dove con "n" si indica un numero imprecisato di molecole d'acqua.

- l'idratazione e decalcificazione dell'alite con formazione di un composto avente la stessa composizione della belite (C_2S):

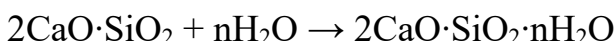


- comincia ad idratarsi il silicato di calcio (C_2S) con gli ioni dell'idrossido di calcio formando una pellicola colloidale che riveste il granulo di cemento e lo protegge da un ulteriore attacco dell'acqua. In tal modo questa reazione iniziata molto rapidamente subisce un

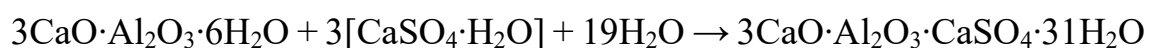
forte rallentamento. A questo punto si verifica l'idratazione dell'alluminato tricalcico:



e del C_2S proveniente dalla decalcificazione idrolitica dell'alite e della belite originaria:



La prima reazione provoca una forte richiesta di calce idrata (portlandite) che non riesce ad essere soddisfatta, per l'elevata velocità cui procede, dalla sola decalcificazione dell'alite. Questo provoca una decalcificazione anche della belite che, però, determina una produzione di altri composti poveri di CaO e quindi peggiorerebbe le caratteristiche meccaniche. Per risolvere tale problema si aggiunge una piccola percentuale di gesso che reagisce preferenzialmente con l'alluminato tricalcico riducendo la richiesta di calce idrata rallentando la presa e l'indurimento¹⁹.



Dallo studio delle cause e degli effetti riguardanti il processo di maturazione, si nota come l'utilizzo o meno di alcune materie prime piuttosto che di altre, influisca in maniera considerevole nelle fasi di presa o di indurimento.

Dal punto di vista legislativo, la norma UNI EN 197-1, raccoglie in un'unica classificazione tutte le tipologie di cemento prodotte nei vari Paesi membri fino alla data della sua redazione. Questa è oggi il documento di riferimento volto alla classificazione dei cementi in base alla loro composizione e alla loro resistenza normalizzata a 28 giorni dal confezionamento dell'impasto.

¹⁹ <https://digilander.libero.it/TEXAS76/2.htm>

La suddetta norma riconosce ed elenca 5 tipi di cemento, 27 sottotipi e 6 classi di resistenza.

Le prime due tipologie riguardano la classificazione dei cementi Portland, e i loro 20 sottotipi, suddivisi in base alla percentuale di clinker in essi contenuti (>95% per i cementi di tipo A, >65% per i cementi di tipo B) e alle materie prime aggiunte nei cementi Portland, ossia se composti dal solo clinker di cemento Portland (tipologia I) oppure se addizionati con materiali minerali, nel cui caso prendono il nome di *cementi Portland di miscela* (tipologia II). Nel tal caso, si hanno miscele di cementi Portland contenenti loppa (S), fumi di silice (D), pozzolana (P, Q), ceneri volanti (V, W), scisto calcinato (T) o calcare (L, LL).

Sempre secondo alla normativa segnalata sopra, si individuano 6 classi di resistenza, in base alla resistenza meccanica a compressione sviluppata da una malta standard confezionata con il cemento dopo 28 gg di stagionatura a umido. Più nello specifico:

- 32,5N resistenze a 28gg $\geq$ 32,5 MPa
- 32,5R resistenze a 28gg $\geq$ 32,5 MPa e resistenza iniziale elevata
- 42,5N resistenze a 28gg $\geq$ 42,5 MPa
- 42,5R resistenze a 28gg $\geq$ 42,5 MPa e resistenza iniziale elevata
- 52,5N resistenze a 28gg $\geq$ 52,5 MPa
- 52,5R resistenze a 28gg $\geq$ 52,5 MPa e resistenza iniziale elevata

La polvere di cemento utilizzata nella sperimentazione inerente alla tesi è classificabile come CEM II/A-LL 42,5R (Figura 11). Si tratta pertanto di cemento Portland a resistenza a compressione iniziale elevata (maggiore di 20 MPa a 2gg) e costituito per l'80%-94% in massa da clinker, e per la restante parte da calcare ed eventuali costituenti secondari.



Figura 11 Cemento Portland CEM II/A-LL 42,5R

3.6 Leganti geopolimerici

Si intendono per leganti geopolimerici, le polveri alluminosilatiche, cioè le polveri ottenute attraverso materie prime reattive ricche in silicio (le ceneri volanti, le scorie d'alto-forno e la pula di riso) e in alluminio (le argille come le caoliniti e le bentoniti). Il rapporto tra questi due componenti chimici principali influenza la tipologia di legante alluminosilatico necessaria ad una determinata applicazione. Oltre a questo, bisogna tenere in considerazione anche della reattività in ambiente alcalino che caratterizzano diverse categorie di alluminosilicati.

Le caratteristiche morfologiche, chimiche-composizionali e di reattività di questi leganti alternativi si dividono in due categorie.

- *Materie prime calcinate e ricche di alluminio:* metacaolino e i minerali vulcanici vengono preferite per manufatti ad alte prestazioni e resistenti ad alte temperature.
- *Polveri di scarto dell'industria ricche di silicio:* ceneri volanti e la loppa d'altoforno vengono preferite per applicazioni generiche in ambito edilizio o per l'inertizzazione di scorie tossiche.

La reattività delle polveri alluminosilicatiche in ambiente alcalino varia come di seguito: metacaolino > zeolite > scorie d'alto forno > ceneri volanti > pozzolana > caolino. Le materie prime calcinate hanno una maggiore reattività in fase di geopolimerizzazione in fase di idrolisi alcalina²⁰.

Nonostante la reattività del metacaolino sia superiore alle altre materie prime, come descritto sopra, a causa della sua elevata superficie specifica necessita di molta acqua per realizzare impasti lavorabili; quindi sono necessari tempi prolungati di consolidamento e temperature elevate di 60°C-80°C per la totale rimozione dell'acqua che non fa parte della struttura geopolimerica.

In questa tesi sono state utilizzate le seguenti polveri alluminosilicatiche:

- metacaolino bianco (Metastar 501); peso specifico di 2,5 g/cm³ e diametro medio delle particelle pari a 1,2 µm;
- cenere volante (di classe F); costituita essenzialmente da SiO₂ (con valori in massa compresi tra 36-52%) e Al₂O₃ (valori compresi tra 22-36%) reattivi e si presenta sotto forma di polvere finissima con attività pozzolanica;
- cemento alluminoso (Ciment Fondu); prodotto dalla Kerneos Inc. che ha superficie specifica tra 2850 e 3450 cm²/g e diametro medio tra 10 e 20 µm;

3.7 Soluzione alcalina

Affinché si verifichi l'attivazione del silicio (Si) e dell'alluminio (Al) presenti nelle polveri alluminosilicatiche, sono necessarie delle soluzioni alcaline forti. I comuni attivatori alcalini che vengono utilizzati sono

²⁰ Rientrano sotto il generico nome di idrolisi diverse reazioni chimiche in cui le molecole sono scisse in due o più parti per effetto dell'acqua e può a volte considerarsi la reazione inversa della reazione di condensazione.

idrossidi, solfati, carbonati e silicati alcalini come NaOH, KOH, silicati di sodio e potassio, Na_2SiO_3 , K_2SiO_3 o piccole quantità di cemento clinker.

I più utilizzati sono; il silicato di sodio e potassio in soluzione acquosa con eventuale aggiunta dei relativi idrossidi o silice per modificare il rapporto molare $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$, in base al tipo di materia prima e prodotto geopolimerico finale. A parità di rapporto molare $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ e di concentrazione in soluzione, la viscosità dei silicati di potassio è circa dieci volte inferiore a quella dei silicati di sodio, mentre il pH è superiore.

Il fattore che più influisce sulla resistenza meccanica dei prodotti geopolimerici è il pH (Figura 12), in quanto all'aumentare di esso diminuisce il tempo richiesto per l'indurimento. A bassi pH l'impasto rimane molto viscoso e si comporta come un cemento, invece ad alti valori di pH si abbassa la viscosità e si migliora la lavorabilità. L'utilizzo di soluzioni di silicato di potassio richiede una minore aggiunta di acqua, poiché un eccesso di acqua nell'impasto diminuisce la resistenza meccanica, aumentando anche la porosità residua.

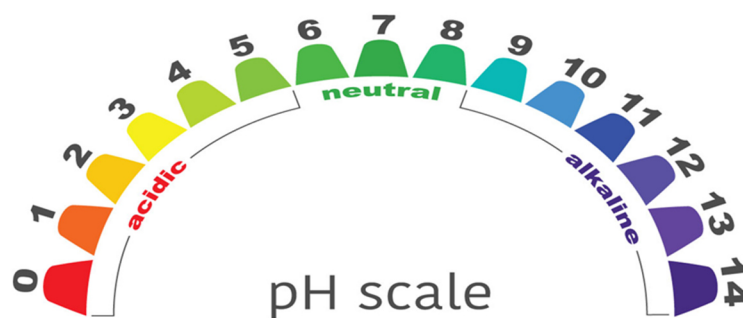
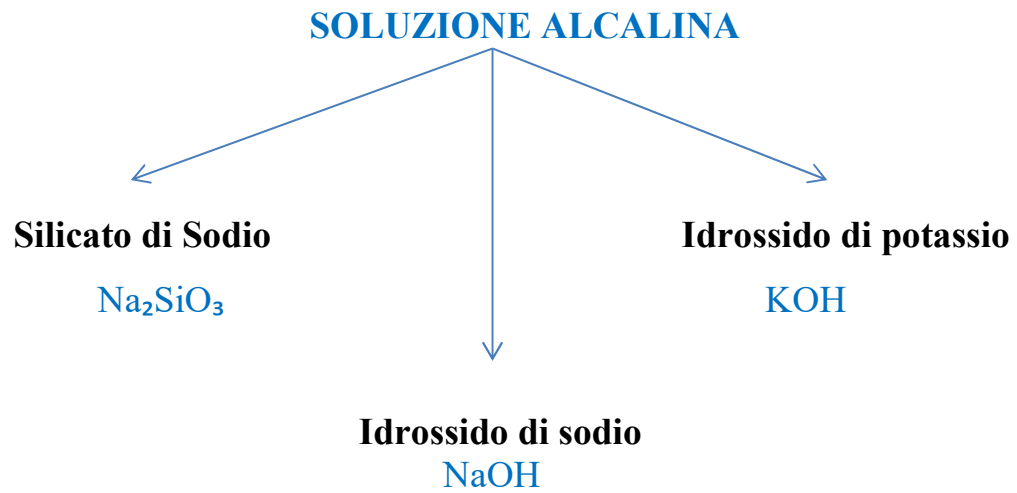


Figura 12 Scala del pH per soluzioni alcaline

Nella parte sperimentale di questa tesi sono state utilizzate soluzioni alcaline composte da silicato di sodio e soluzioni di idrossidi contenenti idrossidi di sodio (NaOH) o idrossido di potassio (KOH). Il rapporto tra la quantità in

massa del silicato di sodio e la quantità in massa dell'idrossido utilizzato è stato mantenuto costante, pari ad 1.



PARTE SECONDA

Preparazione e caratterizzazione dei campioni in malta cementizia e geopolimerica

Capitolo 4

Impasti e campionatura

4.1 Introduzione

Per quanto riguarda gli impasti utilizzati nella presente ricerca si è fatto riferimento a malte geopolimeriche già sperimentate, in cui le malte analizzate sono state selezionate in modo da ottenere composti di caratteristiche meccaniche differenti, variando il minor numero di parametri in fase di miscelazione.

Nelle malte geopolimeriche l'unica variabile che le differisce è l'apporto di idrossidi solidi (a parità di alluminosilicato utilizzato) all'interno della soluzione alcalina. Inoltre, il rapporto tra soluzione di idrossido e silicato di sodio e le quantità di inerte e polveri alluminosilicatiche sono stati mantenuti costanti. Invece per le malte cementizie le variabili che nei composti comportano una differenziazione meccanica, sono il rapporto tra calce idraulica/cemento Portland e il rapporto acqua/legante.

Nei paragrafi successivi verranno classificate le 12 malte cementizie utilizzate per questa ricerca.

4.2 Classificazione

Le 12 malte utilizzate si possono classificare in 4 tipologie di impasti che a loro volta si dividono ognuno in 3 classi di resistenza.

Le 12 malte utilizzate sono 9 malte geopolimeriche e 3 malte a base cementizia. Le prime 9 malte geopolimeriche si dividono nel seguente modo:

- 3 malte a base di cenere volante più silicato di sodio e idrossido di sodio.
- 3 a base di cenere volante più cemento alluminoso più silicato di sodio e più idrossido di potassio.
- 3 a base di metacaolino più silicato di sodio e più idrossido di potassio.

Le 3 malte a base cementizia invece, si dividono in:

- 1 malta a base di cemento.
- 1 malta a base di cemento più legante idraulico (rapporto 1:1 in peso).
- 1 malta a base di cemento più legante idraulico (rapporto 1:4 in peso).

Per quanto riguarda le classi di resistenza, sopra accennate, si fa riferimento alla norma UNI EN 1504-3, in cui si presenta una suddivisione in 4 classi, chiamate R1 con $R_c \geq 10$ MPa, R2 con $R_c \geq 15$ MPa, R3 con $R_c \geq 25$ MPa e R4 con $R_c \geq 45$ MPa. Nella presente tesi sono state realizzate malte appartenenti alle prime 3 classi di resistenza meccanica.

4.2.1 Le malte geopolimeriche

In questo paragrafo si tratterà nello specifico la composizione e le caratteristiche delle 3 tipologie di malte geopolimeriche.

Per quanto riguarda le malte in metacaolino e KOH in soluzione alcalina, è stato possibile ottenere malte con un buon grado di resistenza meccanica. Si sono ottenute malte di classe R1, R2 e R3; i rapporti tra inerte e polvere di metacaolino e tra soluzione alcalina e polvere di metacaolino sono stati mantenuti costanti, e rispettivamente pari a 2,7 e 1,2.

In questi impasti è stata rilevata una drastica diminuzione della lavorabilità dei composti geopolimerici a base di metacaolino all'aumentare del volume di malta impastata. Questo rapporto tra lavorabilità e volume di impasto si presenta non proporzionale.

Il tempo di miscelazione richiesto per l'impasto di ciascuna delle tre malte in metacaolino è pari a 5 minuti circa. Il dosaggio dei vari materiali, i rapporti di peso e di volume, e la composizione in macro-componenti delle tre malte relative a 1 litro di impasto sono riportati di seguito (Figura 13, Tabelle 3-11).

Tabella 3 Dosaggio dei componenti di R1 MKK

R1 MKK									
	SOLUZIONE ALCALINA					METAC A OLINO	INERTE	H ₂ O AGGIU NTA	
	SILICATO DI SODIO (Na ₂ SiO ₃)			SOLUZIONE KOH (50%)					H ₂ O DIST.
	SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	KOH	H ₂ O				
DENSITA' ρ (g/cm ³)	1,5			2,0	1,0	1,00	2,5	2,7	1,0
PESO (g)	300			74		225	500	1350	40
	90	44	166	37	37				
VOLUME (cm ³)	195			18	37	225	200	509	34
g/l (S. SSA)	253			32	32	190	422	1139	
g/l MISCELA FINALE	253			32	32	190	422	1139	
g x 6,5 LITRI	1645			206	206	1234	2742	7404	219

Tabella 4 Rapporti di peso relativi a R1 MKK

RAPPORTI DI PESO (g/g)						
Na ₂ SiO ₃ / Sol. KOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA/ METACAOLINO	INERTE/ METACAOLINO	H ₂ O/ METACAOLINO	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
1,0	2,5	1,2	2,7	0,9	1,8	1,6

Tabella 5 Rapporti di volume relativi a R1 MKK

RAPPORTI DI VOLUME (cm ³ /cm ³)						
Na ₂ SiO ₃ / Sol. KOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA/ METACAOLINO	INERTE/ METACAOLINO	H ₂ O/ METACAOLINO	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
3,5	5,5	2,4	2,5	2,1	1,9	1,9

Tabella 6 Dosaggio dei componenti di R2 MKK

R2 MKK									
	SOLUZIONE ALCALINA					METAC A OLINO	INERTE	H ₂ O AGGIU NTA	
	SILICATO DI SODIO (Na ₂ SiO ₃)			SOLUZIONE KOH (50%)					H ₂ O DIST.
	SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	KOH	H ₂ O				
DENSITA' ρ (g/cm ³)	1,5			2,0	1,0	1,0	2,5	2,7	1,0
PESO (g)	300			90		210	500	1350	23
	90	44	166	45	45				
VOLUME (cm ³)	195			22	45	210	200	509	20
g/l (S. SSA)	254			38	38	178	423	1143	
g/l MISCELA FINALE	254			38	38	178	423	1143	
g x 6,5 LITRI	1651			248	248	1156	2751	7428	127

Tabella 7 Rapporti di peso relativi a R2 MKK

RAPPORTI DI PESO (g/g)						
Na ₂ SiO ₃ / Sol. KOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA/ METACAOLINO	INERTE/ METACAOLINO	H ₂ O/ METACAOLINO	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
1,0	2,4	1,2	2,7	0,9	1,8	1,6

Tabella 8 Rapporti di volume relativi a R2 MKK

RAPPORTI DI VOLUME (cm ³ /cm ³)						
Na ₂ SiO ₃ / Sol. KOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA/ METACAOLINO	INERTE/ METACAOLINO	H ₂ O/ METACAOLINO	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
2,9	5,2	2,4	2,5	2,1	1,9	1,9

Tabella 9 Dosaggio dei componenti di R3 MKK

R3 MKK									
	SOLUZIONE ALCALINA					METAC A OLINO	INERTE	H ₂ O AGGIU NTA	
	SILICATO DI SODIO (Na ₂ SiO ₃)			SOLUZIONE KOH (50%)					H ₂ O DIST.
	SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	KOH	H ₂ O				
DENSITA' ρ (g/cm ³)	1,5			2,0	1,0	1,0	2,5	2,7	1,0
PESO (g)	300			300		0	500	1350	83
	90	44	166	150	150				
VOLUME (cm ³)	195			74	150	0	200	509	74
g/l STATO SSA	266			133	133	0	443	1197	
g/l MISCELA FINALE	266			133	133	0	443	1197	
g x 6,5 LITRI	1729			865	865	0	2882	7781	481

Tabella 10 Rapporti di peso relativi a R3 MKK

RAPPORTI DI PESO (g/g)						
Na ₂ SiO ₃ / Sol. KOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA/ METACAOLINO	INERTE/ METACAOLINO	H ₂ O/ METACAOLINO	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
1,0	1,1	1,2	2,7	0,8	1,8	1,6

Tabella 11 Rapporti di volume relativi a R3 MKK

RAPPORTI DI VOLUME (cm ³ /cm ³)						
Na ₂ SiO ₃ / Sol. KOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA/ METACAOLINO	INERTE/ METACAOLINO	H ₂ O/ METACAOLINO	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
0,9	2,4	2,1	2,5	1,6	1,9	1,9

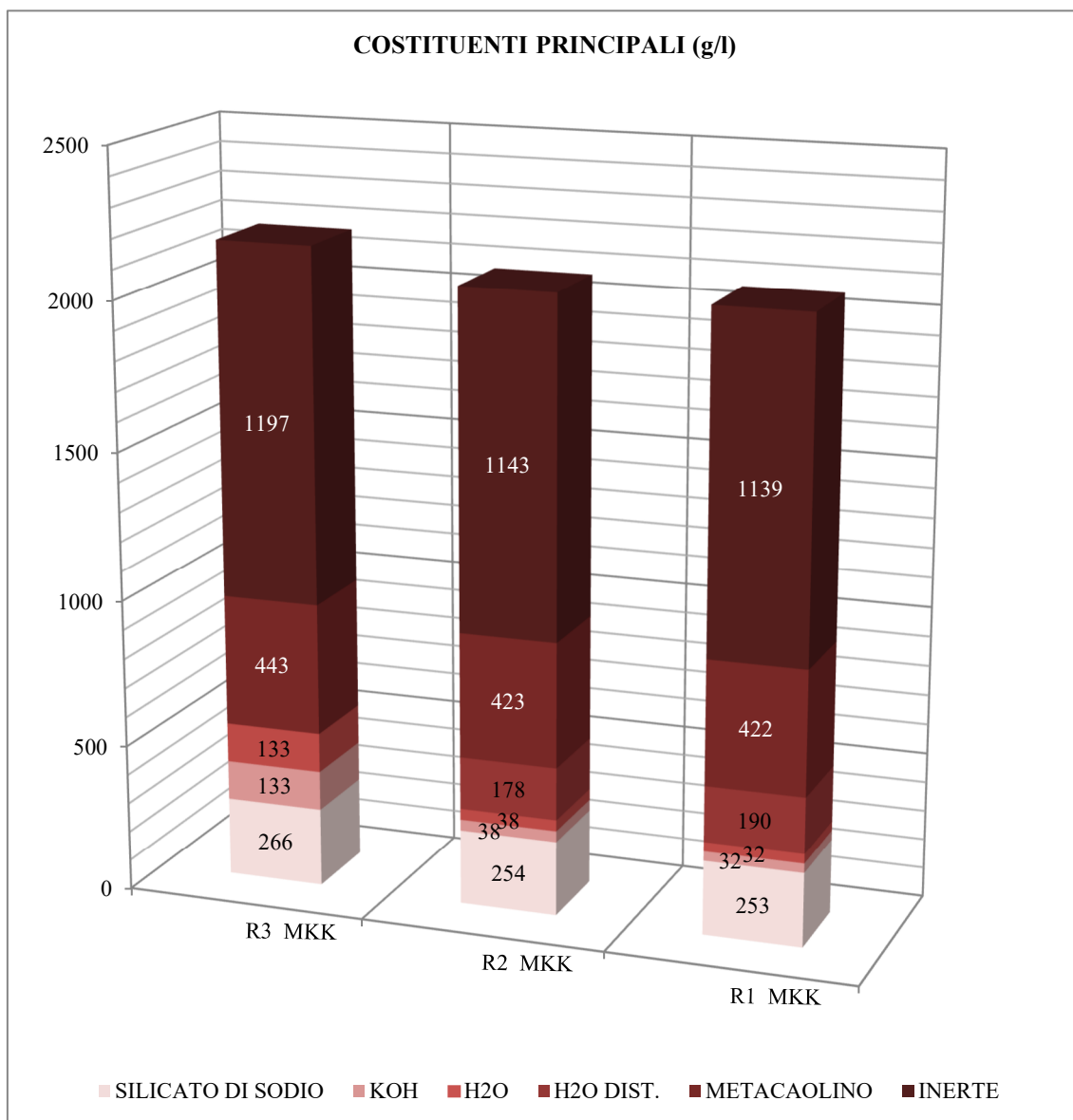


Figura 13 Malte in metacaolino, costituenti principali

Nelle malte in cenere volante e NaOH in soluzione alcalina, la minore efficacia mostrata dall'idrossido di sodio (rispetto all'idrossido di potassio) nello sviluppo delle resistenze meccaniche dei composti geopolimerici ha indotto alla produzione di soluzioni alcaline contenenti NaOH ad alta concentrazione.

Anche per questa categoria di malte geopolimeriche, i rapporti tra inerte e alluminosilicati e tra soluzione alcalina e alluminosilicati sono stati mantenuti costanti, e rispettivamente pari a 2,7 e 0,6.

A causa della notevole presenza di solidi all'interno della fase liquida utilizzata, è stato necessario aggiungere acqua in fase di miscelazione per aumentare la lavorabilità delle malte di classe R2 e R3. Tale apporto risulta, in ogni caso, irrilevante rispetto al volume totale del getto.

Il tempo di miscelazione necessario per l'impasto di ciascuna delle tre malte in cenere volante e soda caustica è pari a 2 minuti circa.

Il dosaggio dei vari materiali, i rapporti di peso e di volume, e la composizione in macro-componenti delle tre malte sono riportati in seguito (Figura 14, Tabelle 12-20).

Tabella 12 Dosaggio dei componenti di R1 FANa

R1 FANa								
	SOLUZIONE ALCALINA					CENERE VOLANT E	INERTE (SSA 2%)	H ₂ O AGGIUN TA
	SILICATO DI SODIO (Na ₂ SiO ₃)			SOLUZIONE NaOH				
	SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	NaOH	H ₂ O DIST.			
DENSITA' ρ (g/cm ³)	1,5			2,1	1,0	2,3	2,7	1,0
PESO (g)	150			150		500	1350	0
	45	22	83	30	120			
VOLUME (cm ³)	97			14	120	222	509	0
g/l STATO SSA	156			31	125	519	1402	
g/l MISCELA FINALE	156			31	125	519	1402	
g x 6,5 LITRI	1012			202	810	3374	9111	0

Tabella 13 Rapporti di peso relativi a R1 FANa

RAPPORTI DI PESO (g/g)						
Na ₂ SiO ₃ / Sol. NaOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA/ CENERE VOLANTE	INERTE/ CENERE VOLANTE	H ₂ O/ CENERE VOLANTE	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
1,0	2,1	0,6	2,7	0,4	1,8	1,6

Tabella 14 Rapporti di volume relativi a R1 FANa

RAPPORTI DI VOLUME (cm ³ /cm ³)						
Na ₂ SiO ₃ / Sol. NaOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA/ CENERE VOLANTE	INERTE/ CENERE VOLANTE	H ₂ O/ CENERE VOLANTE	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
0,7	4,6	1,0	2,3	0,9	3,3	1,9

Tabella 15 Dosaggio dei componenti di R2 FANa

R2 FANa								
	SOLUZIONE ALCALINA					CENERE VOLANT E	INERT E (SSA 2%)	H ₂ O AGGIUNT A
	SILICATO DI SODIO (Na ₂ SiO ₃)			SOLUZIONE NaOH				
	SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	NaOH	H ₂ O DIST.			
DENSITA' ρ (g/cm ³)	1,5			2,1	1,0	2,3	2,7	1,0
PESO (g)	150			150		500	1350	3
	45	22	83	42	108			
VOLUME (cm ³)	97			20	108	222	509	
g/l STATO SSA	157			44	113	523	1411	
g/l MISCELA FINALE	157			44	113	523	1411	
g x 6,5 LITRI	1019			285	734	3397	9171	18

Tabella 16 Rapporti di peso relativi a R2 FANa

RAPPORTI DI PESO (g/g)						
Na ₂ SiO ₃ / Sol. NaOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA/ CENERE VOLANTE	INERTE/ CENERE VOLANTE	H ₂ O/ CENERE VOLANTE	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
1,0	1,8	0,6	2,7	0,4	1,8	1,6

Tabella 17 Rapporti di volume relativi a R2 FANa

RAPPORTI DI VOLUME (cm ³ /cm ³)						
Na ₂ SiO ₃ / Sol. NaOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA/ CENERE VOLANTE	INERTE/ CENERE VOLANTE	H ₂ O/ CENERE VOLANTE	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
0,8	3,8	1,0	2,3	0,9	3,3	1,9

Tabella 18 Dosaggio dei componenti di R3 FANa

R3 FANa								
	SOLUZIONE ALCALINA					CENERE VOLANT E	INERTE (SSA 2%)	H ₂ O AGGIUN TA
	SILICATO DI SODIO (Na ₂ SiO ₃)			SOLUZIONE NaOH				
	SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	NaOH	H ₂ O DIST.			
DENSITA' ρ (g/cm ³)	1,5			2,1	1,0	2,3	2,7	1,0
PESO (g)	153			153		500	1350	5
	46	22	85	56	97			
VOLUME (cm ³)	99			26	97	222	509	5
g/l STATO SSA	160			59	102	524	1414	
g/l MISCELA FINALE	160			59	102	524	1414	
g x 6,5 LITRI	1043			382	661	3405	9194	32

Tabella 19 Rapporti di peso relativi a R3 FANa

RAPPORTI DI PESO (g/g)						
Na ₂ SiO ₃ / Sol. NaOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA/ CENERE VOLANTE	INERTE/ CENERE VOLANTE	H ₂ O/ CENERE VOLANTE	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
1,0	1,5	0,6	2,7	0,4	1,8	1,6

Tabella 20 Rapporti di volume relativi a R3 FANa

RAPPORTI DI VOLUME (cm ³ /cm ³)						
Na ₂ SiO ₃ / Sol. NaOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA/ CENERE VOLANTE	INERTE/ CENERE VOLANTE	H ₂ O/ CENERE VOLANTE	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
0,8	3,2	1,0	2,3	0,8	3,3	1,9

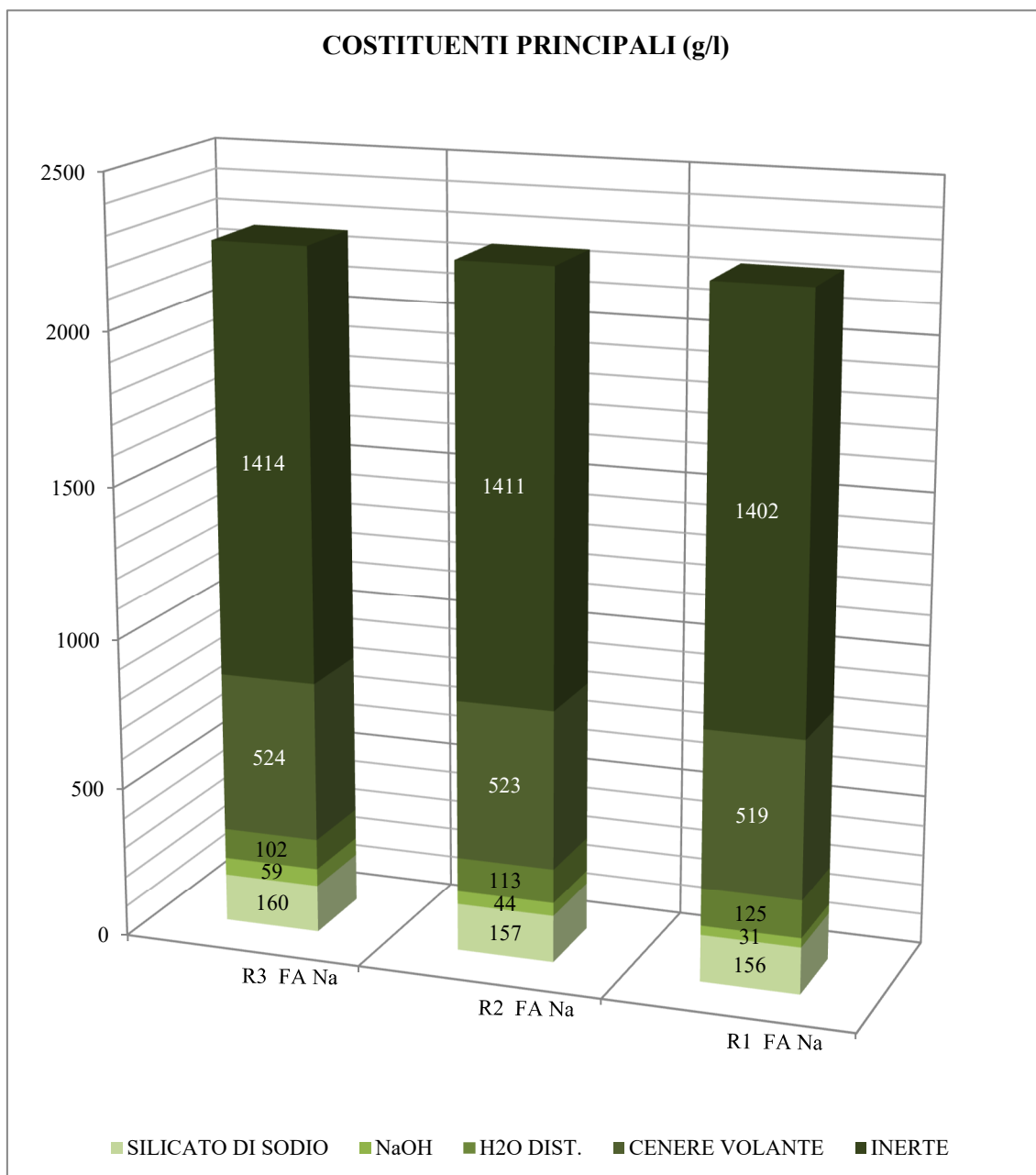


Figura 14 Malte in cenere volante, costituenti principali

Le malte in cenere volante, cemento alluminoso e KOH in soluzione alcalina, a differenza delle malte in metacaolino, richiedono, a parità di classe di resistenza, soluzioni di idrossido di potassio maggiormente concentrate.

Il rapporto tra inerte e alluminosilicato viene mantenuto, come per le altre sperimentazioni, costante e pari a 2,7, il rapporto tra le quantità in massa della soluzione alcalina e della polvere alluminosilicatica è stata modificata nella malta a più alta concentrazione di KOH (ovvero la malta di classe R3). Questo per evitare l'eventuale scarsa lavorabilità conseguente alla maggior densità della fase liquida. Tale rapporto è stato, perciò, portato dallo 0,6 utilizzato per le altre malte in cenere volante, a 0,7.

Successivamente all'impasto dei relativi materiali, le malte in cenere volante, cemento alluminoso e soluzione di KOH hanno dimostrato fluidità e lavorabilità idonea già nei primi istanti di miscelazione. Non sono state, dunque, necessarie ulteriori aggiunte di acqua durante la fase di getto.

Il tempo di miscelazione necessario per l'impasto di ciascuna delle tre malte in cenere volante, cemento alluminoso e potassa caustica è pari a 2 minuti circa.

Il dosaggio dei vari materiali, i rapporti di peso e di volume, e la composizione in macro-componenti delle tre malte sono riportati in seguito (Figura 15, Tabelle 21-29).

Tabella 21 Dosaggio dei componenti di R1 FAK

R1 FAK

	SOLUZIONE ALCALINA					CENER E VOLAN TE	CEME NTO ALLU MINO SO	INERTE (SSA 2%)	H ₂ O AGGIU NTA	
	SILICATO DI SODIO (Na ₂ SiO ₃)			SOLUZIONE KOH (50%)						H ₂ O DIST.
	SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	KOH	H ₂ O					
DENSITA' ρ (g/cm ³)	1,5			2,0	1,0	1,0	2,3	3,3	2,7	1,0
PESO (g)	150			60		90	460	40	1350	0
	45	22	83	30	30					
VOLUME (cm ³)	97			15	30	90	204	12	509	0
g/l (INERTE SSA)	157			31	31	94	480	42	1409	
g/l MISCELA FINALE	157			31	31	94	480	42	1409	
g x 6,5 LITRI	1017			203	203	610	3120	271	9157	0

Tabella 22 Rapporti di peso relativi a R1 FAK

RAPPORTI DI PESO (g/g)							
Na ₂ SiO ₃ / Sol. KOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA / CENERE VOLANTE	INERTE/ CENERE VOLANTE	H ₂ O/ CENERE VOLANTE	C. ALLUMINOSO/CENERE VOLANTE	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
1,0	2,1	0,6	2,7	0,4	0,1	1,7	1,1

Tabella 23 Rapporti di volume relativi a R1 FAK

RAPPORTI DI VOLUME (cm ³ /cm ³)							
Na ₂ SiO ₃ / Sol. KOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA / CENERE VOLANTE	INERTE/ CENERE VOLANTE	H ₂ O/ CENERE VOLANTE	C. ALLUMINOSO/CENERE VOLANTE	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
0,7	4,5	1,1	2,5	1,8	0,1	2,7	1,4

Tabella 24 Dosaggio dei componenti di R2 FAK

R2 FAK

	SOLUZIONE ALCALINA					CENER E VOLAN TE	CEME NTO ALLU MINO SO	INERTE (SSA 2%)	H ₂ O AGGI UNT A	
	SILICATO DI SODIO (Na ₂ SiO ₃)			SOLUZIONE KOH (50%)						H ₂ O DIST.
	SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	KOH	H ₂ O					
DENSITA' ρ (g/cm ³)	1,5			2,0	1,0	1,0	2,3	3,3	2,7	1,0
PESO (g)	150			100		50	460	40	1350	0
	45	22	83	50	50					
VOLUME (cm ³)	97			25	50	50	204	12	509	
g/l (INERTE SSA)	158			53	53	53	485	42	1424	
g/l MISCELA FINALE	158			53	53	53	485	42	1424	
g x 6,5 LITRI	1028			343	343	343	3154	274	9255	0

Tabella 25 Rapporti di peso relativi a R2 FAK

RAPPORTI DI PESO (g/g)							
Na ₂ SiO ₃ / Sol. KOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA / CENERE VOLANTE	INERTE/ CENERE VOLANTE	H ₂ O/ CENERE VOLANTE	C. ALLUMINOSO/CENERE VOLANTE	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
1,0	1,6	0,6	2,7	0,4	0,1	1,7	1,1

Tabella 26 Rapporti di volume relativi a R2 FAK

RAPPORTI DI VOLUME (cm ³ /cm ³)							
Na ₂ SiO ₃ / Sol. KOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA / CENERE VOLANTE	INERTE/ CENERE VOLANTE	H ₂ O/ CENERE VOLANTE	C. ALLUMINOSO/CENERE VOLANTE	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
0,8	3,4	1,1	2,5	2,3	0,1	2,7	1,4

Tabella 27 Dosaggio dei componenti di R3 FAK

R3 FAK										
	SOLUZIONE ALCALINA					CENERE VOLANTE	CEMENTO ALLUMINOSO	INERTE (SSA 2%)	H ₂ O AGGIUNTA	
	SILICATO DI SODIO (Na ₂ SiO ₃)			SOLUZIONE KOH (50%)						H ₂ O DIST.
	SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	KOH	H ₂ O					
DENSITA' ρ (g/cm ³)	1,5			2,0	1,0	1,0	2,3	3,3	2,7	1,0
PESO (g)	170			170		0	460	40	1350	0
	51	25	94	85	85					
VOLUME (cm ³)	110			42	85	0	204	12	509	0
g/l (INERTE SSA)	176			88	88	0	478	42	1402	
g/l MISCELA FINALE	176			88	88	0	478	42	1402	
g x 6,5 LITRI	1147			574	574	0	3104	274	9110	0

Tabella 28 Rapporti di peso relativi a R3 FAK

RAPPORTI DI PESO (g/g)							
Na ₂ SiO ₃ / Sol. KOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA / CENERE VOLANTE	INERTE/ CENERE VOLANTE	H ₂ O/ CENERE VOLANTE	C. ALLUMINOSO/CENERE VOLANTE	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
1,0	1,1	0,7	2,7	0,4	0,1	1,7	1,1

Tabella 29 Rapporti di volume relativi a R3 FAK

RAPPORTI DI VOLUME (cm ³ /cm ³)							
Na ₂ SiO ₃ / Sol. KOH	H ₂ O/ SOLIDI	SOL. ALCALINA / CENERE VOLANTE	INERTE/ CENERE VOLANTE	H ₂ O/ CENERE VOLANTE	C. ALLUMINOSO/CENERE VOLANTE	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Si/Al
0,9	2,4	1,2	2,5	3,3	0,1	2,7	1,5

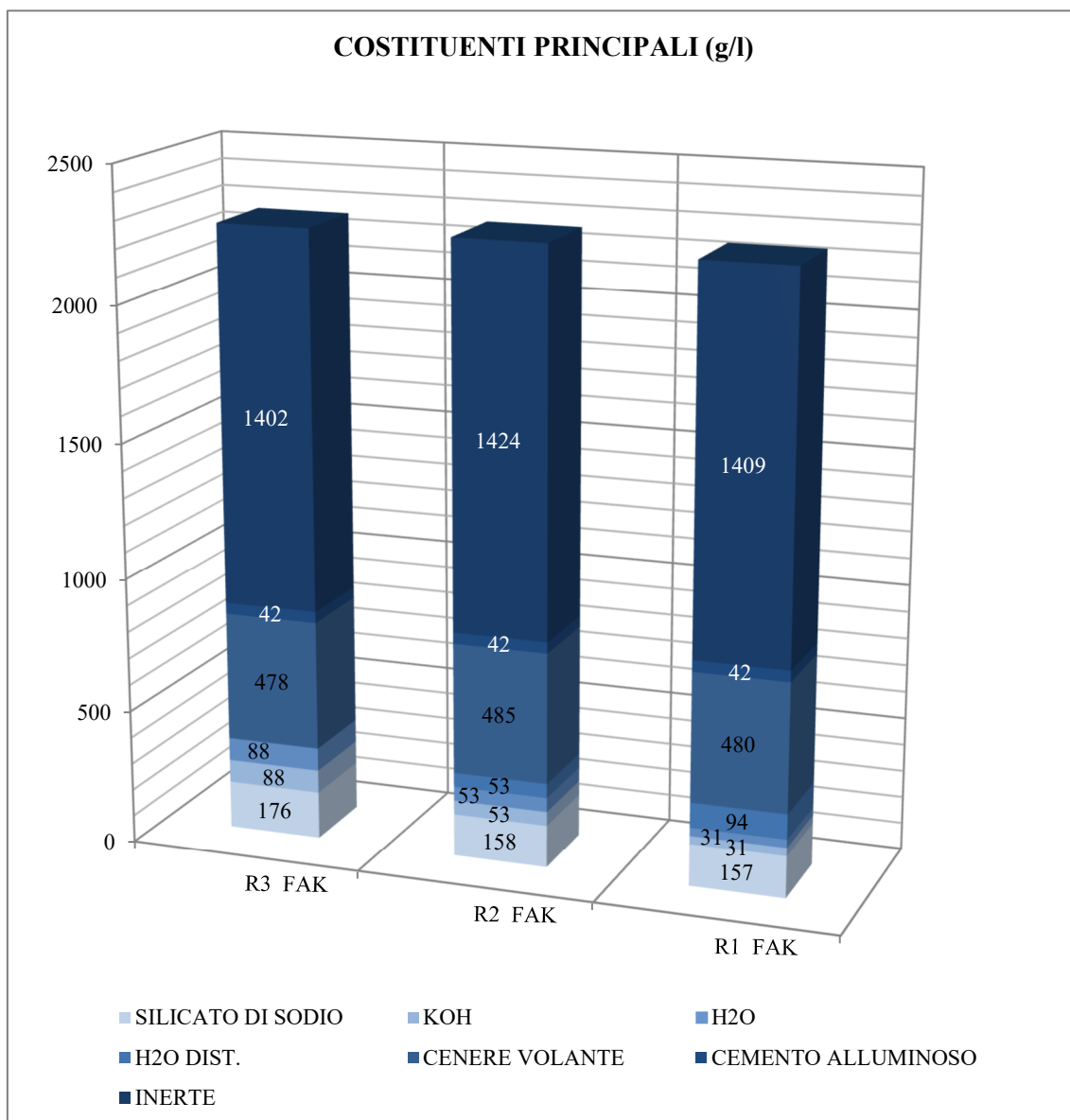


Figura 15 Malte in cenere volante e cemento alluminoso, costituenti principali

4.2.2 Le malte cementizie

Nelle malte geopolimeriche finora analizzate sono stati ottenuti impasti di differenti caratteristiche agendo sulla composizione chimica della soluzione alcalina, mentre per le malte in cemento Portland e calce idraulica è stato modificato il rapporto in massa tra i due leganti utilizzati.

Sono state, perciò, ottenute malte di classe R1, R2 e R3 semplicemente modificando il rapporto calce/cemento da 0 a 4.

Il rapporto acqua/legante gioca, pertanto, un ruolo secondario nella caratterizzazione degli impasti. L'apporto di acqua in fase di getto è, in questo caso, puramente mirato all'ottenimento di caratteristiche di lavorabilità rientranti nella classificazione prevista dalla norma UNI EN 1015-6. La miscelazione delle malte cementizie è avvenuta mediante una graduale aggiunta di acqua di impasto all'interno del composto, e verificando, a intervalli, la lavorabilità del preparato tramite l'utilizzo della tavola a scosse. Al raggiungimento dello spandimento desiderato non sono state aggiunte ulteriori dosi di acqua all'impasto, e si è proceduto al getto dello stesso all'interno dei casseri di formatura.

Il dosaggio dei vari materiali e i rapporti di peso e di volume delle tre malte relativi a 1 litro di impasto sono riportati di seguito (Figura 16, Tabelle30-35).

Tabella 30 Dosaggio dei componenti di R1 CEM

R1 CEM				
	LEGANTE		H ₂ O	INERTE
	CEMENTO	CALCE IDRAULICA		
DENSITA' ρ (g/cm ³)	3,1	3,1	1,0	2,7
PESO (g)	102	408	134	1630
PESO (g) (S. SSA)	102	408	253	1511
VOLUME (cm ³)	33	132	253	570
g/l (S. SSA)	103	413	256	1530
g/l (S. UMIDA)	103	413	134	1652
g GETTO FINALE	664	2654	941	10595

Tabella 31 Rapporti di peso e di volume relativi a R1 CEM

RAPPORTI DI PESO (g/g)			RAPPORTI DI VOLUME (cm ³ /cm ³)		
CALCE/CEMENTO	INERTE/LEGANTE	H ₂ O/LEGANTE	CALCE/CEMENTO	INERTE/LEGANTE	H ₂ O/LEGANTE
4,0	3,0	0,5	4,0	3,5	1,5

Tabella 32 Dosaggio dei componenti di R2 CEM

R2 CEM				
	LEGANTE		H ₂ O	INERTE
	CEMENTO	CALCE IDRAULICA		
DENSITA' ρ (g/cm ³)	3,1	3,1	1,0	2,7
PESO (g)	255	255	210	1573
PESO (g) (S. SSA)	255	255	325	1459
VOLUME (cm ³)	82	82	325	550
g/l (S. SSA)	246	246	312	1402
g/l (S. UMIDA)	246	246	200	1515
g GETTO FINALE	1660	1660	1473	10225

Tabella 33 Rapporti di peso e di volume relativi a R2 CEM

RAPPORTI DI PESO (g/g)			RAPPORTI DI VOLUME (cm ³ /cm ³)		
CALCE/ CEMENTO	INERTE/ LEGANTE	H ₂ O/ LEGANTE	CALCE/ CEMENTO	INERTE/ LEGANTE	H ₂ O/ LEGANTE
1,0	2,9	0,6	1,0	3,3	2,0

Tabella 34 Dosaggio dei componenti di R3 CEM

R3 CEM

	LEGANTE		H ₂ O	INERTE
	CEMENTO	CALCE IDRAULICA		
DENSITA' ρ (g/cm ³)	3,1	3,1	1,0	2,7
PESO (g)	475	0	215	1461
PESO (g) (S. SSA)	475	0	321	1355
VOLUME (cm ³)	153	0	321	511
g/l (S. SSA)	482	0	326	1375
g/l (S. UMIDA)	482	0	216	1485
g GETTO FINALE	3087	0	1504	9497

Tabella 35 Rapporti di peso e di volume relativi a R3 CEM

RAPPORTI DI PESO (g/g)			RAPPORTI DI VOLUME (cm ³ /cm ³)		
CALCE/ CEMENTO	INERTE/ LEGANTE	H ₂ O/ LEGANTE	CALCE/ CEMENTO	INERTE/ LEGANTE	H ₂ O/ LEGANTE
0	2,9	0,7	0	3,3	2,1

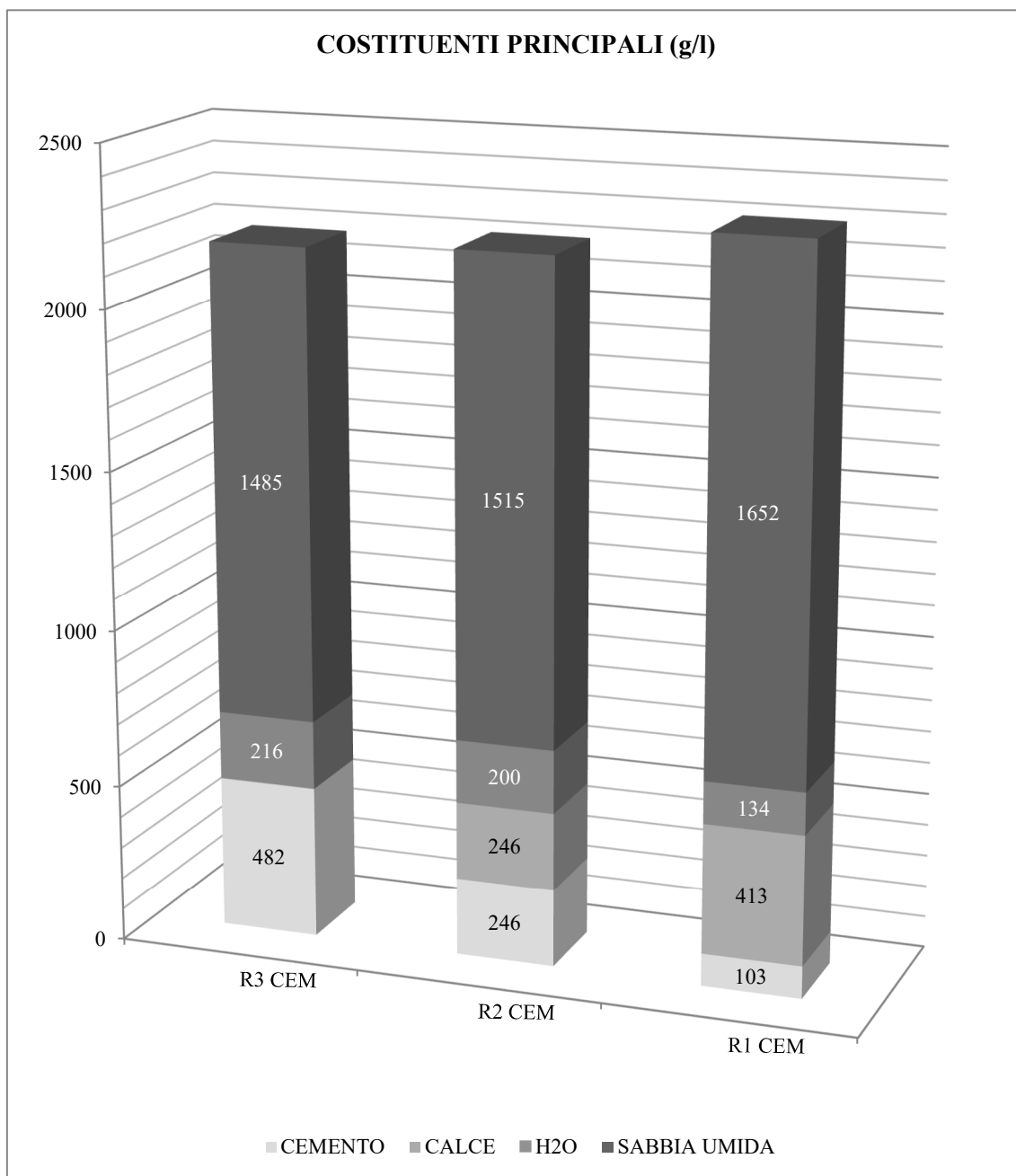


Figura 16 Malte in cemento, costituenti principali.

4.3 Fasi di preparazione impasti

Il procedimento per ottenere l'impasto delle malte geopolimeriche comprende 2 momenti: le fasi preliminari e l'esecuzione del getto.

Per quanto riguarda le fasi preliminari; sono state definite tre fasi preliminari coinvolte nella realizzazione di questa tipologia di malte, ovvero:

- la miscelazione della soluzione alcalina;
- la preparazione della sabbia satura a superficie asciutta (SSA);
- il rivestimento dei casseri di campionatura.

La realizzazione delle soluzioni alcaline è stata effettuata uno o più giorni prima dell'effettuazione del getto, così da lasciarne i componenti in fase di dissoluzione almeno per 24 ore (come da letteratura^{21,22}). In questa fase si prefissano delle miscele di quantità di silicato di sodio e di acqua distillata (non sempre presente), a cui sono state poi aggiunte determinate dosi di idrossidi di sodio o di potassio a causa di ciò, nelle soluzioni si verifica una reazione fortemente esotermica, protrattasi fino a quando gli idrossidi non hanno raggiunto un adeguato livello di dissoluzione. Le soluzioni così ottenute sono state mescolate fino alla fine della reazione esotermica.

Successivamente, i flaconi contenenti le soluzioni sono stati sigillati con tappi e controtappi, per evitare, oltre alla fuoriuscita del prodotto, eventuali alterazioni provocate dall'ambiente esterno.

La preparazione della sabbia satura a superficie asciutta utilizzata nell'impasto delle malte geopolimeriche è avvenuta aggiungendo alla sabbia secca (ovvero essiccata in forno a ventilazione forzata) il 2% del suo peso in acqua. Questo procedimento è stato eseguito 24 ore prima del getto, così da permettere alla sabbia secca di assorbire completamente il quantitativo di acqua in essa versata. Questo permette, in fase di getto, che la saturazione della sabbia impedisca l'assorbimento dell'acqua contenuta nella soluzione alcalina destinata alla reazione, e, allo stesso tempo, impedisca di aggiungere ulteriore acqua all'impasto.

²¹ D. Hardjito, S.E.Wallah, B.V. Rangan. "*Research into engineering properties of geopolymer concrete*". International Conference Geopolymer 2002. Melbourne, Australia. (2002)

²² J. Davidovits. "*30 years of success and failures in geopolymer application*". Geopolymer 2002 Conference. Melbourne, Australia. 1-15. (2002).

I casseri destinati alla campionatura di tali malte, sono stati confezionati tramite un processo di preventivo rivestimento degli stessi. I casseri in acciaio (ovvero quelli destinati al confezionamento dei provini per il collaudo meccanico) sono stati, perciò, avvolti con materiali glabri quali pellicole in idrato di cellulosa o nastri adesivi isolanti (Figura 17).



Figura 17 Cassero di formatura 40x40x160 mm a incastro rivestito con nastro adesivo

Questo accorgimento è stato effettuato allo scopo di diminuire l'adesione tra malta geopolimerica e acciaio che si sviluppava durante il periodo di stagionatura, e agevolare, perciò, lo scassamento dei provini realizzati, poiché da studi precedenti si è visto che il disarmante utilizzato normalmente per scassare le malte cementizie non ha effetto per quelle geopolimeriche. Una volta completate le tre fasi preliminari sopra descritte, si è proceduto all'esecuzione del getto vero e proprio delle malte geopolimeriche.

In un recipiente in plastica di adeguate dimensioni sono state versate, e successivamente mescolate, la polvere alluminosilicatica e la sabbia SSA. Una volta ottenuto un composto uniforme, è stata aggiunta gradualmente la soluzione alcalina, e si è iniziato a mescolare l'impasto con l'ausilio di un trapano miscelatore (Figura 18).



Figura 18 Impasto geopolimerico a base di cenere volante ottenuto dopo la miscelazione con un trapano

Riguardo ai tempi di miscelazione il tempo varia a seconda dell'alluminosilicato utilizzato. Il metacaolino, a causa della propria superficie specifica, ha richiesto di un tempo maggiore di miscelazione variabile tra i 3 minuti e i 5 minuti circa, al fine di ottenere un prodotto sufficientemente fluido.

Mentre per la cenere volante, contrariamente, sono stati sufficienti 2 minuti circa di miscelazione, tenendo anche conto della presa piuttosto rapida che caratterizza questa polvere legante. L'impasto è stato mescolato fino ad ottenere un composto dall'aspetto uniforme e adeguatamente lavorabile.

L'impasto ottenuto è stato poi versato negli appositi casseri per la campionatura, in seguito scossi manualmente in modo da costipare la malta e ridurre il più possibile la presenza di aria al suo interno.

Infine, la superficie dei casseri è stata rasata in modo da rimuovere la malta in eccesso e ottenere provini di dimensioni uniformi (Figura 19).



Figura 19 Malta in cemento nel cassero di formatura

Invece per l'impasto delle malte cementizie, il procedimento utilizzato per le malte in cemento Portland e calce idraulica si presenta, in gran parte, simile a quello già visto per le malte geopolimeriche.

Tuttavia, in questa fase della sperimentazione, non è stato necessario effettuare le tre fasi preliminari viste per le altre tipologie di malta, in quanto:

- l'efficacia dell'additivo disarmante sugli impasti in cemento Portland non ha reso necessario il rivestimento dei casseri con pellicola di cellulosa.
- per la preparazione di tali impasti è stata utilizzata sabbia umida (ovvero l'inerte allo stato in cui viene acquistato dal rivenditore e pari al 10% di umidità) al posto della sabbia SSA, e il mix design è stato poi corretto tenendo conto dell'acqua in eccesso presente nella sabbia.
- la reazione di indurimento delle malte in leganti idraulici necessita di semplice acqua.

Per il getto delle malte in cemento e calce, sono state (come per le malte geopolimeriche) mescolate le polveri reagenti insieme alla sabbia umida, fino a ottenere un impasto dall'aspetto uniforme.

In seguito, è stata aggiunta acqua in quantità tale da fornire al composto uno spandimento compreso tra i 120 e i 140 mm dopo 15 colpi alla tavola a scosse secondo la UNI EN 1015-3.

La miscelazione è stata effettuata sempre aiutandosi con un trapano miscelatore, per il tempo necessario per ottenere una miscela ben amalgamata e uniforme.

La malta così ottenuta è stata poi versata e compattata tramite vibrazione manuale nei casseri precedentemente rivestiti da un sottile strato di additivo disarmante, così da facilitare il successivo scasseramento dei campioni.

4.4 Campionatura e stagionatura

Per ottenere campioni idonei alle diverse fasi di sperimentazione delle malte realizzate, sono stati utilizzati casseri di diverse tipologie e dimensioni, sempre nel rispetto delle normative europee vigenti.

Per ogni classe di resistenza di ciascuna delle tipologie di malte analizzate, sono stati prodotti:

- n. 6 provini prismatici di dimensione 40x40x160 mm;
- n. 3 provini cubici di dimensione 100x100x100 mm;
- n. 5 provini cilindrici di 50 mm di diametro e 10 mm di altezza;
- n. 1 provino cilindrico di 140 mm di diametro e 30 mm di altezza;
- n. 1 provino cilindrico di 115 mm di diametro e 125 mm di altezza.

Per la formatura dei provini prismatici di dimensione 40x40x160 mm sono stati utilizzati casseri in acciaio da tre provini (di volume complessivo di malta pari a 768 cm³) montati tramite serraggio a incastro (Figura 17).

Tramite tale tipologia di campionatura verranno analizzati:

- le resistenze meccaniche a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura secondo la UNI EN 1015-11 (6 provini);
- il modulo elastico dinamico mediante determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura secondo la UNI EN 12504-4.

Riguardo ai blocchi di calcestruzzo e forme per provini cilindrici di 50 mm di diametro e 10 mm di altezza, per determinare le proprietà di aderenza delle malte ai supporti, secondo la UNI EN 1015-12 sono stati realizzati provini cilindrici di malta di 50 mm di diametro e 10 mm di altezza posti su blocchi di calcestruzzo di dimensioni 150x150x150 mm. Tali provini sono stati formati tramite anelli ottenuti da tubi in cloruro di polivinile opportunamente tagliati (Figura 20).



Figura 20 Blocchi in calcestruzzo in cui sono stati gettati i campioni per le prove di aderenza

Per ogni classe di ciascuna delle tipologie di malta analizzate, sono stati gettati 5 campioni su 3 diversi basi di calcestruzzo. I blocchi utilizzati sono stati precedentemente immersi in acqua per un tempo approssimativo di 24 ore, così da saturarli e fare in modo che non sottraessero acqua al composto

fresco e lasciati poi all'aria per circa un'ora al fine di eliminare l'acqua in eccesso sulla superficie del blocco.

Riguardo alle forme per provini cilindrici di 140 mm di diametro e 30 mm di altezza, per la determinazione della conducibilità termica delle malte secondo la UNI EN 1015-19 sono stati realizzati provini cilindrici di 140 mm di diametro e 30 mm di altezza versando la malta in anelli ricavati da tubi in cloruro di polivinile delle dovute dimensioni opportunamente tagliati (Figura 21).



Figura 21 Anelli di formatura in PVC su supporto in alluminio

Tali forme sono state collocate e fissate su dei supporti metallici in alluminio di superficie regolare, a loro volta rivestiti in pellicola di cellulosa, per evitare il contatto tra la malta e la superficie metallica.

Per i provini cubici di misura 100x100x100 mm, sono stati utilizzati casseri di plastica per 3 provini (Figura 22), in cui è stato versato l'impasto delle malte e successivamente è stato rasato l'impasto in eccesso per avere una forma regolare ed è stato avvolto con pellicola di cellulosa, pronto per la stagionatura (2 giorni avvolti con il cassero e 5 giorni avvolti singolarmente

una volta scasserati. Infine nei 21 giorni successivi sono stati spostati in una camera climatizzata a temperatura compresa tra i 18 e i 22 °C).

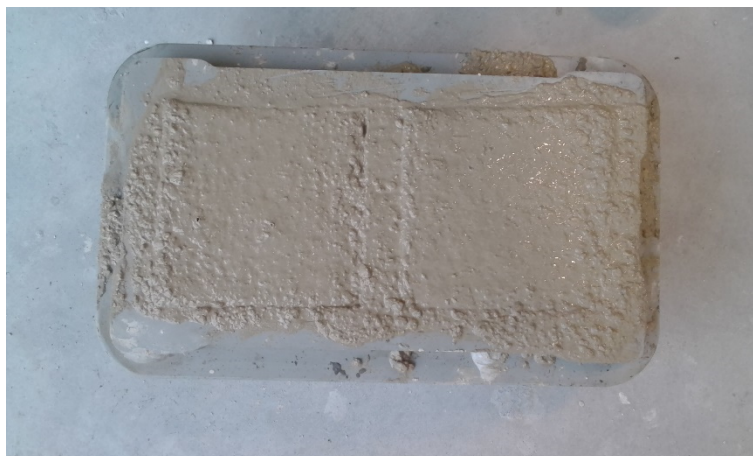


Figura 22 Malta in cemento nel cassero di plastica per la formatura dei provini 100x100x100 mm

Riguardo alle modalità di conservazione e di stagionatura dei provini realizzati, sono state seguite le indicazioni riportate nelle stesse normative europee sopra elencate, a seconda delle differenti prove da applicare ai differenti campioni.

In generale esse prevedono, per le malte ottenute da leganti idraulici e per le malte bastarde ad alto contenuto di legante idraulico, la conservazione dei provini in condizioni di umidità relativa del $95\% \pm 5\%$, e alla temperatura di $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ per i primi 7 giorni di stagionatura dell'impasto.

Le normative che regolano la determinazione delle resistenze meccaniche prevedono la conservazione dei provini alle condizioni sopra riportate all'interno dei casseri utilizzati per la formatura per un tempo di 2 giorni, e la conservazione per ulteriori 5 giorni alle stesse condizioni una volta rimossi i casseri.

I casseri e le forme contenenti le malte appena gettate sono stati perciò avvolti con pellicola di cellulosa, così da mantenere i provini a una umidità

relativa del 100%, e posti all'interno di una camera climatizzata a temperatura pari a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (Figura 23).



Figura 23 Camera climatizzata e pannello regolatore

Dopo 48 ore dall'esecuzione dei getti, i provini sono stati rimossi dai casseri e dalle forme, e ulteriormente avvolti in pellicola, per mantenere l'umidità relativa al 100%, e così conservati in camera climatizzata per i 5 giorni successivi.

A 7 giorni dall'esecuzione del getto, è stata rimossa la pellicola avvolgente i provini, i quali sono stati conservati in cella climatizzata a un'umidità relativa del $50\% \pm 5\%$ per i 21 giorni di maturazione successivi.

Capitolo 5

Stato fresco dei materiali trattati

5.1 Introduzione

Le malte idrauliche, per risultare efficacemente utilizzabili nelle molteplici applicazioni dell'edilizia, devono possedere, allo stato fresco, una lavorabilità tale da permettere la loro applicazione sul manufatto per cui vengono utilizzate.

La diretta conseguenza di una buona lavorabilità delle malte idrauliche è la capacità di compattarsi tramite vibrazione; ciò influenza le proprietà che compongono il prodotto indurito finale. In particolare, le proprietà compositive sono influenzate fortemente dalle porosità presenti nel composto indurito, a causa dell'aria che si imprigiona all'interno dell'impasto. Dunque, una malta lavorabile dona così:

- una maggiore densità e un minor contenuto di porosità all'interno della malta indurita.
- una migliore compattazione.
- una migliore fuoriuscita di aria dall'impasto fresco, quando compresso tramite vibrazione.

La determinazione della lavorabilità e le caratteristiche delle malte analizzate verranno approfondite nei paragrafi successivi tramite la spiegazione dei metodi di misurazione: lo spandimento e il calcolo della consistenza.

5.2 Lavorabilità

Il metodo utilizzato è lo slump test ossia la prova di spandimento, in particolare è stata usata la prova di spandimento alla tavola a scosse che è un metodo usato per determinare la consistenza della malta fresca.

In questa prova, il campione di malta fresca è stato stipato all'interno di un tronco di cono metallico di 60 mm di altezza, 70 mm di diametro superiore e 100 mm di diametro inferiore, in cui si è cercato il più possibile di eliminare i vuoti presenti all'interno del provino.

Il campione successivamente è stato messo su una superficie a forma di cerchio in vetro del diametro di 300 ± 1 mm, posizionata su una tavola a scosse. Una volta rimossa la forma metallica, il campione di malta è stato sottoposto a 15 colpi verticali della frequenza di un colpo a secondo e successivamente è stato misurato il diametro espanso alla base (Figura 24).



Figura 24 Tavola a scosse per slump test con forma metallica troncoconica

Lo spandimento oggetto di questa ricerca si è ottenuto dalla misura del diametro del campione di malta dopo 15 scosse nello slump test.

Lo spandimento è regolato dalle norme UNI EN 1015-6 e 1015-3.

La norma UNI EN 1015-6 regola lo spandimento massimo ammesso dalle malte e prevede differenti intervalli di misura; questi intervalli variano in base alle malte che si analizzano, ossia malte rigide, malte plastiche e malte leggere.

Le malte analizzate in questa tesi rientrano nella prima categoria delle malte rigide, per cui è previsto un diametro di malta spansa compreso tra i 120 mm e i 140 mm e malte plastiche, per cui è previsto un diametro di malta spansa compreso tra i 140 mm e i 210 mm.

La norma UNI EN 1015-3 riporta anche dei criteri per il calcolo della consistenza percentuale delle malte allo stato fresco. Questo parametro viene utilizzato sia come misura della fluidità e dell'umidità della malta fresca, sia per stimare la deformabilità della stessa malta quando è sottoposta a determinati tipi di stress.

La consistenza si presenta come l'entità del valore dello spandimento ottenuto tramite lo slump test espresso in percentuale rispetto al diametro iniziale della malta formata all'interno del tronco di cono (100 mm), ovvero:

$$\text{Consistenza\%} = \frac{(d_f - d_i)}{d_i} \times 100$$

dove: d_f indica il diametro finale alla base del campione di malta dopo 15 scosse allo slump; d_i indica il diametro iniziale del campione troncoconico di malta (100 mm). Da questo si capisce come, per rientrare nell'intervallo ammesso dalla normativa europea, una malta rigida deve possedere una consistenza percentuale compresa tra il 20% e il 40% mentre quella plastica tra il 40% e il 110%.

Per quanto riguarda la lavorabilità, nel procedimento descritto sopra, la lavorabilità delle malte cementizie si è presentata di fondamentale importanza per la sperimentazione delle malte confezionate in leganti

idraulici tradizionali. Questa tipologia di impasti ha una composizione che si basa sul raggiungimento di una determinata misura di spandimento e a tale scopo è stato modificato il quantitativo di acqua dei relativi mix progettati. Una volta fissato il mix design relativo alla tipologia e alla quantità di leganti idraulici utilizzati (ovvero il rapporto calce idraulica/cemento Portland) è stata successivamente decisa la lavorabilità necessaria al raggiungimento di una determinata classe di resistenza, e, di conseguenza, il rapporto acqua/legante caratteristico dell'impasto.

Le misure dello spandimento e della relativa consistenza stabilite per le malte cementizie sono riportate in seguito (Tabella 36, Figura 25).

Tabella 36 Spandimento e consistenza percentuale nelle malte cementizie.

	DIAMETRO		SPANDIMENTO (mm)	CONSISTENZA (%)
	SLUMP A 0 COLPI (mm)	SLUMP A 15 COLPI (mm)		
R1 CEM	100	120	20	20
R2 CEM	100	125	25	25
R3 CEM	100	130	30	30

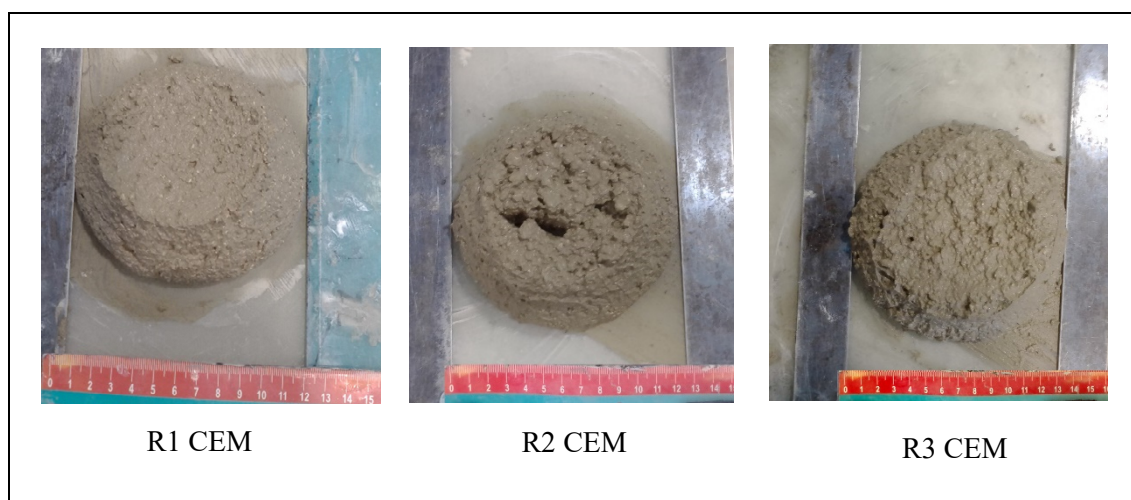


Figura 25 Malte cementizie. Spandimento dopo 15 colpi

Nelle malte geopolimeriche, al contrario, lo studio dello spandimento ottenibile dalla malta tramite lo slump test non rientra nella fase di progettazione del mix design che precede la fase di getto. Le metodologie utilizzate per la stima della lavorabilità tramite il calcolo della consistenza percentuale sono le stesse approfondite nei paragrafi precedenti.

Si nota come le caratteristiche di lavorabilità delle malte geopolimeriche siano fortemente influenzate, oltre che dal quantitativo di fase liquida in esse presenti, anche dalla natura della polvere alluminosilicatica utilizzata.

Parlando delle malte geopolimeriche in caolino calcinato, la loro difficoltà di lavorazione allo stato fresco può senz'altro considerarsi uno degli aspetti più problematici legati alla sperimentazione di questa tipologia di composti. Come già detto nel dettaglio, la notevole superficie specifica caratterizzante la polvere di metacaolino fa sì che tale alluminosilicato richieda quantità di soluzione alcalina maggiore, a parità di polvere reagente, rispetto ad altre polveri utilizzate nella chimica geopolimerica (in particolare, rispetto alla cenere volante).

Nella ricerca eseguita in questa tesi è stato utilizzato il doppio della soluzione alcalina per l'impasto delle malte in metacaolino, rispetto alle malte in cenere volante e nonostante ciò, si è comunque ottenuta una lavorabilità allo stato fresco bassa, anche dopo l'aggiunta di acqua non prevista nella compilazione degli impasti.

Ciò avviene, tuttavia, esclusivamente durante l'impasto di elevati volumi di malta, come i 6,5 litri richiesti dai getti finali delle miscele studiate in questa ricerca. L'impasto di volumetrie inferiori (approssimativamente fino a 3 litri) richiede l'utilizzo di una minore quantità di fase liquida, a parità di lavorabilità del composto, in un rapporto non proporzionale.

Ad ogni modo questa tipologia di malta si presenta propensa allo spandimento in seguito alle sollecitazioni, con consistenze misurate allo

slump test che si attestano nell'ordine dei 60 punti percentuali, e crescenti proporzionalmente al quantitativo di acqua aggiunto in fase di impasto.

Le misure dello spandimento e della relativa consistenza stabilite per le malte a base di metacaolino sono riportate in seguito (Tabella 37, Figura 26).

Tabella 37. Spandimento e consistenza percentuale nelle malte a base di metacaolino

	DIAMETRO		SPANDIMENTO (mm)	CONSISTENZA (%)
	SLUMP A 0 COLPI (mm)	SLUMP A 15 COLPI (mm)		
R1 MKK	110	155	55	55
R2 MKK	110	160	60	60
R3 MKK	110	160	60	60

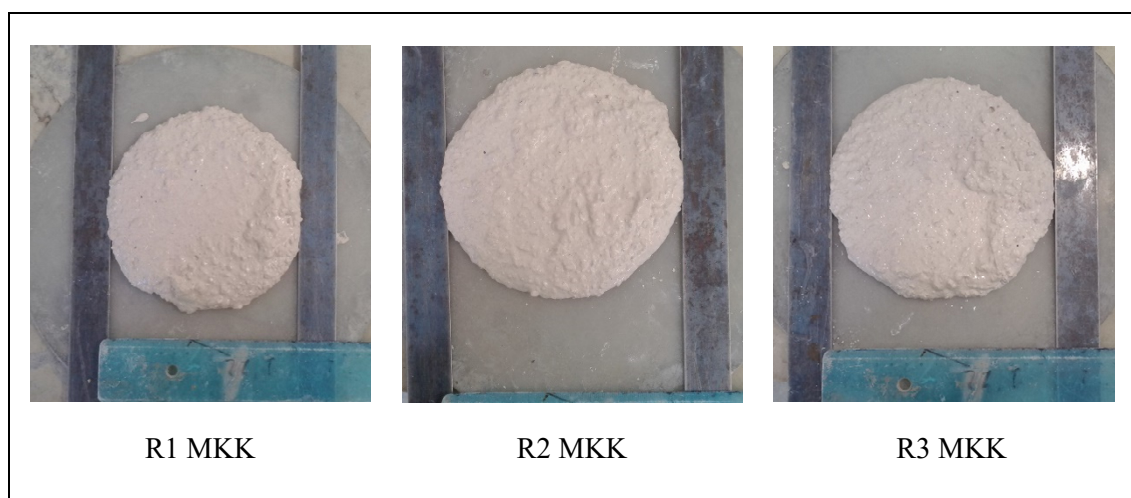


Figura 26 Malte geopolimeriche a base di metacaolino. Spandimento dopo 15 colpi

Negli impasti con cenere volante non si sono presentate problematiche di scarsa lavorabilità. Questo è dovuto alla differente granulometria della polvere di cenere volante, che rispetto a quella della polvere di caolino calcinato è meno fine, alla morfologia delle particelle che sono di forma

sferica e ai loro differenti meccanismi di reazione con la fase liquida di impasto. Per questa classe di malte geopolimeriche si sono ottenuti composti notevolmente fluidi, indipendentemente dal volume di miscela impastata. La fluidità delle malte a base di cenere volante si è dimostrata tale da comportarne un notevole spandimento non appena rimossa la forma metallica troncoconica. Tale fenomeno ha implicato modeste misure di spandimento successive alla fase di stress, dovute al già notevole spandimento iniziale della malta. Le misure dello spandimento e della relativa consistenza stabilite per le malte a base di cenere volante sono riportate in seguito (Tabella 38, Figura 27).

Tabella 38 Spandimento e consistenza percentuale nelle malte a base di cenere volante

	DIAMETRO		SPANDIMENTO (mm)	CONSISTENZA (%)
	SLUMP A 0 COLPI (mm)	SLUMP A 15 COLPI (mm)		
R1 FANa	170	200	100	100
R2 FANa	120	170	70	70
R3 FANa	120	160	60	60

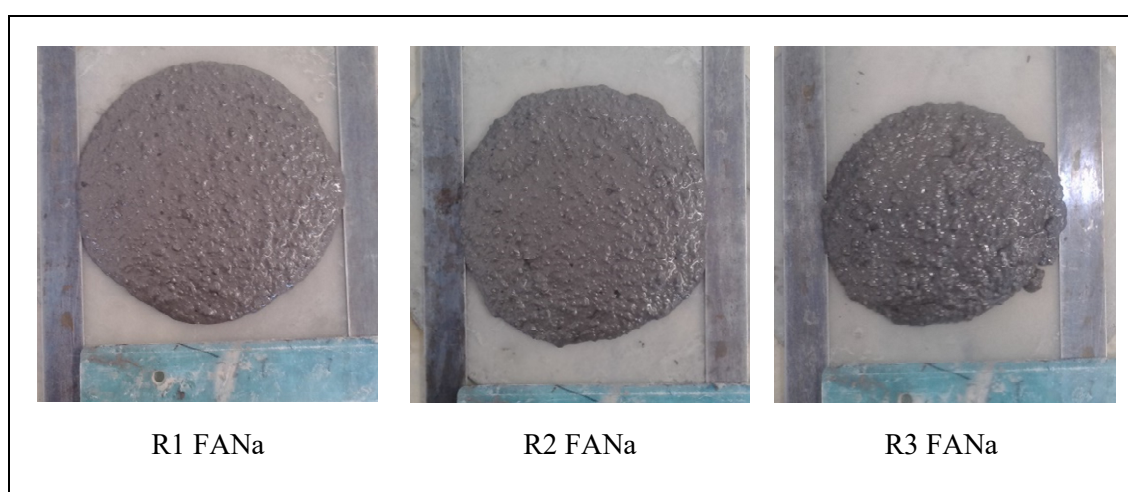


Figura 27 Malte geopolimeriche a base di cenere volante. Spandimento dopo 15 colpi

Le malte in cenere volante, cemento alluminoso e KOH in soluzione alcalina hanno un comportamento che allo stato fresco non si discosta da quello delle loro controparti in cenere volante e NaOH in soluzione.

Anche questi tipi di malte hanno mostrato una fluidità notevole, successivamente alla fase di miscelazione, che comporta spandimenti elevati nei momenti successivi alla rimozione della forma troncoconica precedente allo slump test.

La capacità di spandimento delle malte in cenere volante e cemento alluminoso si mostra inversamente proporzionale al quantitativo di soluzione alcalina presente nella miscela. La malta di classe R3 presenta uno spandimento maggiore, dovuto alla maggiore presenza di fase liquida contenuta al suo interno (il rapporto soluzione alcalina/legante è pari a 0,7 nella malta di classe R3, rispetto allo 0,6 delle malte R1 e R2).

In questa tipologia di composti un maggior quantitativo di acqua all'interno della miscela conduce a maggiori spandimenti e maggiori consistenze percentuali. Le misure dello spandimento e della relativa consistenza stabilite per le malte a base di cenere volante e cemento alluminoso sono riportate in seguito (Tabelle 39, Figura 28).

Tabella 39 Spandimento e consistenza percentuale nelle malte in cenere volante e cemento alluminoso

	DIAMETRO		SPANDIMENTO (mm)	CONSISTENZA (%)
	SLUMP A 0 COLPI (mm)	SLUMP A 15 COLPI (mm)		
R1 FAK	180	210	110	110
R2 FAK	150	190	90	90
R3 FAK	145	180	80	80

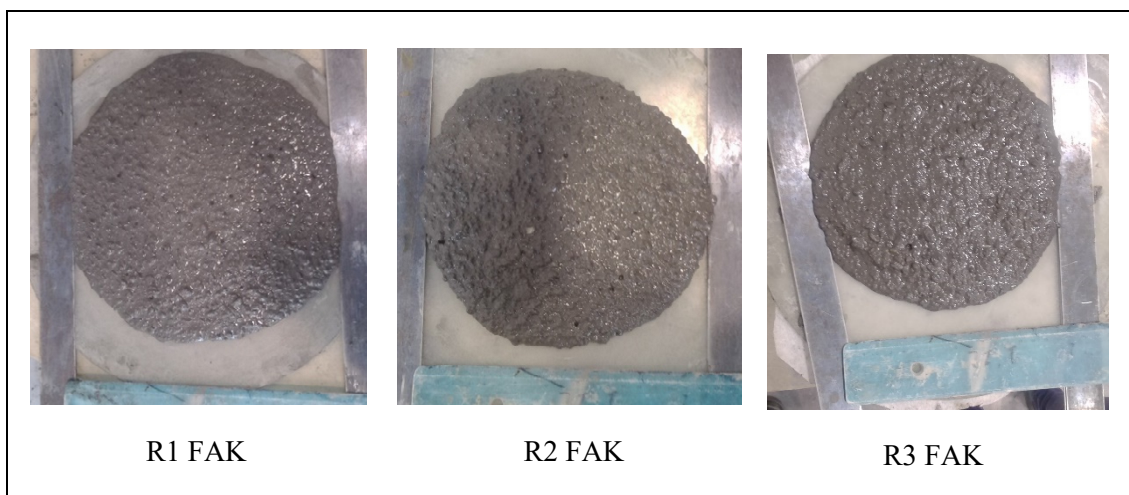


Figura 28 Malte geopolimeriche a base di cenere volante e cemento alluminoso. Spandimento dopo 15 colpi

5.3 Confronto e considerazioni finali

Dalle ricerche condotte in questa tesi relative alle caratteristiche di lavorabilità allo stato fresco, per quanto riguarda la consistenza, si può affermare che:

- Le malte geopolimeriche presentano consistenze maggiori rispetto alle malte cementizie a parità di classe di resistenza (Figura 29).
- Le malte geopolimeriche in metacaolino presentano consistenze percentuali crescenti proporzionalmente al quantitativo di acqua aggiunta in fase di getto.
- Le malte geopolimeriche in metacaolino, nonostante si presentino meno lavorabili delle malte cementizie, manifestano spandimenti maggiori rispetto alle malte in cemento e calce quando sottoposte a sollecitazioni (come le scosse verticali nello slump test).
- Le malte in cenere volante mostrano spandimenti e consistenze percentuali proporzionali al quantitativo di acqua presente all'interno nella miscela o proporzionali al quantitativo di soluzione alcalina, nel caso delle malte in cenere volante e KOH (Tabella 40, Figure 29-30).

Tabella 40 Consistenza allo stato fresco nelle malte cementizie e geopolimeriche

	DIAMETRO		SPANDIMENTO (mm)	CONSISTENZA (%)
	SLUMP A 0 COLPI (mm)	SLUMP A 15 COLPI (mm)		
R1 CEM	100	120	20	20
R2 CEM	100	125	25	25
R3 CEM	100	130	30	30
R1 MKK	110	155	55	55
R2 MKK	110	160	60	60
R3 MKK	110	160	60	60
R1 FANa	170	200	100	100
R2 FANa	120	170	70	70
R3 FANa	120	160	60	60
R1 FAK	180	210	110	110
R2 FAK	150	190	90	90
R3 FAK	145	180	80	80

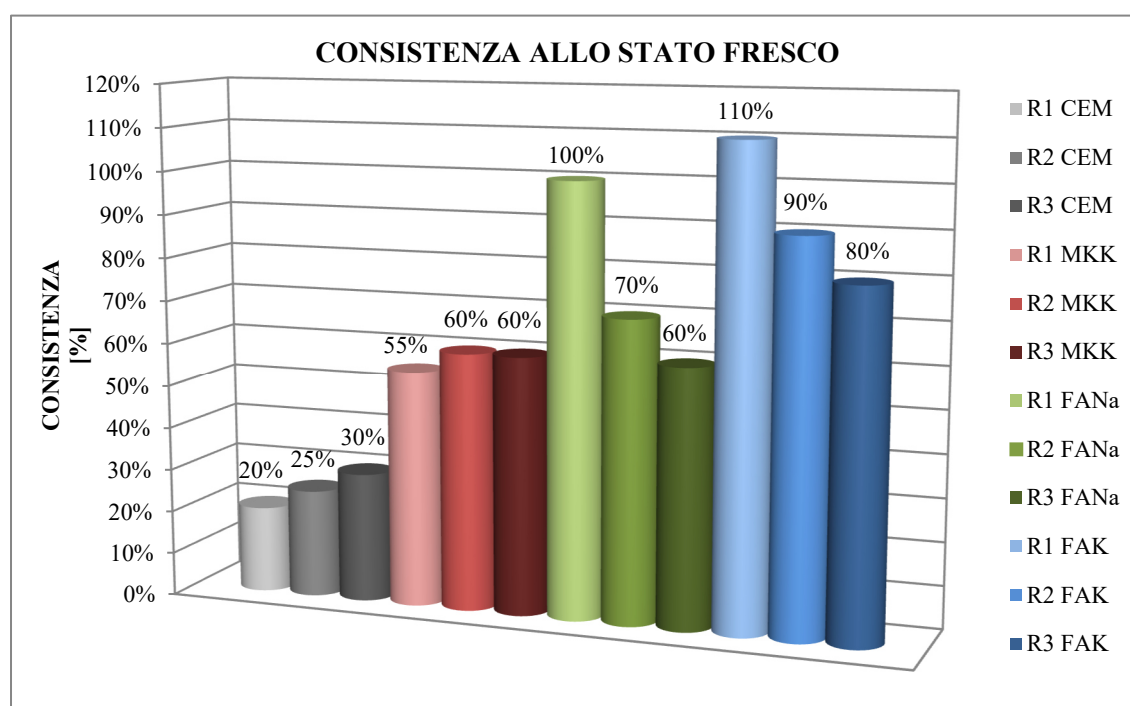


Figura 29 Consistenza percentuale delle malte cementizie e geopolimeriche

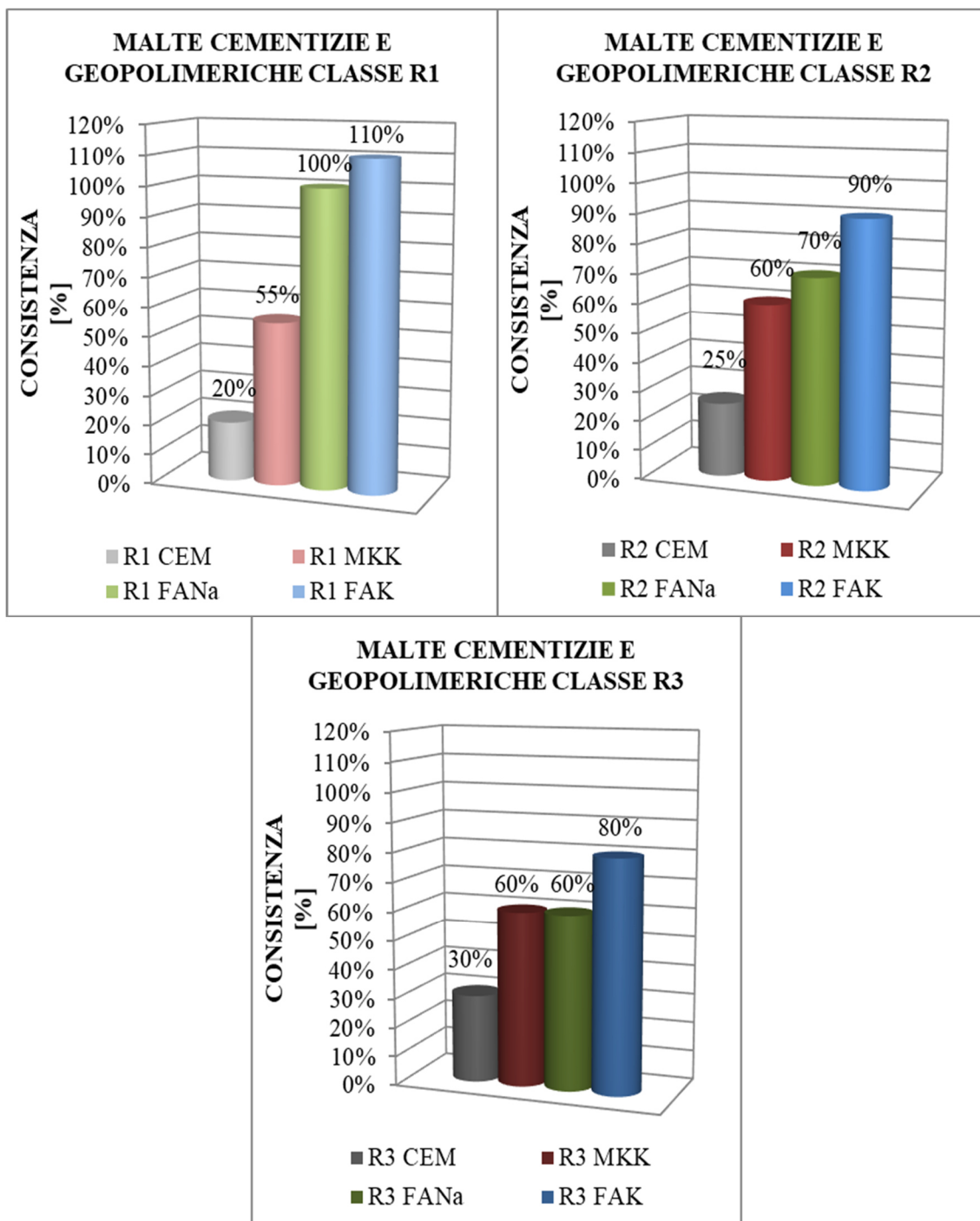


Figura 30 Consistenza delle malte cementizie e geopolimeriche a parità di classe di resistenza

Capitolo 6

Prove meccaniche

6.1 Introduzione

In questa tesi è stata effettuata una ricerca sullo studio e il confronto di malte cementizie e malte geopolimeriche caratterizzate dalle stesse proprietà di resistenza meccanica.

Approfondire questa fondamentale proprietà delle malte è pertanto essenziale allo scopo di delineare il successivo lavoro di ricerca svolto sugli impasti realizzati.

La meccanica dei materiali è la disciplina che studia il comportamento meccanico (movimento dei corpi) dei materiali, al fine di un loro utilizzo in ambito strutturale e nella costruzione di componenti e macchine. Più nello specifico è la scienza che studia il comportamento di oggetti solidi sottoposti a stress e tensioni.

Nella scienza dei materiali, la resistenza meccanica (tensione di rottura) di un materiale viene definita come una proprietà meccanica che indica lo sforzo massimo che un materiale generico è in grado di sopportare prima che avvenga la sua rottura. Quindi, anche la capacità di sopportare un carico applicato senza subire danni che lo debilitano.

Le malte, così come i calcestruzzi, le pietre ecc., rientrano nella categoria dei materiali fragili che tendono a rompersi in maniera brusca.

La normativa europea in vigore che attualmente si interessa della capacità di resistenza meccanica delle malte, che può essere divisa in resistenza alla flessione e resistenza alla compressione, è la norma UNI EN 1015-11.

6.2 Resistenza meccanica a flessione e a compressione

Come accennato poc'anzi, la resistenza meccanica è una proprietà meccanica che indica lo sforzo massimo che può sopportare un materiale. Questa resistenza, in base ai vari tipi di sollecitazione, può essere misurata con prove specifiche di compressione, trazione, flessione, taglio e torsione su un provino.

I fattori da cui dipende sono innumerevoli, tra cui:

- La qualità dei materiali.
- Stato di tensione (monoassiale, biassiale e triassiale).
- Condizioni climatiche.
- Condizioni di fabbricazione e conservazione.
- Rapidità di applicazione, durata e ripetizione del carico.

Nella presente ricerca sono state tenute, studiate e sperimentate due prove di resistenza: la prova di resistenza a flessione e la prova di resistenza a compressione.

La flessione è uno degli sforzi o delle sollecitazioni a cui può essere sottoposto un corpo. In questo caso, il corpo viene sottoposto ad una curvatura da un carico esterno che agisce perpendicolarmente all'asse longitudinale dell'elemento. La sollecitazione che la provoca viene detta momento flettente, cioè una coppia di due vettori di forza, paralleli ed aventi verso opposto e punti di applicazione ad una distanza non nulla.

$$M = F d$$

Dove M è il momento flettente (N mm), F è la forza (N) e d è il braccio ovvero la distanza minima fra i due vettori (mm). L'azione M è detta flettente perché è in grado di imprimere una curvatura locale, nel punto di applicazione.

L'elemento sottoposto a flessione in questa tesi, viene definito elemento sottile, cioè un elemento in cui almeno una delle due dimensioni è una frazione delle altre.

Per la rottura e la rilevazione della resistenza a flessione retta, sono stati utilizzati provini di dimensione 40x40x160 mm; formati con le tecniche descritte nel capitolo 4. Questi provini, dopo il getto sono stati (come da normativa) mantenuti nel cassero di formatura per 2 giorni e conservati a una temperatura di $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e a un'umidità relativa del $95\% \pm 5\%$, grazie al rivestimento in pellicola di cellulosa. Successivamente si è proceduto alla scasseratura e al mantenimento dei campioni alle stesse condizioni di temperatura e di umidità descritte nelle righe precedenti per 5 giorni, sempre avvolte nella pellicola di cellulosa. Dopo 7 giorni dall'esecuzione del getto, la pellicola contenente i provini è stata rimossa, e gli stessi sono stati mantenuti per i 21 giorni successivi a una temperatura di $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e a un'umidità relativa del $50\% \pm 5\%$ in una cella climatizzata.

Per determinare i dati inerenti al collaudo della resistenza a flessione dei provini, è stata utilizzata una pressa idraulica munita di cella di carico e collegata a un terminale per la registrazione dei risultati ottenuti (Figura 31).



Figura 31 Pressa idraulica dotata di terminale di rilevazione

Utilizzando questa apparecchiatura, si è potuto costantemente sondare la forza opposta dai provini all'avanzamento del pistone cilindrico.

I provini sono stati messi su un supporto, composto da due appoggi metallici cilindrici del diametro di 10 mm e posti a 100 mm tra loro (ovvero i vincoli che provocano il momento flettente). Sopra al provino è stato applicato un carico di punta costituito da un cilindro di 10 mm di diametro e 50 mm di larghezza, che gradualmente aumentava di forza applicata (Figura 32).

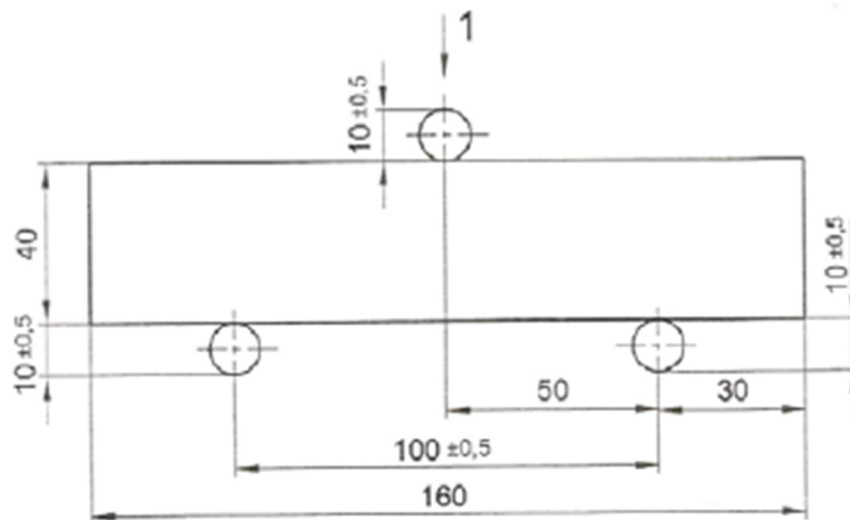


Figura 32 Prova di resistenza a flessione. Schema di vincolo

La pressa ha agito sul supporto aumentando gradualmente il carico applicato perpendicolarmente alla superficie superiore del provino, fino a portarlo a rottura per flessione (Figura 33). I valori di carico espressi in kN e i valori di deformazione caratteristici del provino vengono messi in grafico dal terminale collegato alla pressa, che individua la forza massima applicata al provino al momento della rottura. Da tale forza e dalle informazioni relative alle dimensioni del campione è stata ricavata la tensione massima a flessione caratteristica del provino.



Figura 33 Provino sottoposto a rottura per flessione

A questo scopo, la normativa impone l'utilizzo della relazione derivata dalla Formula di Navier.

Questa formula è detta anche formula della presso(tenso)-flessione, ed è una relazione dovuta all'Ingegnere francese Claude-Louis Navier che consente (in scienza delle costruzioni), di determinare le tensioni normali agenti su una sezione trasversale di una trave di asse z sollecitata a flessione retta:

$$\sigma_z = \frac{M_x}{I_{xx}} y$$

Dove σ_z (N/mm²) è la tensione unitaria di sforzo normale, M_x (Nmm) è il momento flettente agente lungo l'asse x, y (mm) è la distanza dall'asse neutro n_x e $J=I_{xx}$ (mm⁴) è il momento di inerzia (di superficie) lungo l'asse neutro n_x .

Nello studio si è tenuta in considerazione anche la seguente formula, in cui la Resistenza a flessione R_f , descritta in MPa (N/mm²), si ricava dal rapporto tra il momento flettente provocato dal carico moltiplicato per la distanza dell'area elementare dall'asse neutro e rapportato al momento di inerzia della sezione rispetto allo stesso asse neutro.

Più semplicemente ciò si ricava dall'equazione sotto riportata e descritta:

$$R_f = 1,5 * \frac{F * l}{b * h^2}$$

dove:

- F è la forza massima applicata, misurata in kN;
- l è la distanza tra i due supporti metallici, pari a 100 mm;
- b è la larghezza del provino, pari a 40 mm;
- h è l'altezza del provino, pari a 40 mm.

I risultati ottenuti con le tecniche appena esposte sono stati utilizzati per la realizzazione di grafici in cui si evidenziano, per ogni tipologia di malta, le proprietà di resistenza a flessione in funzione del tempo di stagionatura dei campioni sottoposti a collaudo.

Le prove di rottura sono state effettuate a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura, in modo da ottenere un adeguato numero di dati nei primi giorni di maturazione (in cui si ha il maggior incremento delle resistenze meccaniche).

Per quanto riguarda le prove sulle malte a base di cemento e calce idraulica si è potuto rilevare un notevole sviluppo delle resistenze meccaniche a flessione già nei primi 7 giorni di stagionatura (Tabella 41, Figura 34). Le malte di classe R1 e R2 raggiungono il loro pressoché massimo potenziale meccanico proprio nella prima settimana di maturazione.

Mentre la classe R3 rappresenta l'eccezione, perché priva di calce idraulica, che mostra un notevole incremento delle resistenze a flessione nelle 48 ore immediatamente successive al getto e nella prima settimana di maturazione.

Le malte di classe più elevata di resistenza a compressione si presentano maggiormente performanti anche per quanto riguarda le resistenze meccaniche a flessione.

Tabella 41 Resistenza meccanica a flessione delle malte cementizie

	GIORNI DI MATURAZIONE				
	2		7		28
	R_f [MPa]	% R_f a 28 gg	R_f [MPa]	% R_f a 28 gg	R_f [MPa]
R1 CEM	0,6	25%	2,2	92%	2,4
R2 CEM	1,6	38%	3,1	74%	4,2
R3 CEM	2,9	60%	4,9	102%	4,8

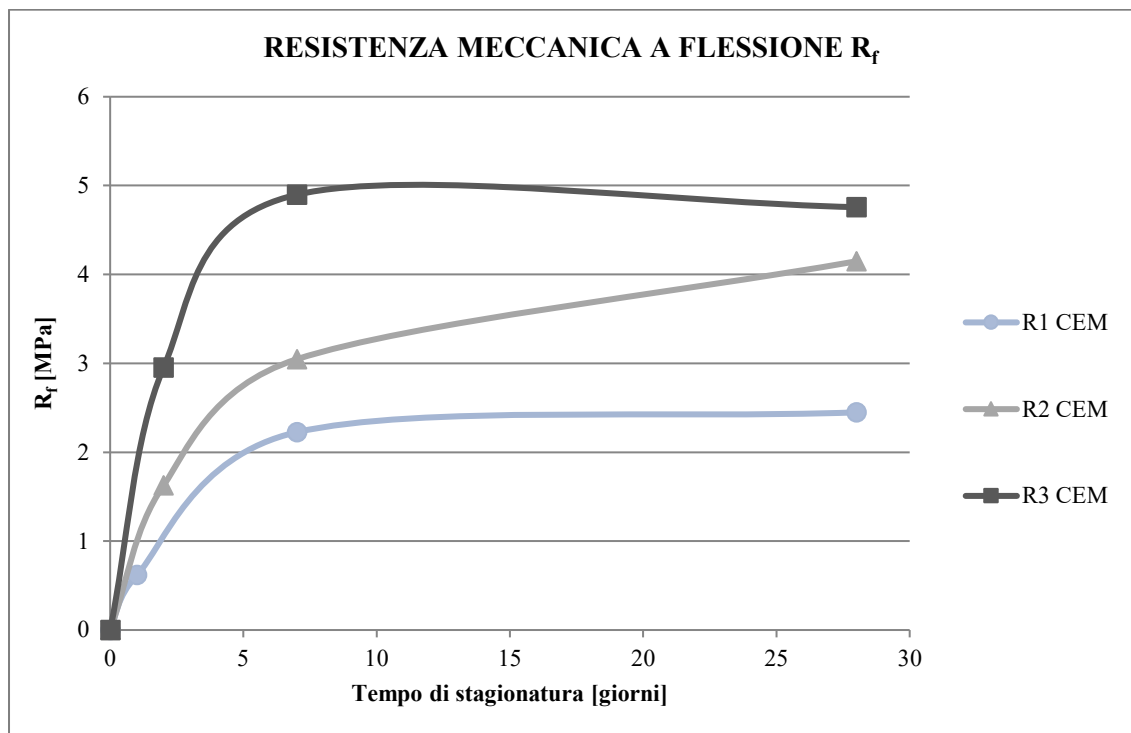


Figura 34 Resistenza meccanica a flessione. Malte cementizie

Riguardo alle malte in metacaolino, sviluppano la maggior parte delle resistenze meccaniche nei giorni immediatamente successivi al confezionamento dei provini (Tabella 42, Figura 35). A conferma di ciò, nella verifica dei getti finali di questa tipologia di composti, si sono ottenuti sviluppi pressoché completi delle resistenze a flessione massime già nei 7 giorni successivi al getto per tutte le tre malte di differenti classi di resistenza.

Le malte di classe R2 ed R3 mostrano resistenze massime a 7 giorni dallo scasso, e una lieve flessione dei valori nei 21 giorni successivi.

Le malte di classe più elevata di resistenza a compressione si mostrano maggiormente performanti anche per quanto riguarda le resistenze meccaniche a flessione.

Tabella 42 Resistenza meccanica a flessione delle malte in metacaolino

	GIORNI DI MATURAZIONE				
	2		7		28
	R_f [MPa]	% R_f a 28 gg	R_f [MPa]	% R_f a 28 gg	R_f [MPa]
R1 MKK	1,1	61%	1,6	89%	1,8
R2 MKK	1,6	76%	2,8	133%	2,1
R3 MKK	3,8	76%	5,7	114%	5,0

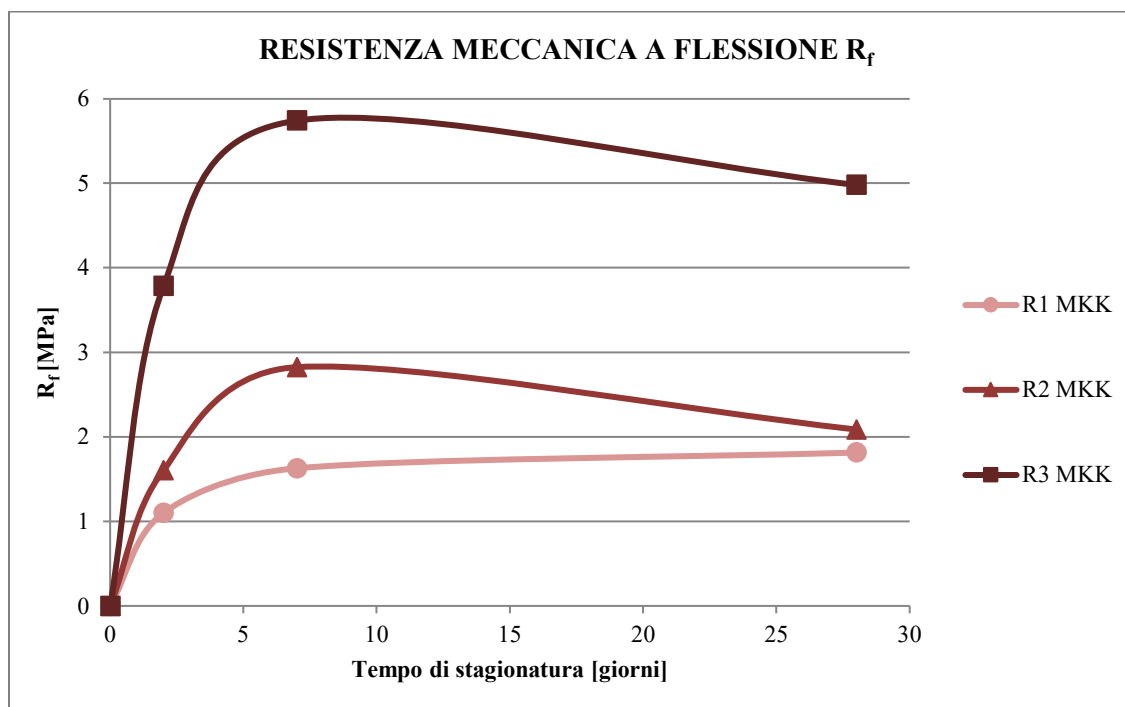


Figura 35 Resistenza meccanica a flessione. Malte geopolimeriche a base di metacaolino

Anche nelle malte in cenere volante e NaOH in soluzione alcalina, come nelle malte in metacaolino, presentano uno sviluppo delle resistenze meccaniche soprattutto nella prima settimana di stagionatura (Tabella 43, Figura 36).

Per questa tipologia di impasti si ottengono delle resistenze meccaniche a flessione pressoché massime nei primi 7 giorni in tutte le classi di resistenza. Anche per questa tipologia di impasti si possono rilevare resistenze meccaniche a flessione crescenti proporzionalmente alla classe di resistenza a compressione attesa.

Tabella 43 Resistenza meccanica a flessione delle malte in cenere volante

	GIORNI DI MATURAZIONE				
	2		7		28
	R _f [MPa]	% R _f a 28 gg	R _f [MPa]	% R _f a 28 gg	R _f [MPa]
R1 FANa	0,7	39%	1,8	100%	1,8
R2 FANa	1,5	63%	2,8	117%	2,4
R3 FANa	2,3	61%	3,7	97%	3,8

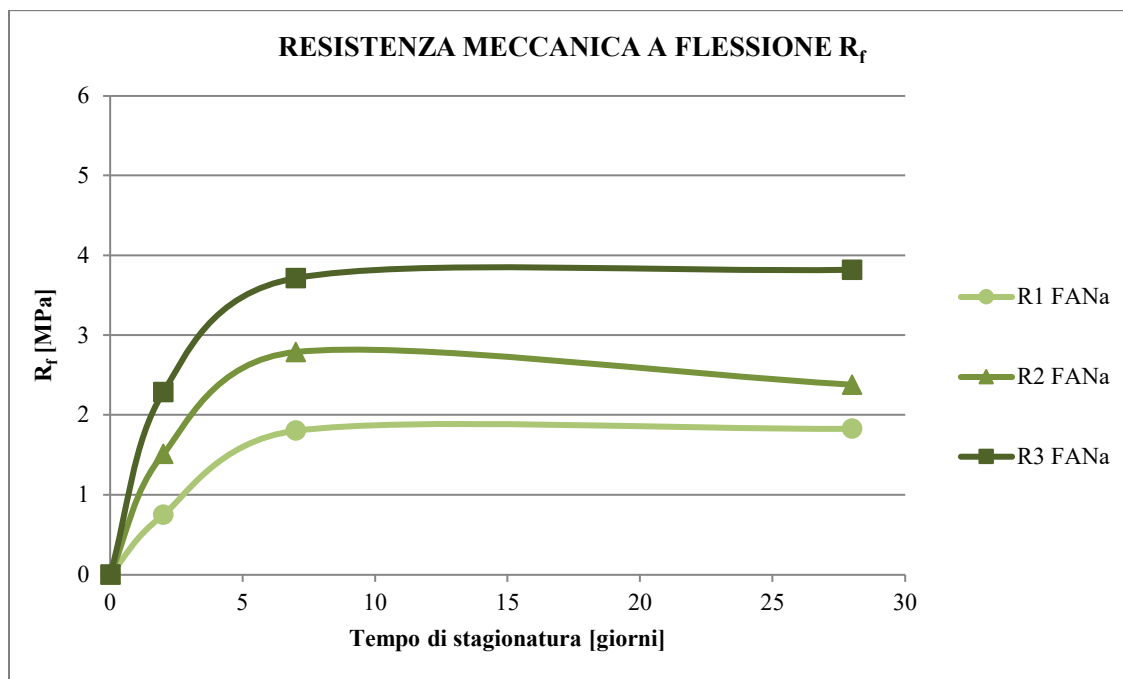


Figura 36 Resistenza meccanica a flessione. Malte geopolimeriche a base di cenere volante

Le malte in cenere volante, cemento alluminoso e KOH in soluzione alcalina presentano uno sviluppo delle resistenze meccaniche a flessione in funzione del tempo di stagionatura non dissimile da quello osservato sulle loro controparti in cenere volante e NaOH in soluzione (Tabella 44, Figura 37). Tuttavia, l'unica differenza è che tutte e tre le classi di resistenza, sviluppano il massimo valore dopo 7 giorni di stagionatura.

Tabella 44 Resistenza meccanica a flessione delle malte in cenere volante e cemento alluminoso

	GIORNI DI MATURAZIONE				
	2		7		28
	R_f [MPa]	% R_f a 28 gg	R_f [MPa]	% R_f a 28 gg	R_f [MPa]
R1 FAK	1,7	106%	2,1	131%	1,6
R2 FAK	2,4	114%	3,1	148%	2,1
R3 FAK	3,1	89%	4,0	114%	3,5

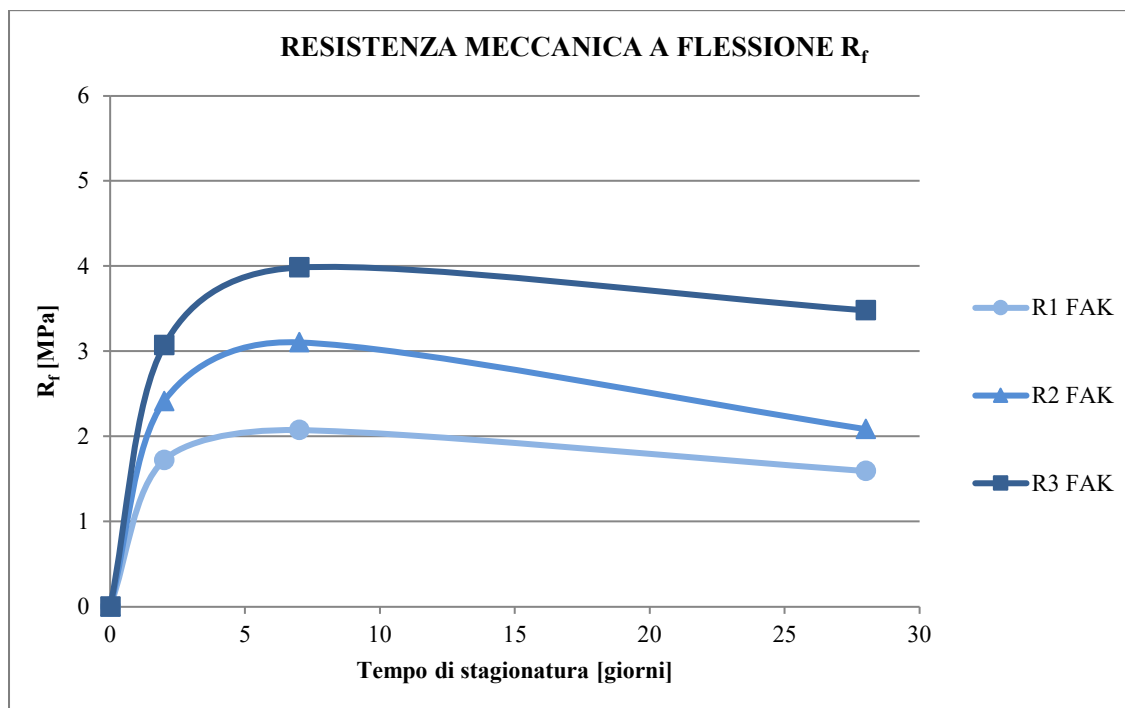


Figura 37 Resistenza meccanica a flessione. Malte geopolimeriche a base di cenere volante e cemento alluminoso

In ogni caso, il principale mezzo di classificazione delle malte idrauliche, secondo le principali normative internazionali, è rappresentato dalle proprietà di resistenza alla compressione.

In meccanica, per compressione si intende uno degli sforzi monoassiali elementari normali alla superficie di riferimento al quale può essere sottoposto un corpo (insieme di flessione, taglio, torsione e trazione). Si misura in MPa.

Per sforzo di compressione si intende l'applicazione di un insieme di forze monoassiali in più punti dell'oggetto sottoposto a stress (ossia applicate in modo da non provocare un momento diretto) mirata a ridurre le dimensioni dell'oggetto in una o più direzioni.

In questo lavoro ci si occuperà di compressione uniassiale; cioè lo sforzo che agisce sulla lunghezza dell'elemento lungo un'unica direzione.

I provini utilizzati per questa fase di sperimentazione meccanica, che avviene successivamente, sono gli stessi utilizzati nelle prove di rottura a flessione. Più nello specifico, le due metà di uno stesso provino ottenute dal collaudo a flessione vengono in seguito sottoposte a rottura tramite compressione; in questo modo si ottiene una maggior quantità di informazioni dal collaudo di un unico campione.

La pressa idraulica precedentemente descritta è stata utilizzata anche per il collaudo sotto sforzo di compressione. La rottura del provino avviene tramite un supporto costituito da due piastre (una posta sotto e una sopra il provino), e da perni metallici che contribuiscono al contenerlo lateralmente. La piastra superiore (non vincolata alla rotazione) ha una superficie di 40x40 mm e restituisce uniformemente al provino lo sforzo di compressione impresso dal pistone meccanico (Figura 38).



Figura 38 Campione sottoposto a rottura per compressione

Anche in questo caso, come è accaduto per le prove di resistenza a flessione, i valori di carico e la conseguente deformazione assiale del provino vengono graficizzati da un terminale che è collegato alla pressa idraulica. Da questa si ottiene la tensione massima a compressione F_n caratteristica del provino e

si ricava la Resistenza a compressione R_c (misurata in MPa) caratteristica del provino, tramite la relazione:

$$R_c = \frac{F_n}{A}$$

in cui

- F_n è la forza normale massima applicata al provino, misurata in kN.
- A è l'area della sezione trasversale di carico del provino, pari a 1600 mm^2 .

Le resistenze a compressione così ottenute sono state riportate in grafici, come per i dati che si erano ricavati dalle prove a flessione. In grafico, per ogni tipologia di malta, sono state riportate le proprietà di resistenza a compressione dei provini in funzione del periodo di stagionatura.

Anche per il collaudo a compressione, le prove sono state effettuate a 2, 7 e 28 giorni di maturazione.

Si è potuto notare che le malte in cemento e calce idraulica manifestano un notevole incremento delle resistenze meccaniche a compressione in tutto il periodo dei 28 giorni di maturazione attesi (Tabella 45, Figura 39).

Lo sviluppo delle resistenze meccaniche nelle malte cementizie è inversamente proporzionale al rapporto calce/cemento caratteristico di ciascun impasto.

Tabella 45 Resistenza meccanica a compressione. Malte cementizie

	GIORNI DI MATURAZIONE				
	2		7		28
	R_c [MPa]	% R_c a 28 gg	R_c [MPa]	% R_c a 28 gg	R_c [MPa]
R1 CEM	3,1	27%	7,2	64%	11,3
R2 CEM	6,7	33%	11,3	56%	20,3
R3 CEM	11,4	38%	20,9	70%	29,9

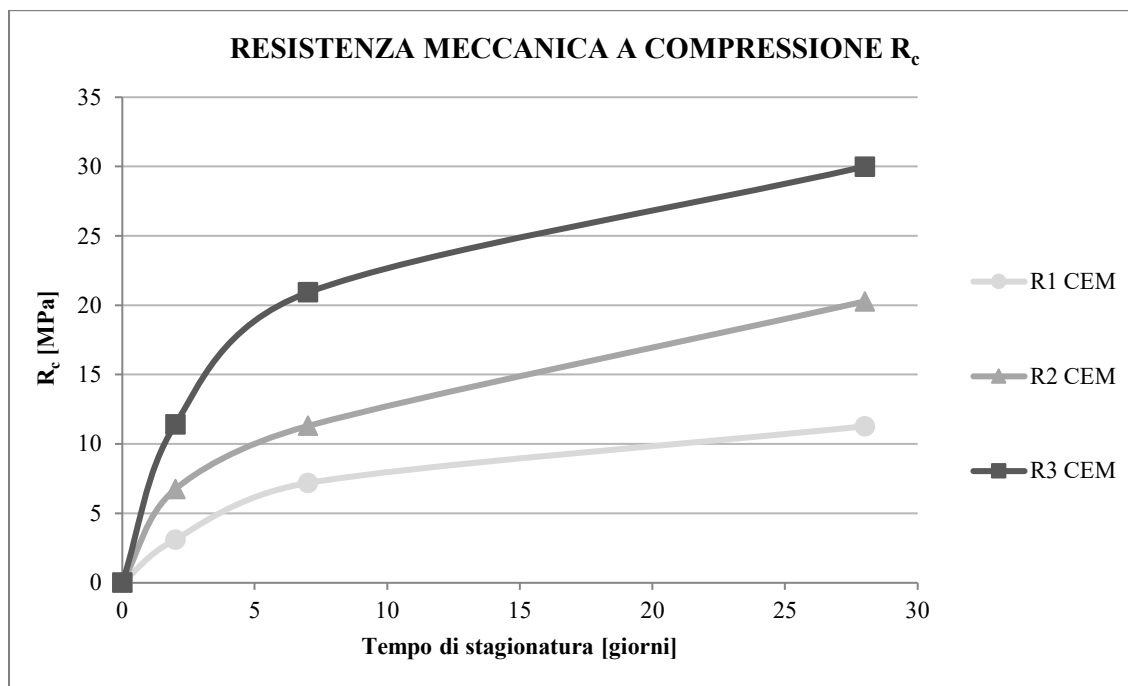


Figura 39 Resistenza meccanica a compressione. Malte cementizie

Si descrivono di seguito i risultati delle prove meccaniche con le malte geopolimeriche. Nel collaudo delle malte in metacaolino si può notare che si sono raggiunte resistenze elevate già dopo 7 giorni di stagionatura (Tabella 46, Figura 40). Si nota inoltre che la classe di resistenza R3, già dopo i primi 2 giorni di maturazione, presenta una percentuale di resistenza meccanica a compressione già abbastanza alta rispetto alle altre due classi di resistenza.

Tabella 46 Resistenza meccanica a compressione. Malte geopolimeriche a base di metacaolino

	GIORNI DI MATURAZIONE				
	2		7		28
	R _c [MPa]	% R _c a 28 gg	R _c [MPa]	% R _c a 28 gg	R _c [MPa]
R1 MKK	2,8	29%	7,9	82%	9,6
R2 MKK	5,1	35%	11,9	82%	14,6
R3 MKK	18,2	63%	21,9	75%	29,1

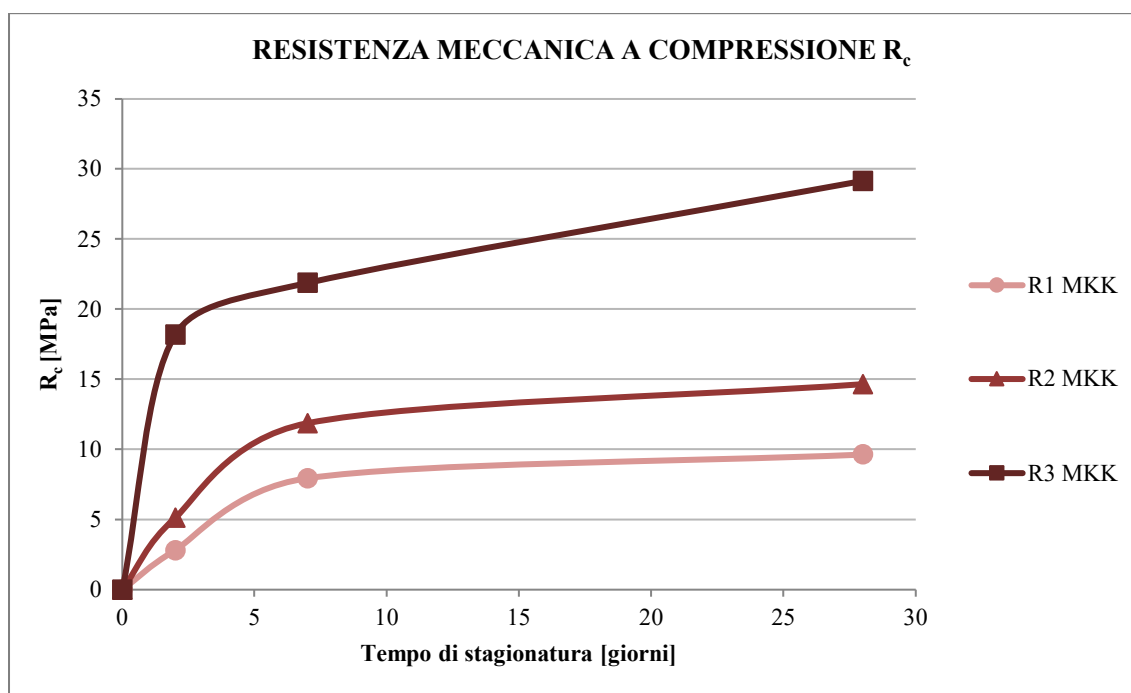


Figura 40 Resistenza meccanica a compressione. Malte geopolimeriche a base di metacaolino

Differentemente alle malte geopolimeriche in metacaolino, gli impasti in cenere volante manifestano incrementi delle resistenze meccaniche a compressione già elevate dopo i primi 7 giorni di maturazione (Tabella 47, Figura 41). In particolare, le malte in cenere volante e NaOH in soluzione alcalina tendono quasi ad avere nelle ultime settimane degli incrementi minimi sulle resistenze meccaniche a compressione, fatta eccezione per la classe di resistenza R1 che ha un incremento maggiore.

Tabella 47 Resistenza meccanica a compressione. Malte geopolimeriche a base di cenere volante

	GIORNI DI MATURAZIONE				
	2		7		28
	R _c [MPa]	% R _c a 28 gg	R _c [MPa]	% R _c a 28 gg	R _c [MPa]
R1 FANa	1,7	20%	5,2	61%	8,5
R2 FANa	4,3	35%	10,2	83%	12,3
R3 FANa	7,7	40%	13,7	72%	19,1

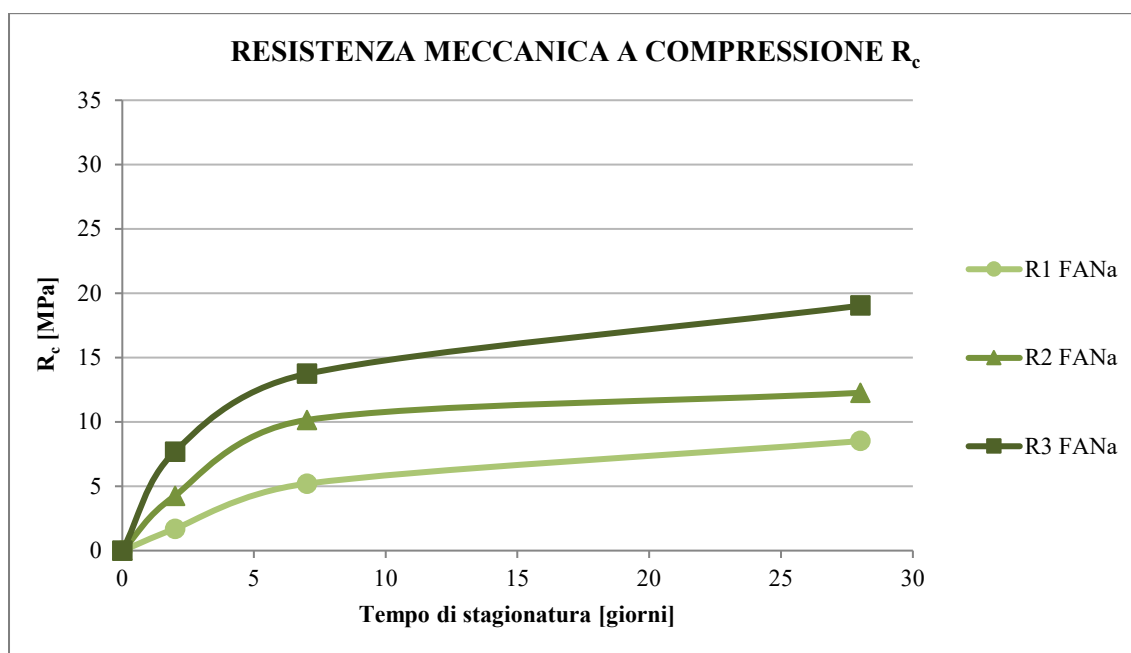


Figura 41 Resistenza meccanica a compressione. Malte geopolimeriche a base di cenere volante

Le malte geopolimeriche in cenere volante, cemento alluminoso e KOH in soluzione alcalina presentano incrementi di resistenza a compressione relativamente bassi nelle ultime settimane di stagionatura (Tabella 48, Figura 42). Le malte di classe R1 e R2 tendono a esaurire lo sviluppo delle prestazioni meccaniche già nei 5 giorni successivi alla scasseratura. Mentre la malta di classe R3 mostra resistenze meccaniche sviluppate con percentuale discreta (circa 24%) nelle successive 2 settimane di maturazione.

Tabella 48 Resistenza meccanica a compressione. Malte geopolimeriche a base di cenere volante e cemento alluminoso

		GIORNI DI MATURAZIONE				
		2		7		28
		R _c [MPa]	% R _c a 28 gg	R _c [MPa]	% R _c a 28 gg	R _c [MPa]
R1	FAK	4,8	58%	8,00	96%	8,3
R2	FAK	6,7	48%	11,6	83%	14,0
R3	FAK	12,5	53%	18,0	76%	23,8

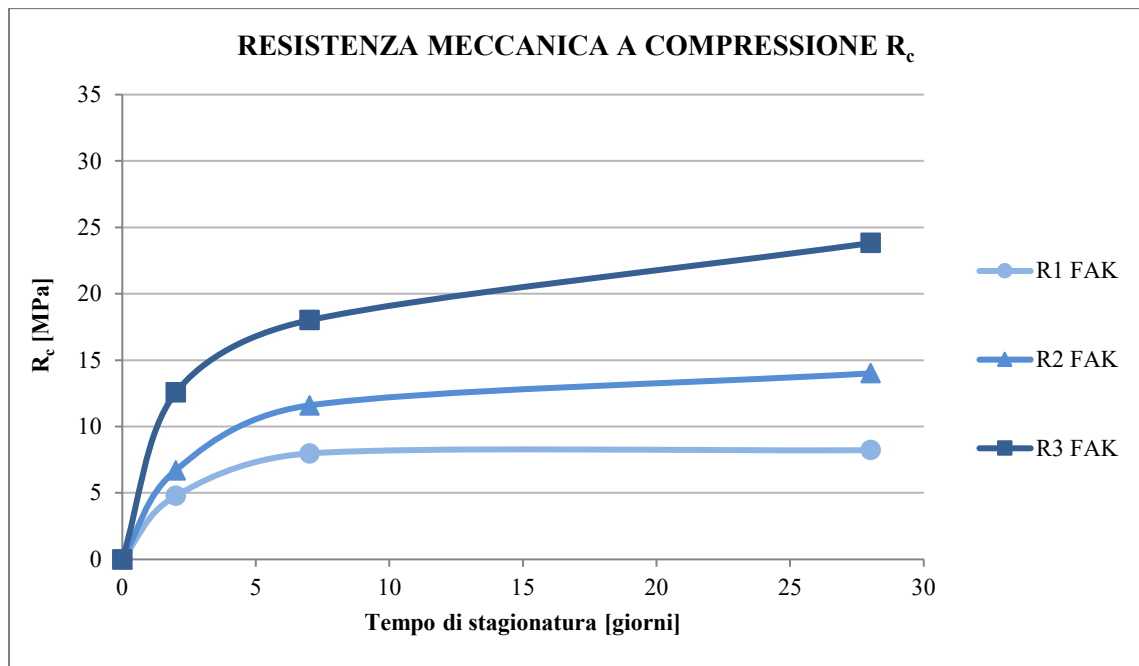


Figura 42 Resistenza meccanica a compressione. Malte geopolimeriche a base di cenere volante e cemento alluminoso

6.3 Modulo di elasticità dinamico

Il modulo di elasticità è una grandezza, caratteristica di un materiale, che esprime il rapporto tra la tensione e la deformazione nel caso di condizioni di carico monoassiale ed in caso di comportamento di tipo elastico del materiale usato.

Questo modulo viene definito anche come il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione che da esso deriva e la sua unità di misura è il Pascal (N/mm^2). Questo rapporto è un dato rilevante e fondamentale per un'accurata caratterizzazione meccanica delle malte idrauliche.

In questa tesi, per ogni collaudo di resistenza meccanica svolta sui provini di malta, è stata effettuata una prova ultrasonica non distruttiva volta a determinare il modulo elastico E_d .

Esso si differenzia dal modulo elastico statico E_0 , che viene rilevato tramite deformazioni provocate da carichi istantanei applicati al campione, con l'ausilio di prove distruttive.

L'individuazione del modulo elastico dinamico permette di ottenere informazioni aggiuntive riguardanti le proprietà meccaniche e lo stato di maturazione del provino di malta, facilmente confrontabili con quelle ottenute dalle prove di tipo distruttivo (le prove di rottura sopra descritte), tramite semplici rilevazioni che non intaccano l'integrità strutturale dei campioni analizzati.

È importante notare come, dal modulo elastico dinamico caratteristico di un determinato materiale, sia possibile ricavare il valore approssimativo del modulo elastico statico e, di conseguenza, la resistenza a compressione caratteristica del materiale medesimo, secondo relazioni variabili a seconda del tipo di materiale cementizio (malta, calcestruzzo, ecc.). L'affidabilità di tali relazioni è, tuttavia, messa in discussione dagli studi pratici. In ogni caso, essendo il modulo elastico dinamico approssimativamente pari al modulo tangente all'origine (nel grafico tensioni-deformazioni) ed essendo il modulo elastico statico comunemente rilevato come modulo secante, il primo risulta generalmente superiore al secondo.

Riguardo alla legislazione, la norma che ha dettato le procedure per la determinazione del modulo elastico dinamico tramite indagini ultrasoniche, era la UNI 9771, ritirata nel 2009. Mentre la norma di riferimento attualmente in vigore, diretta alle stesse finalità, è la UNI EN 12504-4. Questa normativa specifica un metodo per la determinazione della velocità di propagazione degli impulsi delle onde longitudinali ultrasoniche nella pasta di malta indurita. Tale dato viene poi utilizzato nel calcolo del modulo elastico in questione.

La metodologia descritta dalla UNI EN 12504-4 si basa sulla produzione di un susseguirsi di onde ultrasoniche longitudinali mediante un trasduttore elettroacustico, mantenuto in contatto con la superficie del provino sottoposto a collaudo. Dopo aver attraversato un percorso di lunghezza nota all'interno della malta, il susseguirsi di onde viene convertito in segnale elettrico mediante un secondo trasduttore, e il tempo di transito degli impulsi viene misurato tramite dei circuiti di temporizzazione elettronica.

L'utilizzo delle onde ultrasoniche, la cui difficoltà di trasmissione all'interno di mezzi a bassa densità (come l'aria o l'acqua) è ben nota, fa sì che la presenza o meno di vuoti all'interno del composto analizzato influisca notevolmente sul risultato della prova.

Il macchinario destinato a tale rilevazione consiste in un generatore di impulsi elettrici, una coppia di trasduttori, un amplificatore e un dispositivo elettronico per la misurazione dell'intervallo di tempo che intercorre tra la partenza di un impulso generato dal trasduttore emittente e il suo arrivo al trasduttore ricevente. Durante la prova è stata utilizzata una barra di calibrazione, destinata a fornire le linee di riferimento per la successiva misurazione della velocità. Lo strumento utilizzato ricopre tutti i requisiti presenti nella norma UNI EN 12504-4, per quanto riguarda lo scostamento limite, l'accuratezza nella misura dei tempi di transito, il tempo di salita dell'impulso di eccitazione elettronica, e la frequenza di ripetizione degli impulsi.

Infine, è fornito di un contatore che misura i tempi, dotato di un display digitale a lettura diretta (Figura 43).



Figura 43 Dispositivo di rilevazione della velocità degli impulsi ultrasonici

Le prove sono state effettuate sui provini a 2, 7 e 28 giorni di maturazione (prima delle prove di rottura), conservati nelle medesime condizioni descritte precedentemente quando si è trattato il tema del confezionamento dei provini.

Per la definizione del modulo elastico risulta dato fondamentale, la stima della densità, per cui, in coincidenza di ciascuna rilevazione, i provini sono stati pesati.

Le prove sono state effettuate accoppiando i trasduttori alle superfici minori (40x40 mm) dei provini analizzati, assicurando un buon contatto acustico tramite l'utilizzo di grasso vegetale come mezzo di accoppiamento (Figura 44). Si è poi proceduto alla lettura del tempo di transito, con un'accuratezza di $0,1 \mu\text{s}$.



Figura 44 Provino sottoposto a rilevazione ultrasonica con l'ausilio di trasduttori

Sia prima che dopo l'esecuzione di ciascuna prova, è stata verificata la corretta taratura del macchinario, regolando il tempo di transito della barra di calibrazione sopra citata a 25,3 μ s, come descritto dalle specifiche del produttore.

Il tempo di percorrenza così rilevato ha permesso di calcolare la velocità di propagazione dell'onda ultrasonica tramite la relazione:

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

dove:

- L è la lunghezza del provino in metri, pari a 0,16 m;
- t è il tempo di propagazione rilevato come sopra, misurato in s.

Ottenuta la velocità di propagazione, si procede al calcolo del modulo elastico dinamico E_d tramite la formula

$$E_d = \frac{V_m^2 * \rho * [(1 + \gamma_d) * (1 - 2\gamma_d)]}{(1 - \gamma_d)}$$

dove:

- V_m è la velocità di propagazione dell'onda ultrasonica, misurata in m/s;
- ρ è la densità della malta, espressa in kg/m³;

- γ_d è il modulo elastico di Poisson, assunto, per il materiale utilizzato, pari a 0,2.

I valori dei moduli di elasticità dinamici così ottenuti (riportati in GPa) sono stati graficizzati e riportati in seguito.

La velocità di propagazione delle onde ultrasoniche, come per lo sviluppo delle resistenze meccaniche, risente del rapporto calce idraulica/cemento Portland e rapporto acqua/legante, che è un elemento caratteristico di ciascuna delle malte cementizie analizzate in questa tesi.

La malta che si compone con il solo utilizzo del cemento come polvere legante mostra densità superiore e, di conseguenza, velocità di propagazione delle onde e modulo elastico dinamico superiori.

Ciò è in linea con quanto rilevato nei collaudi di resistenza meccanica, in cui le malte a densità maggiore mostrano resistenze a compressione e a flessione superiori (Tabelle 48-49, Figura 45).

Tabella 48 Modulo elastico E_d . Malte cementizie

	E_d 28 gg DI MATURAZIONE		
	t MEDIO [μ s]	V_m [m/s]	E_d [GPa]
R1 CEM	50,4	3174,60	18
R2 CEM	45,7	3501,09	23
R3 CEM	41,8	3827,75	28

Tabella 49 Peso medio e densità dopo 28 giorni di stagionatura nelle malte cementizie

	PESO MEDIO (g)	VOLUME (m ³)	DENSITÀ (g/m ³) a 28 gg
R1 CEM	508,780	0,256	1987
R2 CEM	544,545	0,256	2127
R3 CEM	545,945	0,256	2133

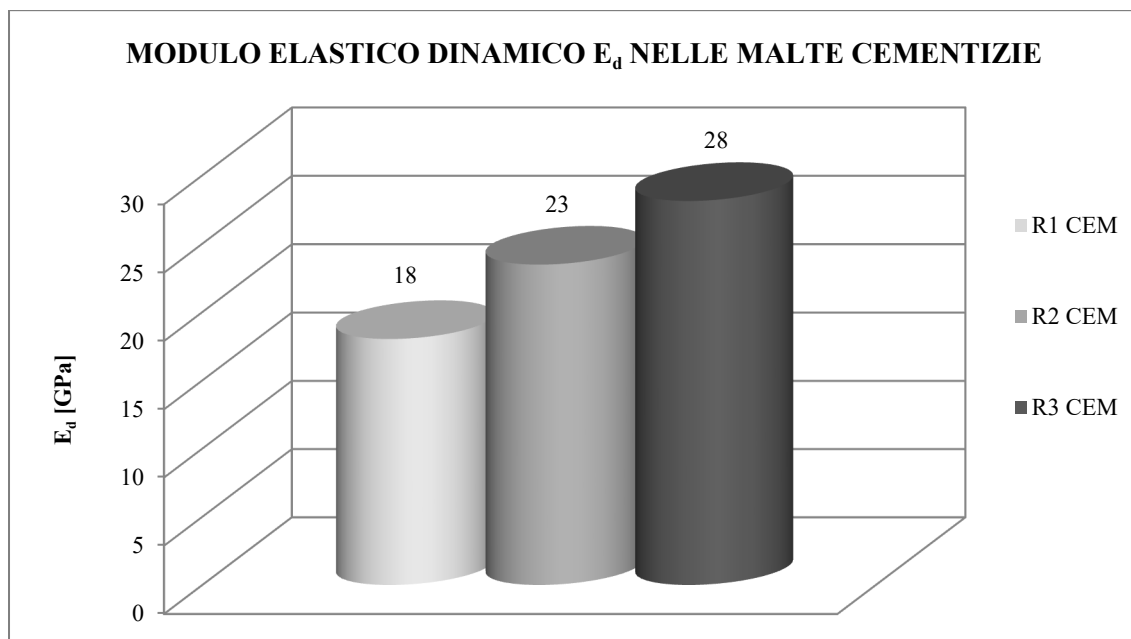


Figura 45 Grafico del modulo elastico dinamico dopo 28 giorni di stagionatura. Malte cementizie

I moduli elastici dinamici rilevati sulle malte geopolimeriche in metacaolino si presentano proporzionali alle resistenze meccaniche ottenute dai relativi campioni durante le prove di rottura (Tabelle 50-51, Figura 46).

Le velocità di propagazione delle onde ultrasoniche all'interno delle malte, risultano inversamente proporzionali alla densità e ai relativi moduli elastici calcolati per ogni classe di resistenza.

Tabella 50 Modulo elastico E_d nelle malte geopolimeriche a base di metacaolino

	E_d 28 gg DI MATURAZIONE		
	t MEDIO [μ s]	V_m [m/s]	E_d [GPa]
R1 MKK	76,2	2099,74	7
R2 MKK	69,6	2300,50	8
R3 MKK	50,9	3143,42	16

Tabella 51 Peso medio e densità dopo 28 giorni di stagionatura nelle malte geopolimeriche a base di metacaolino

	PESO MEDIO (g)	VOLUME (m ³)	DENSITÀ (g/m ³) a 28 gg
R1 MKK	436,865	0,256	1707
R2 MKK	441,665	0,256	1725
R3 MKK	470,320	0,256	1837

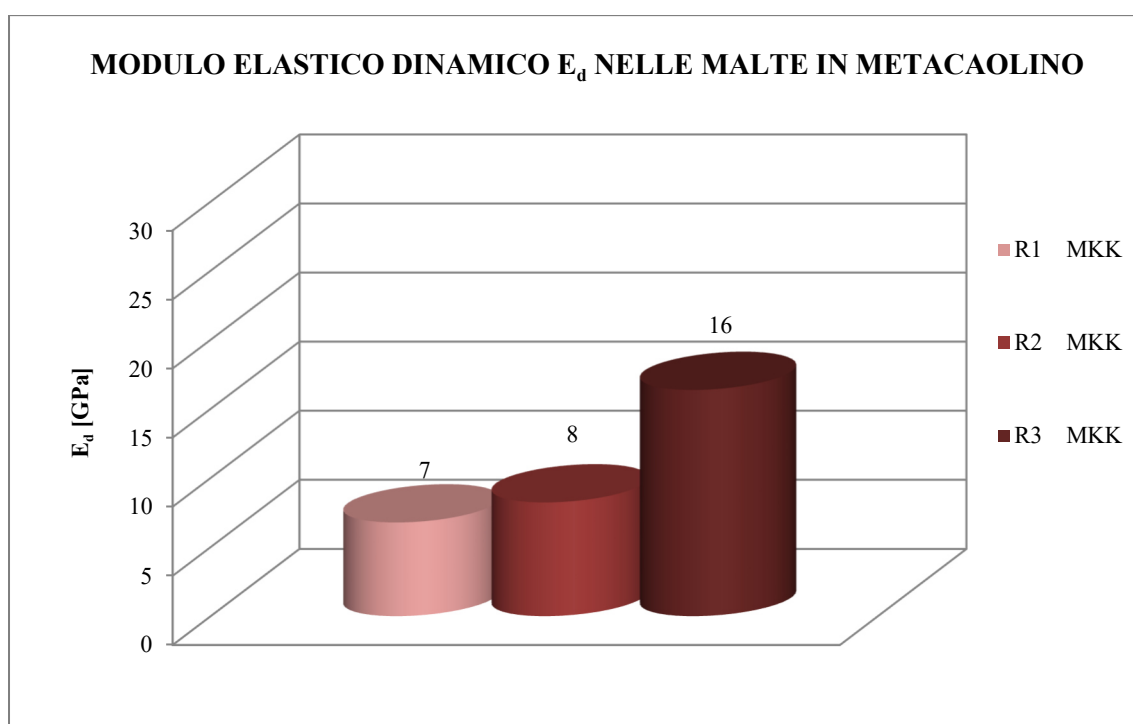


Figura 46 Grafico del modulo elastico dinamico dopo 28 giorni di stagionatura. Malte geopolimeriche a base di metacaolino

Le malte geopolimeriche in cenere volante presentano dei valori caratteristici di E_d delle singole malte che seguono le caratteristiche meccaniche rilevate dalle prove di rottura, con le malte di classe R1 e R2 che presentano valori di modulo elastico molto simili, in linea con la loro modesta differenziazione meccanica (Tabelle 52-53, Figura 47). La malta di classe R3 mostra, al contrario, un modulo elastico leggermente superiore.

Tabella 52 Modulo elastico E_d nelle malte geopolimeriche a base di cenere volante

	E_d 28 gg DI MATURAZIONE		
	t MEDIO [μ s]	V_m [m/s]	E_d [GPa]
R1 FANa	65,6	2439,02	11
R2 FANa	64,2	2492,21	12
R3 FANa	60,3	2653,40	14

Tabella 53 Peso medio e densità dopo 28 giorni di stagionatura. Malte geopolimeriche a base di cenere volante

	PESO MEDIO (g)	VOLUME (m^3)	DENSITÀ (g/m^3) a 28 gg
R1 FANa	526,305	0,256	2056
R2 FANa	538,815	0,256	2105
R3 FANa	555,670	0,256	2171

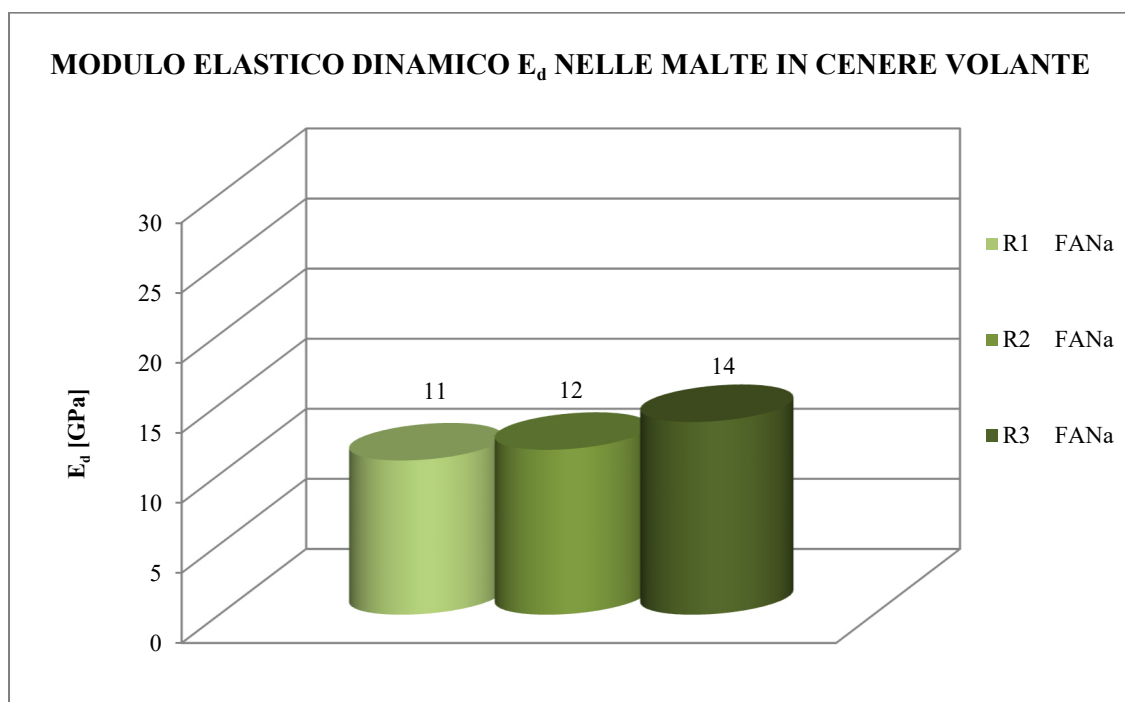


Figura 47 Grafico del modulo elastico dinamico dopo 28 giorni di stagionatura. Malte geopolimeriche a base di cenere volante

Le malte geopolimeriche in cenere volante, cemento alluminoso e KOH in soluzione alcalina presentano velocità di propagazione del susseguirsi di onde e densità del tutto diverse a quelle rilevate nelle malte in cenere volante e NaOH in soluzione. Questo comporta moduli elastici dinamici leggermente differenti tra le due tipologie di impasto, a parità di classe di resistenza, con una maggiorazione dei moduli elastici per le malte in cenere volante e cemento alluminoso (Tabelle 54- 55, Figura 48).

Anche in questa tipologia di malte, i moduli elastici seguono proporzionalmente le prestazioni meccaniche.

Tabella 54 Modulo elastico E_d nelle malte geopolimeriche a base di cenere volante e cemento alluminoso

	Ed 28 gg DI MATURAZIONE		
	t MEDIO [μ s]	V _m [m/s]	Ed [GPa]
R1 FAK	64,5	2480,62	11
R2 FAK	61,4	2605,86	13
R3 FAK	56,0	2857,14	16

Tabella 55 Peso medio e densità dopo 28 giorni di stagionatura. Malte geopolimeriche a base di cenere volante e cemento alluminoso

	PESO MEDIO (g)	VOLUME (m ³)	DENSITÀ (g/m ³) a 28 gg
R1 FAK	510,855	0,256	1995
R2 FAK	553,780	0,256	2163
R3 FAK	561,610	0,256	2194

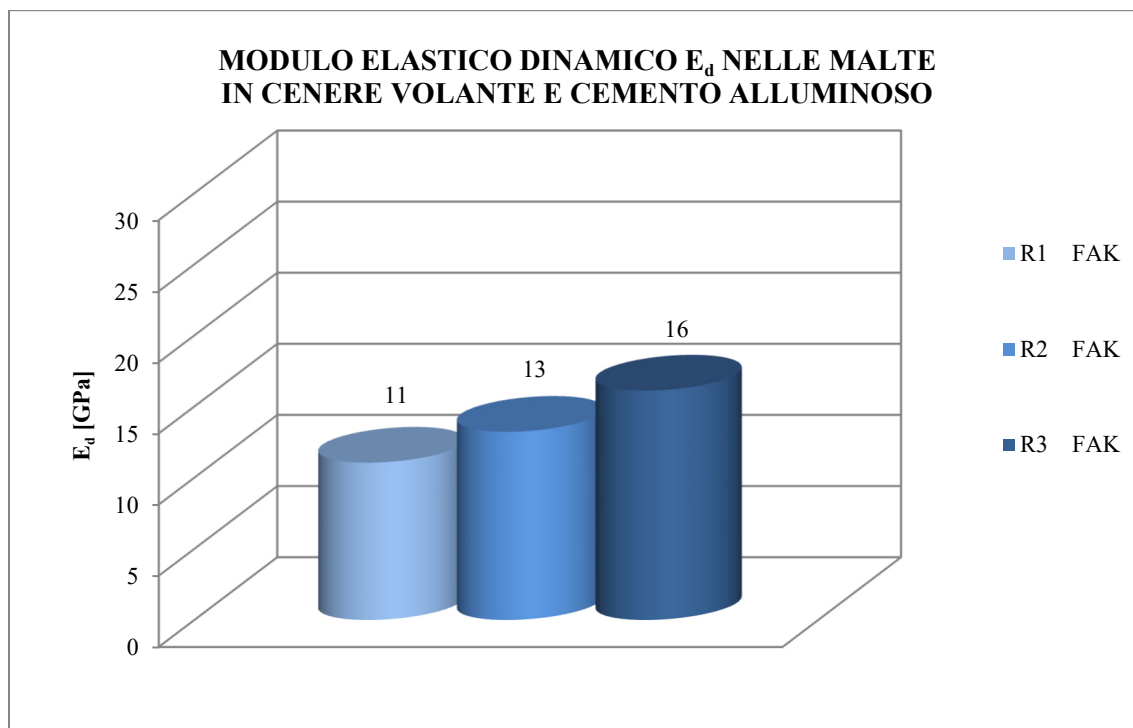


Figura 48 Grafico del modulo elastico dinamico dopo 28 giorni di stagionatura. Malte geopolimeriche a base di cenere volante e cemento alluminoso.

Confrontando le diverse composizioni a parità di classe di resistenza si nota che il modulo elastico E_d nelle malte cementizie risulta più elevato rispetto alle malte geopolimeriche in tutte e tre le classi di resistenza. Mentre per le malte geopolimeriche nella classe R1 il metacaolino risulta inferiore, invece le malte in cenere volante e cenere volante-cemento alluminoso presentano valori all'incirca uguali e superiori al metacaolino (Figura 49). Nella classe R2 allo stesso modo il metacaolino si mostra inferiore mentre le altre due malte hanno valori che si differenziano di poco (Figura 50). Infine nella classe R3 si nota una situazione diversa, in quanto il metacaolino e la cenere volante-cemento alluminoso hanno valori quasi identici, d'altro canto la malta di cenere volante è di valore inferiore ad essi (Figura 51).

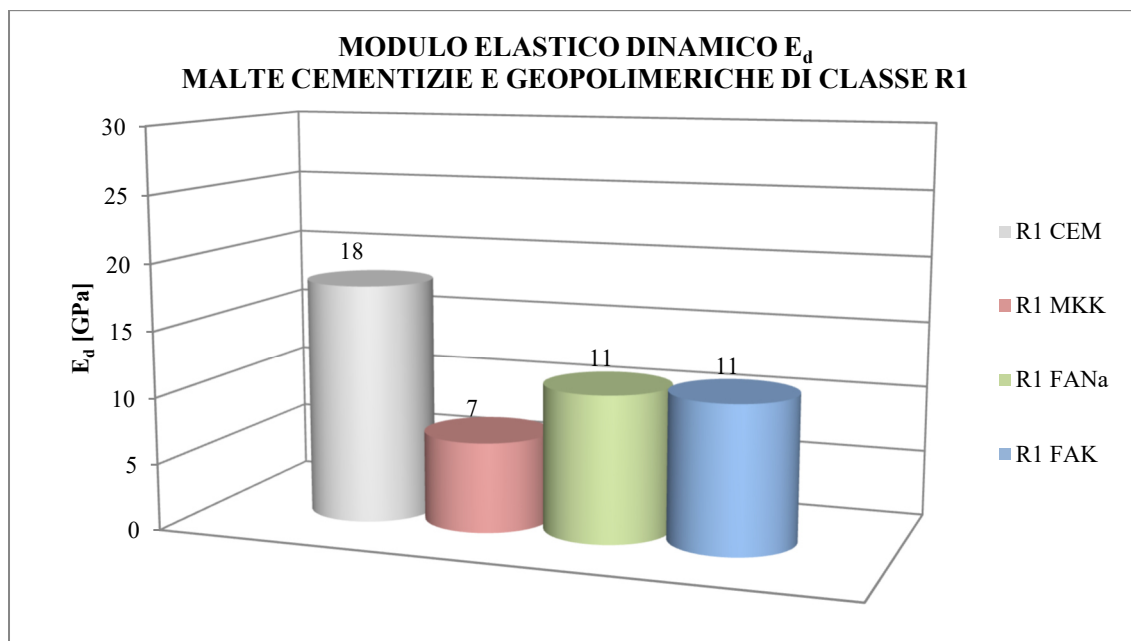


Figura 49 Modulo elastico dinamico E_d nelle malte cementizie e geopolimeriche di classe R1

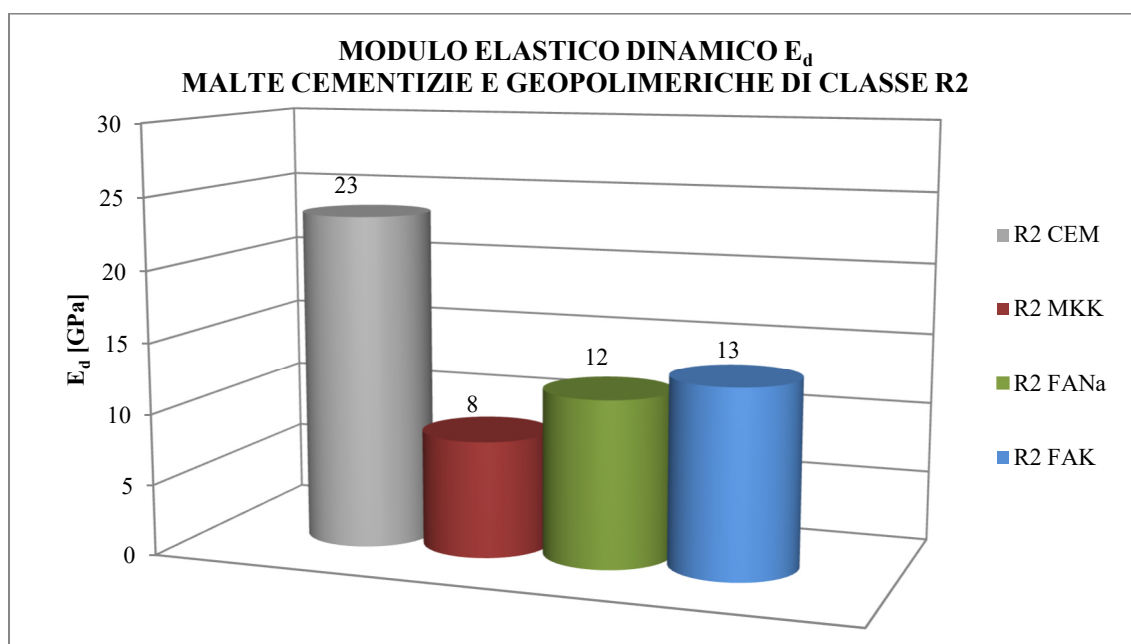


Figura 50 Modulo elastico dinamico E_d nelle malte cementizie e geopolimeriche di classe R2

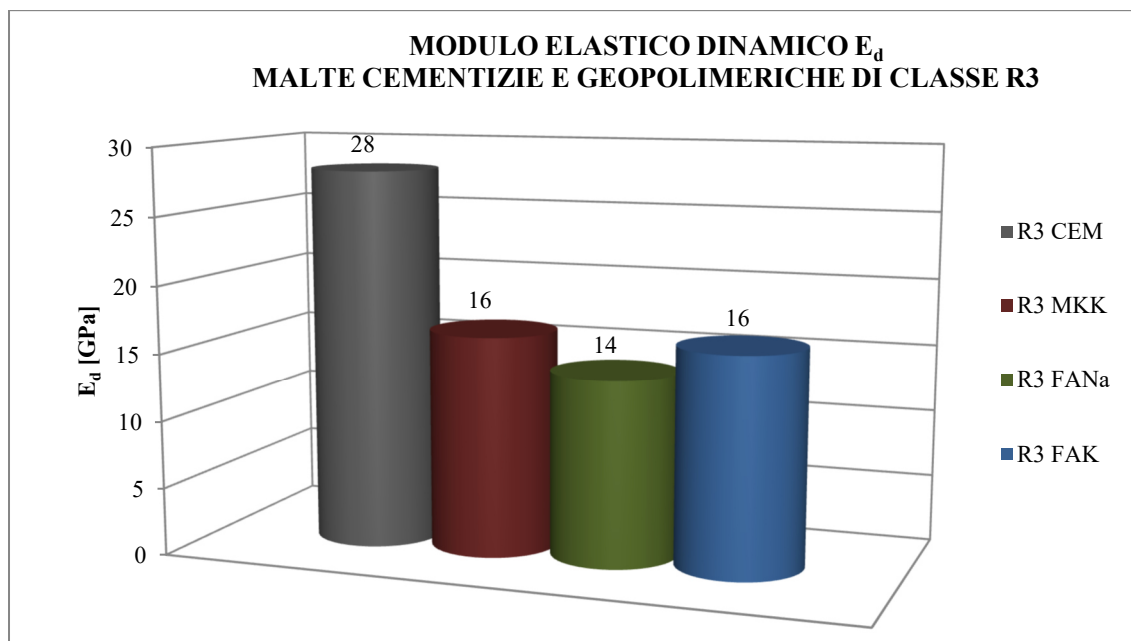


Figura 51 Modulo elastico dinamico E_d nelle malte cementizie e geopolimeriche di classe R3

6.4 Prove di aderenza

Una caratteristica fondamentale che caratterizza le malte idrauliche da intonaco è rappresentata dalla proprietà di aderenza al supporto di cui è costituito il manufatto per cui vengono utilizzate. In questo lavoro, questa caratteristica è stata studiata per l'importanza che essa ricopre nel processo di confronto tra composti cementizi e composti geopolimerici.

Quindi le malte prese in considerazione sono state confrontate tenendo conto della stima della loro tensione di aderenza, in cui si intende lo sforzo massimo di trazione caratteristico di ogni malta applicata al supporto, quando è sottoposta a carico diretto perpendicolare.

La normativa che in particolare tratta questo argomento è la norma UNI EN 1504-1, che prescrive per le malte di classe R1, R2 e R3 determinate caratteristiche di aderenza misurate secondo quanto dettato dalla norma UNI

EN 1542, ovvero tramite misurazione dell'aderenza al supporto della malta tramite trazione diretta.

In questa tesi verranno utilizzate le tecniche di collaudo della norma UNI EN 1015-12; cioè tecniche che coinvolgono la stima della tensione di aderenza successiva alla prova di carico diretto.

La realizzazione dei provini destinati alla misura di aderenza prevede l'utilizzo di supporti adeguati (blocchi in calcestruzzo 150x150x150 mm in questa ricerca), sopra i quali verranno realizzati per ognuno 4 campioni cilindrici di malta.

I provini sono stati eseguiti su blocchi di calcestruzzo che inizialmente sono stati immersi in un recipiente pieno di acqua per circa 24 ore. Sono stati estratti almeno un'ora prima dell'applicazione di provini e lasciati asciugare superficialmente. Con questo processo i supporti si presentavano saturi di acqua. Sopra i blocchi sono stati realizzati dei campioni di malte cilindrici (formati da anelli di cloruro di polivinile) di 50 mm di diametro e 10 mm di altezza, come dettato dalla normativa, distanziati tra loro.

Sempre nel rispetto della normativa, sono stati realizzati 5 campioni cilindrici per ogni malta e per ogni classe di resistenza. Per realizzarli si è applicata malta fresca, versata all'interno di anelli in PVC e compattata per poi essere rasata per eliminare l'impasto in eccesso e rendere il provino più regolare possibile.

La fase successiva è stata quella della conservazione e della stagionatura, descritta di seguito.

I provini realizzati sono stati ben avvolti con pellicola di cellulosa e mantenuti per 7 giorni successivi in una cella climatizzata alla temperatura di $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e a un'umidità relativa al $95\% \pm 5\%$. Dopo 7 giorni, la

pellicola è stata tolta e si è proceduto ad un ulteriore periodo di stagionatura per 21 giorni, all'interno della cella climatizzata, alla stessa temperatura, ma con una variazione di valori di umidità, che in questo caso erano pari al 50% $\pm$ 5%.

Il principio su cui si basa la prova di aderenza, è la determinazione della forza di adesione tramite la rilevazione dello sforzo massimo di trazione mediante un carico diretto perpendicolare alla superficie della malta applicata sul blocco in calcestruzzo. La forza di trazione viene restituita alla malta attraverso una piastra che viene incollata sulla superficie dello strato di malta già stagionato applicato sul supporto.

Le piastre di connessione tra l'apparecchiatura di collaudo e i provini sono piastre in alluminio a cilindro che hanno un diametro di $50 \pm 0,1$ mm e altezza superiore ai 10 mm; esse sono fornite di un dispositivo centrale di raccordo agli strumenti per la trazione diretta (Figura 52).



Figura 52 Piastre in alluminio utilizzate nella prova di aderenza

Queste piastre, una volta che la malta ha raggiunto i 28 giorni di maturazione, sono state incollate sulle superfici dei campioni di malta tramite adesivi a base di resina epossidica bicomponente, con particolare attenzione lasciando

il bordo di pvc che è stato utilizzato per la campionatura, al fine di evitare la caduta della resina nei punti di giunzione tra la malta e il calcestruzzo.

Il dispositivo centrale di raccordo delle piastre in acciaio è costituito da un foro filettato, al quale viene fissato un perno a vite, a sua volta bloccato ad un cavo di acciaio, collegato adeguatamente al pistone della pressa (Figura 53).



Figura 53 Perno a vite con cavo di trazione

Il sistema malta-calcestruzzo è stato centrato al meglio sulla piastra di appoggio del macchinario da pressa, allo scopo di garantire una forza di trazione perpendicolare per evitare la generazione di carichi eccentrici e ad essa fissato tramite morsetti agenti sulla superficie superiore del blocco in calcestruzzo.

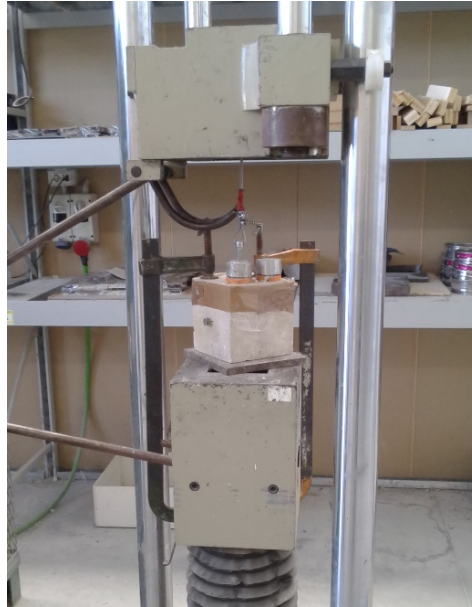


Figura 54 Provino sottoposto al macchinario da pressa

Il collaudo definitivo è stato eseguito applicando la forza di trazione perpendicolare tramite le piastre di estrazione su cui agisce la pressa idraulica (Figura 54). La forza è stata applicata gradualmente e senza strappi, utilizzando incrementi di carico tali da ottenere un aumento di sforzo di velocità compresa tra $0,003 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ e $0,100 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$, e in modo che il distacco avvenga in un tempo compreso tra i 20 s e i 60 s.

Inoltre è stato collegato alla cella di carico della pressa un computer che ha letto e registrato la forza di distacco.

Le possibili modalità di rottura ottenibili e riconducibili a risultati validi sono le seguenti:

- Tipologia A - Frattura di adesione, ovvero una frattura all'interfaccia tra la malta ed il supporto. Il valore di prova ottenuto tramite frattura di adesione è uguale alla forza di adesione (Figura 55).

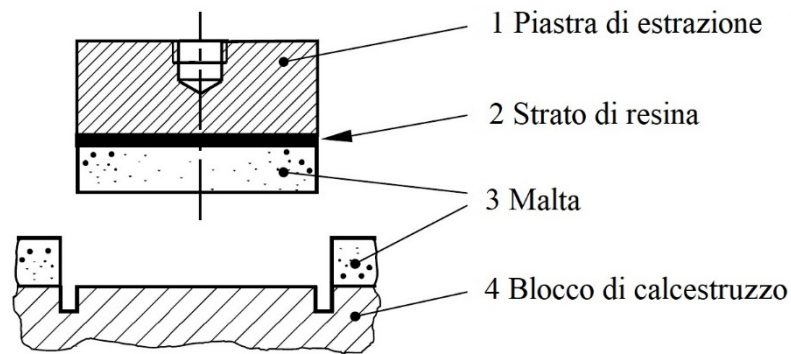


Figura 55 Frattura di adesione. Tipologia A

- Tipologia B - Frattura di coesione, ovvero una frattura all'interno della malta stessa. La forza di adesione è maggiore del valore di prova ottenuto per frattura di coesione (Figura 56).

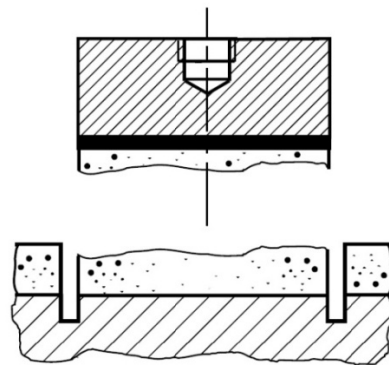


Figura 56 Frattura di coesione. Tipologia B

- Tipologia C - Frattura di coesione del supporto, ovvero una frattura dello strato superficiale del blocco di calcestruzzo connesso alla malta.

Un ulteriore caso in cui la forza di adesione è maggiore del valore di prova (Figura 57).

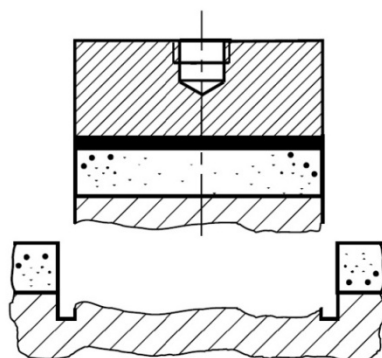


Figura 57 Frattura di coesione del supporto. Tipologia C

Nel caso di fratture prodottesi sotto forma di fratture di coesione, i risultati ottenuti sono stati considerati come valori limite inferiori. In ogni caso, tutti i valori ottenuti dalle tipologie di frattura sopra riportate sono stati utilizzati per il calcolo del valore medio della forza di adesione (come prescritto dalla normativa UNI EN 1015-12). Per il calcolo della tensione di adesione caratteristica di una sessione di prova è stato, perciò, preso il valore medio ottenuto esclusivamente dalle rotture di tipologia A, ovvero le rotture di adesione, nel caso di disponibilità.

Nel momento in cui c'è stata mancata disponibilità di valori riconducibili a rotture di tipologia A, è stata eseguita una media dei valori ottenuti dalle rotture di tipo B o C, escludendo dal calcolo il valore minimo e il valore massimo. La media così calcolata verrà considerata come la tensione di aderenza minima della malta, ovvero considerando la tensione di aderenza propria della malta sicuramente maggiore della suddetta media.

Nei fogli di calcolo sono stati comunque riportati i valori medi ottenuti da tutte le rotture di tipologia A, B e C (come da normativa), senza prendere in

considerazione i valori ottenuti dalle rotture di distacco dell'adesivo all'interfaccia tra la malta e la piastra di connessione.

La forza di adesione f_u (riportata in N/mm²) è stata successivamente calcolata tramite il rapporto

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

dove:

- F_u è il carico determinato alla rottura, misurato in N;
- A è l'area del provino cilindrico, riportata in mm².

I risultati sono riportati come media dei valori ottenuti dalle prove eseguite con successo sui 5 provini realizzati per ogni tipologia di malta, con un'accuratezza di 0,01 N/mm².

Le malte in leganti idraulici tradizionali presentano una capacità di aderenza proporzionale al rapporto calce idraulica/cemento ed eseguendo le prove di aderenza al supporto si nota che i valori della classe R1 sono di poco minori rispetto alla classe R2 e che quest'ultimi a loro volta si presentano minori di quelli ottenuti nella classe R3 (Tabelle 56-58, Figura 58).

Tabella 56 Tensione di aderenza. R1 CEM

R1 CEM							
	FORZA DI ADESIONE (MPa)						TENSIONE DI ADERENZA f_u (MPa)
	f_u I	f_u II	f_u III	f_u IV	f_u V	f_u M.A.	
VALORI SERIE	-	0,52	0,48	0,57	0,31	0,40	0,40
ROTTURA	Distacco Accidentale	B	A	B	A		

Tabella 57 Tensione di aderenza. R2 CEM

R2 CEM							
	FORZA DI ADESIONE (MPa)						TENSIONE DI ADERENZA f_u (MPa)
	f_u I	f_u II	f_u III	f_u IV	f_u V	f_u M.A.	
VALORI SERIE	0,32	0,63	0,45	0,45	0,39	0,45	0,45
ROTTURA	A	A	A	A	A		

Tabella 58 Tensione di aderenza. R3 CEM

R3 CEM							
	FORZA DI ADESIONE (MPa)						TENSIONE DI ADERENZA f_u (MPa)
	f_u I	f_u II	f_u III	f_u IV	f_u V	f_u M.A.	
VALORI SERIE	0,63	0,73	0,60	0,63	0,56	0,63	0,63
ROTTURA	A	A	A	A	A		

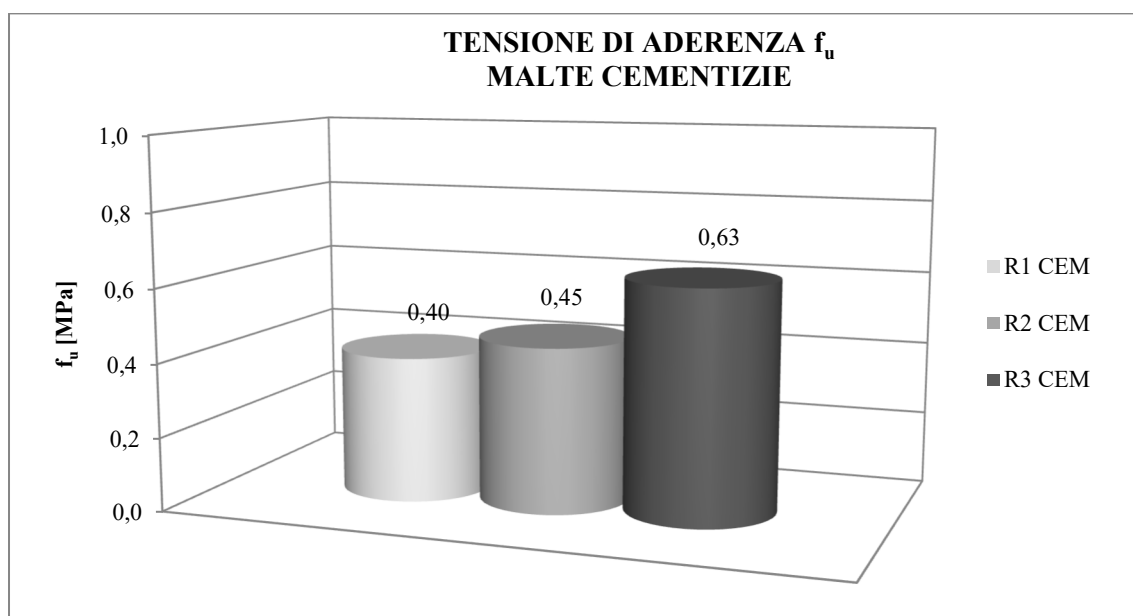


Figura 58 Tensione di aderenza per le malte cementizie

Nelle malte geopolimeriche in metacaolino la tensione di aderenza si presenta con valori bassi e con una differenza di pochi punti per le classi R1 e R2, mentre il valore nella classe R3 è quasi il doppio delle altre due classi. Per tutte le classi di resistenza si sono ottenute rotture di tipo A, ovvero una frattura all'interfaccia tra la malta e il supporto (Tabelle 59-61, Figura 59).

Tabella 59 Tensione di aderenza. R1 MKK

R1 MKK							
	FORZA DI ADESIONE (MPa)						TENSIONE DI ADERENZA f_u (MPa)
	f_u I	f_u II	f_u III	f_u IV	f_u V	f_u M.A.	
VALORI SERIE	0,15	0,14	0,38	0,24	0,27	0,24	0,24
ROTTURA	A	A	A	A	A		

Tabella 60 Tensione di aderenza. R2 MKK

R2 MKK							
	FORZA DI ADESIONE (MPa)						TENSIONE DI ADERENZA f_u (MPa)
	f_u I	f_u II	f_u III	f_u IV	f_u V	f_u M.A.	
VALORI SERIE	0,38	0,34	0,15	0,32	0,20	0,28	0,28
ROTTURA	A	A	A	A	A		

Tabella 61 Tensione di aderenza. R3 MKK

R3 MKK							
	FORZA DI ADESIONE (MPa)						TENSIONE DI ADESIONE f_u (MPa)
	f_u I	f_u II	f_u III	f_u IV	f_u V	f_u M.A.	
VALORI SERIE	0,38	0,48	0,58	0,38	0,41	0,44	0,44
ROTTURA	A	A	A	A	A		

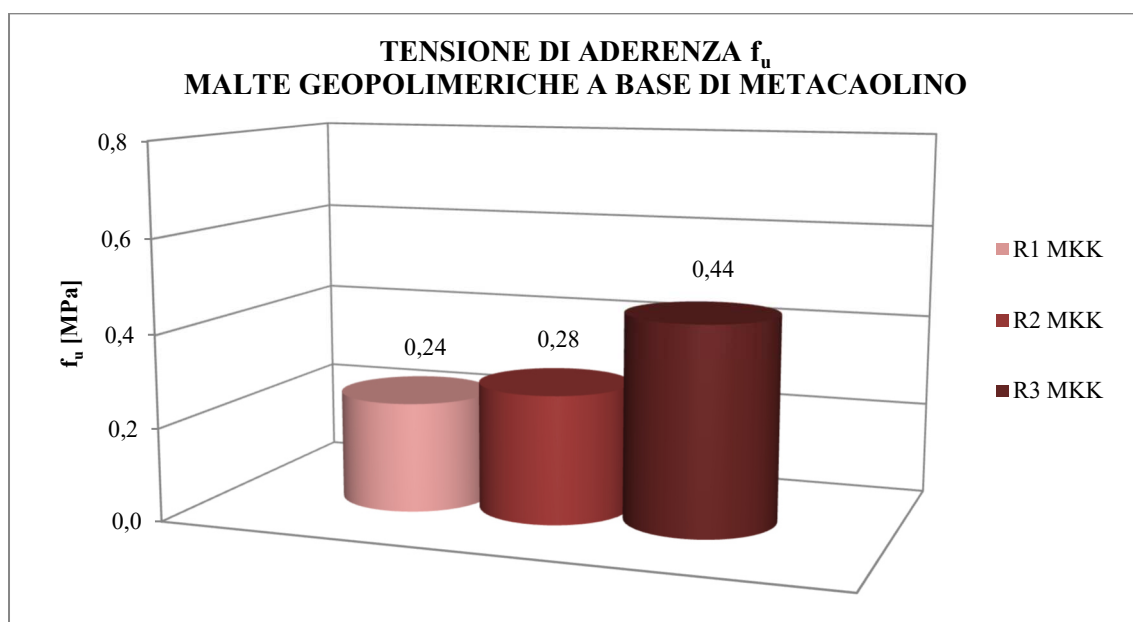


Figura 59 Tensione di aderenza per le malte geopolimeriche a base di metacaolino

Le malte in cenere volante hanno mostrato esclusivamente rotture di tipo B, ovvero fratture di coesione all'interno della malta stessa. I valori di aderenza si presentano più alti nella classe R2, si abbassano leggermente nella classe R1 e si mostrano notevolmente bassi nella classe R3 (Tabelle 62-64, Figura 60).

Tabella 62 Tensione di aderenza. R1 FANa

R1 FANa							
	FORZA DI ADESIONE (MPa)						TENSIONE DI ADERENZA f_u (MPa)
	f_u I	f_u II	f_u III	f_u IV	f_u V	f_u M.A.	
VALORI SERIE	0,15	0,22	0,27	0,21	0,24	0,22	0,22
ROTTURA	B	B	B	B	B		

Tabella 63 Tensione di aderenza. R2 FANa

R2 FANa							
	FORZA DI ADESIONE (MPa)						TENSIONE DI ADERENZA f_u (MPa)
	f_u I	f_u II	f_u III	f_u IV	f_u V	f_u M.A.	
VALORI SERIE	0,30	0,24	0,41	0,37	0,26	0,31	0,31
ROTTURA	B	B	B	B	B		

Tabella 64 Tensione di aderenza. R3 FANa

R3 FANa							
	FORZA DI ADESIONE (MPa)						TENSIONE DI ADERENZA f_u (MPa)
	f_u I	f_u II	f_u III	f_u IV	f_u V	f_u M.A.	
VALORI SERIE	0,17	0,19	0,19	0,17	0,13	0,18	0,18
ROTTURA	B	B	B	B	B		

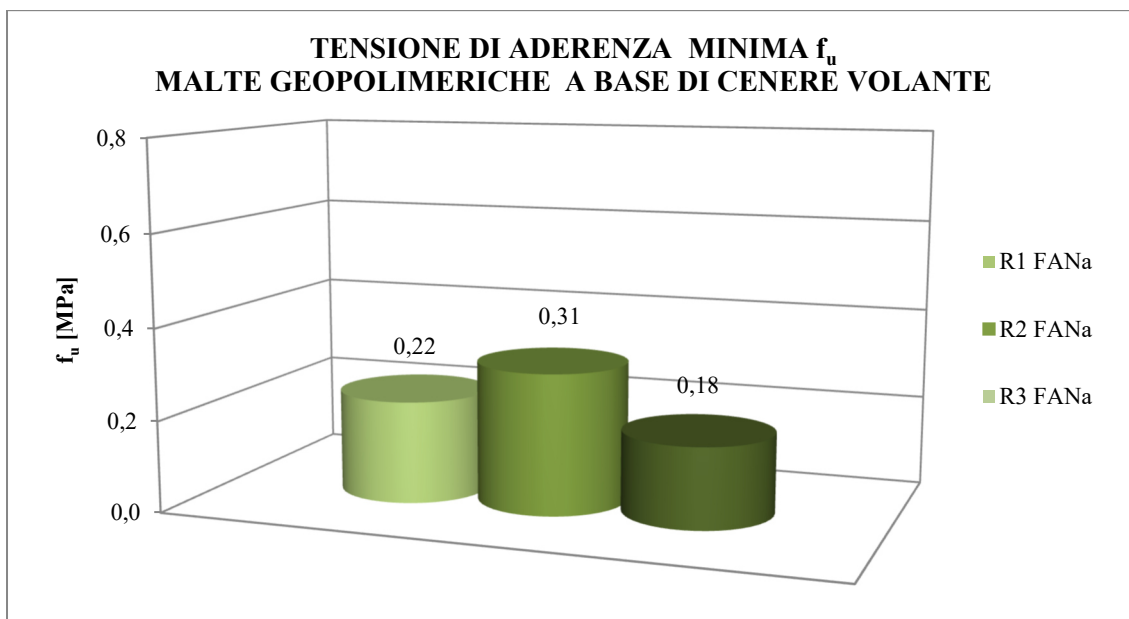


Figura 60 Tensione di aderenza per le malte geopolimeriche a base di cenere volante

Le malte geopolimeriche in cenere volante e cemento alluminoso nelle prove di aderenza hanno mostrato rotture di tipo A, ovvero una frattura all'interfaccia tra la malta e il supporto (Tabelle 65-67, Figura 61). I valori di aderenza si sono presentati minori nella classe R2 e di poco più alti nella classe R1, mentre la classe R3 ha un valore più alto rispetto alle altre due classi.

Tabella 65 Tensione di aderenza. R1 FAK

R1 FAK							
	FORZA DI ADESIONE (MPa)						TENSIONE DI ADERENZA f_u (MPa)
	f_u I	f_u II	f_u III	f_u IV	f_u V	f_u M.A.	
VALORI SERIE	0,20	0,17	-	0,17	0,14	0,17	0,17
ROTTURA	A	A	Distacco Accidentale	A	A		

Tabella 66 Tensione di aderenza. R2 FAK

R2 FAK							
	FORZA DI ADESIONE (MPa)						TENSIONE DI ADERENZA f_u (MPa)
	f_u I	f_u II	f_u III	f_u IV	f_u V	f_u M.A.	
VALORI SERIE	0,18	0,24	0,16	0,13	0,09	0,16	0,16
ROTTURA	A	A	A	A	A		

Tabella 67 Tensione di aderenza. R3 FAK

R3 FAK							
	FORZA DI ADESIONE (MPa)						TENSIONE DI ADERENZA f_u (MPa)
	f_u I	f_u II	f_u III	f_u IV	f_u V	f_u M.A.	
VALORI SERIE	0,09	0,18	0,24	0,20	0,45	0,24	0,24
ROTTURA	A	A	A	A	A		

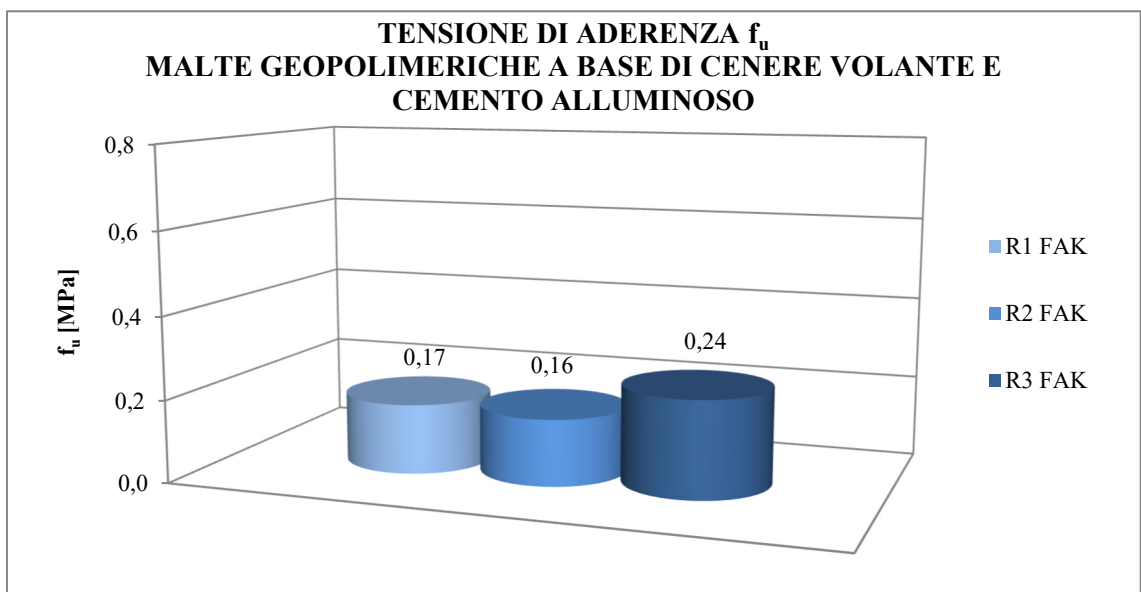


Figura 61 Tensione di aderenza per le malte geopolimeriche a base di cenere volante e cemento alluminoso

6.5 Considerazioni finali

Nello studio condotto nella presente tesi, riguardo alla caratterizzazione meccanica delle malte cementizie, delle malte geopolimeriche e dal loro confronto, si sono ottenuti dei dati che hanno permesso di dedurre alcune considerazioni riguardo le resistenze (a flessione e a compressione) (Figure 62-65, tabella 68).

Le malte geopolimeriche di classi R1 e R2 presentano degli sviluppi simili per quanto riguarda le resistenze meccaniche a flessione dopo 28 giorni di stagionatura a differenza delle malte cementizie che ottengono valori leggermente maggiori. Per la classe R3 invece solo le malte in cenere volante (FANa) (e FAK mostrano) resistenze a flessione simili, mentre per le malte in metacaolino e le malte cementizie mostrano delle resistenze a flessione leggermente superiori dopo i 28 giorni di stagionatura.

È importante notare che dopo 7 giorni di stagionatura in generale, si hanno delle resistenze a flessione pressoché massime per tutte le tipologie di malte

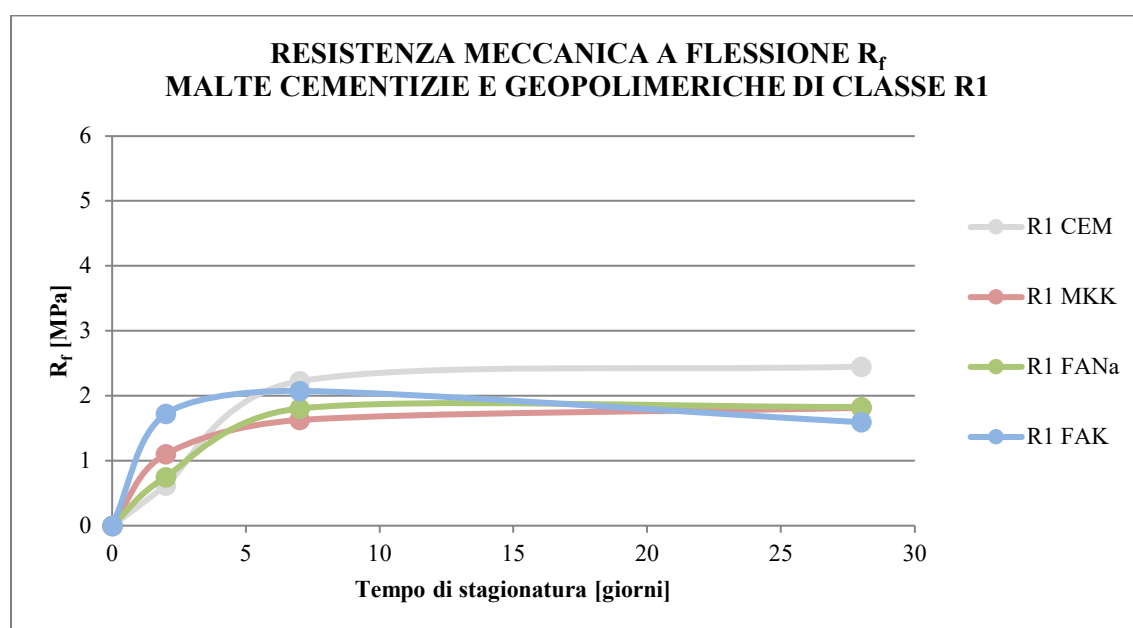


Figura 62 Resistenza meccanica a flessione. Malte cementizie e geopolimeriche di classe R1

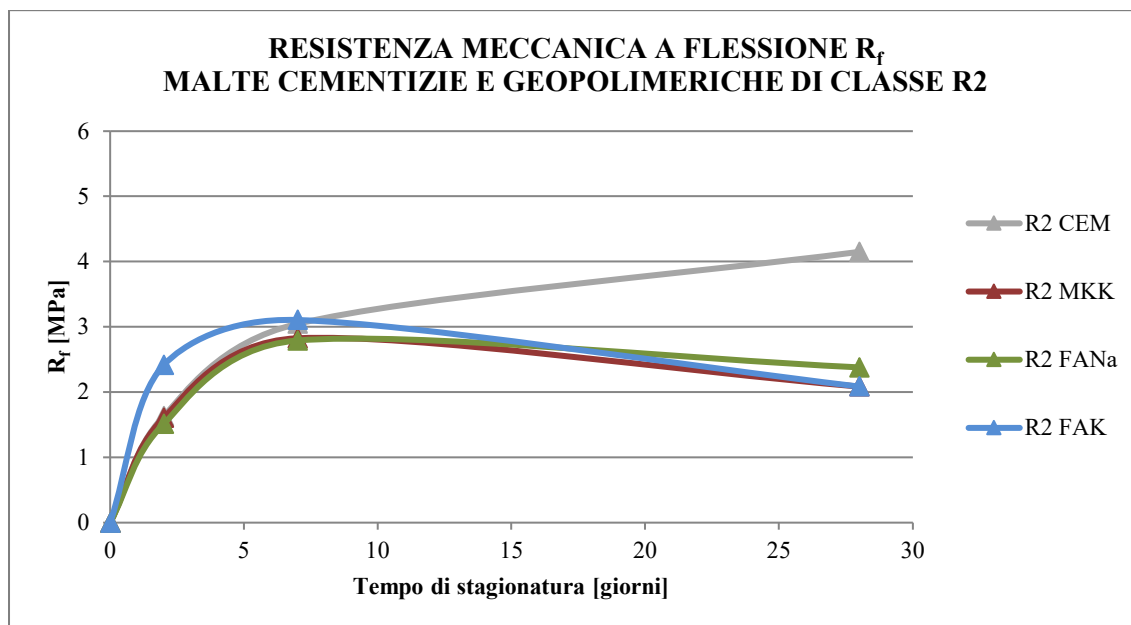


Figura 63 Resistenza meccanica a flessione. Malte cementizie e geopolimeriche di classe R2

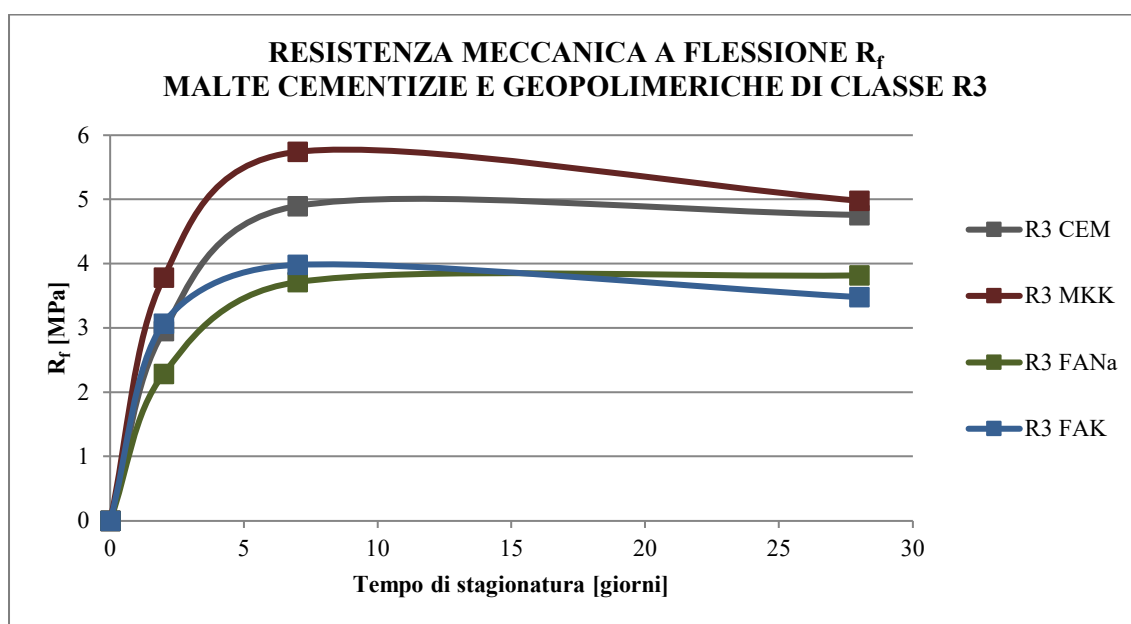


Figura 64 Resistenza meccanica a flessione. Malte cementizie e geopolimeriche di classe R3

Tabella 68 Riepilogo delle resistenze meccaniche a flessione per le malte cementizie e geopolimeriche

	GIORNI DI MATURAZIONE				
	2		7		28
	R _f [MPa]	% R _f a 28 gg	R _f [MPa]	% R _f a 28 gg	R _f [MPa]
R1 CEM	0,6	25%	2,2	92%	2,4
R2 CEM	1,6	38%	3,1	74%	4,2
R3 CEM	2,9	60%	4,9	102%	4,8
R1 MKK	1,1	61%	1,6	89%	1,8
R2 MKK	1,6	76%	2,8	133%	2,1
R3 MKK	3,8	76%	5,7	114%	5,0
R1 FANa	0,7	39%	1,8	100%	1,8
R2 FANa	1,5	63%	2,8	117%	2,4
R3 FANa	2,3	61%	3,7	97%	3,8
R1 FAK	1,7	106%	2,1	131%	1,6
R2 FAK	2,4	114%	3,1	148%	2,1
R3 FAK	3,1	89%	4,0	114%	3,5

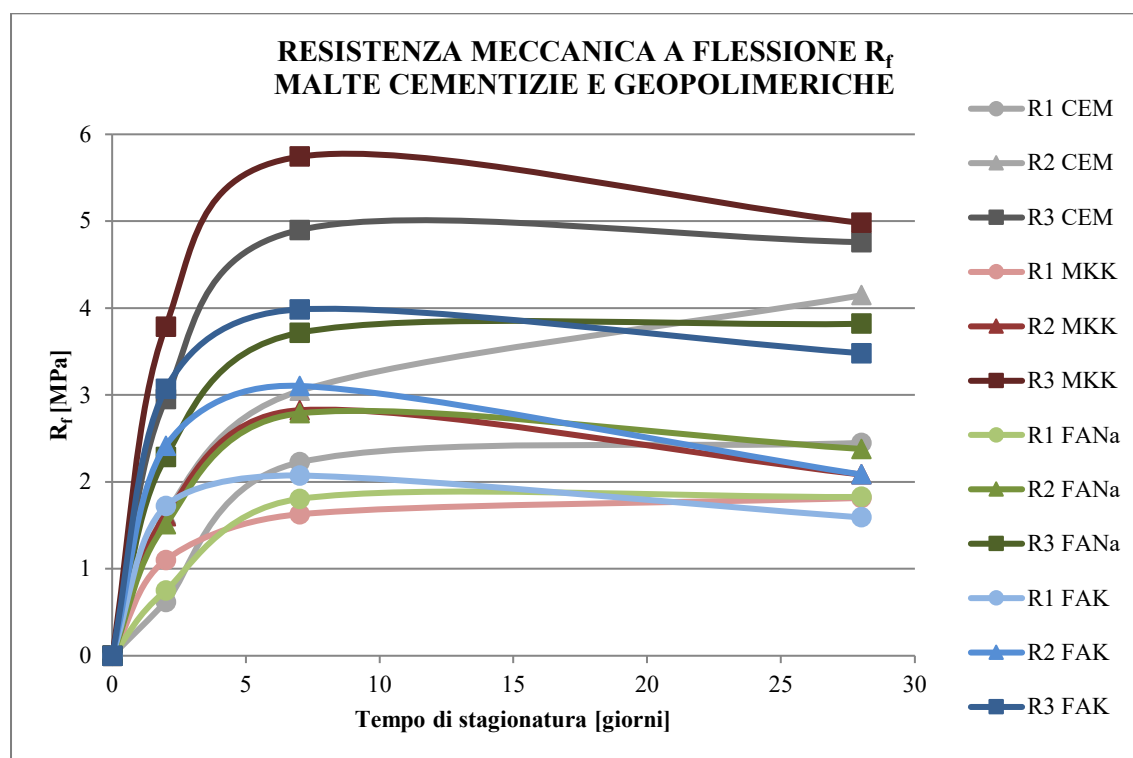


Figura 65 Resistenza meccanica a flessione nelle malte cementizie e geopolimeriche

Le resistenze meccaniche a compressione confermano quanto visto per la resistenza a flessione, infatti le malte cementizie nelle classi R1 e R2 hanno resistenze leggermente maggiori delle malte geopolimeriche che hanno tutte pressoché lo stesso andamento (Figure 66-69, Tabella 69).

Mentre per la classe R3 risulta che la malta cementizia e la malta in metacaolino mostrano resistenze maggiori dopo 28 giorni rispetto alle malte in cenere volante.

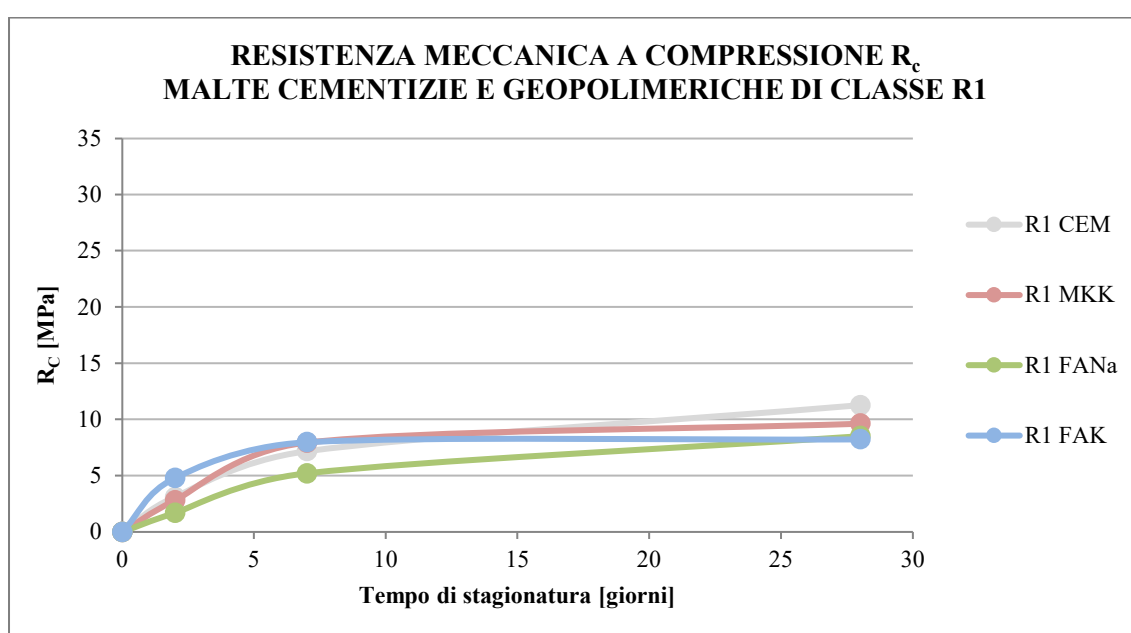


Figura 66 Resistenza meccanica a compressione. Malte cementizie e geopolimeriche di classe R1

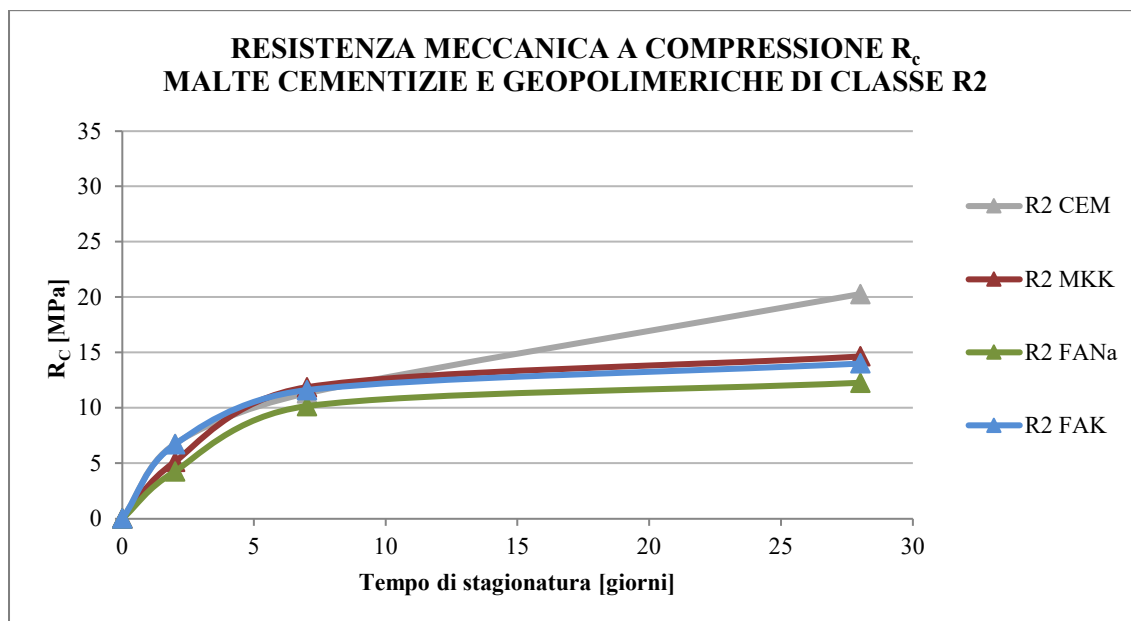


Figura 67 Resistenza meccanica a compressione. Malte cementizie e geopolimeriche di classe R2

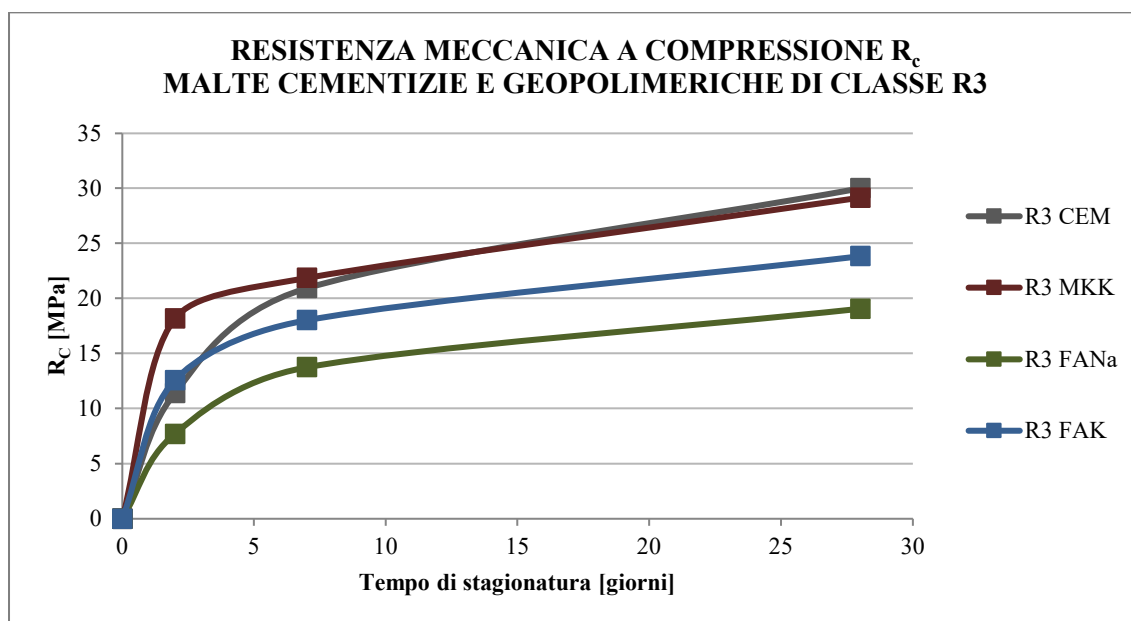


Figura 68 Resistenza meccanica a compressione. Malte cementizie e geopolimeriche di classe R3

Tabella 69 Riepilogo delle resistenze meccaniche a compressione nelle malte cementizie e geopolimeriche

	GIORNI DI MATURAZIONE				
	2		7		28
	R _c [MPa]	% R _c a 28 gg	R _c [MPa]	% R _c a 28 gg	R _c [MPa]
R1 CEM	3,1	27%	7,2	64%	11,3
R2 CEM	6,7	33%	11,3	56%	20,3
R3 CEM	11,4	38%	20,9	70%	29,9
R1 MKK	2,8	29%	7,9	82%	9,6
R2 MKK	5,1	35%	11,9	81%	14,6
R3 MKK	18,2	63%	21,9	75%	29,1
R1 FANa	1,7	20%	5,2	61%	8,5
R2 FANa	4,3	35%	10,2	83%	12,3
R3 FANa	7,7	40%	13,7	72%	19,1
R1 FAK	4,8	58%	8,00	96%	8,3
R2 FAK	6,7	48%	11,6	83%	14,0
R3 FAK	12,5	53%	18,0	76%	23,8

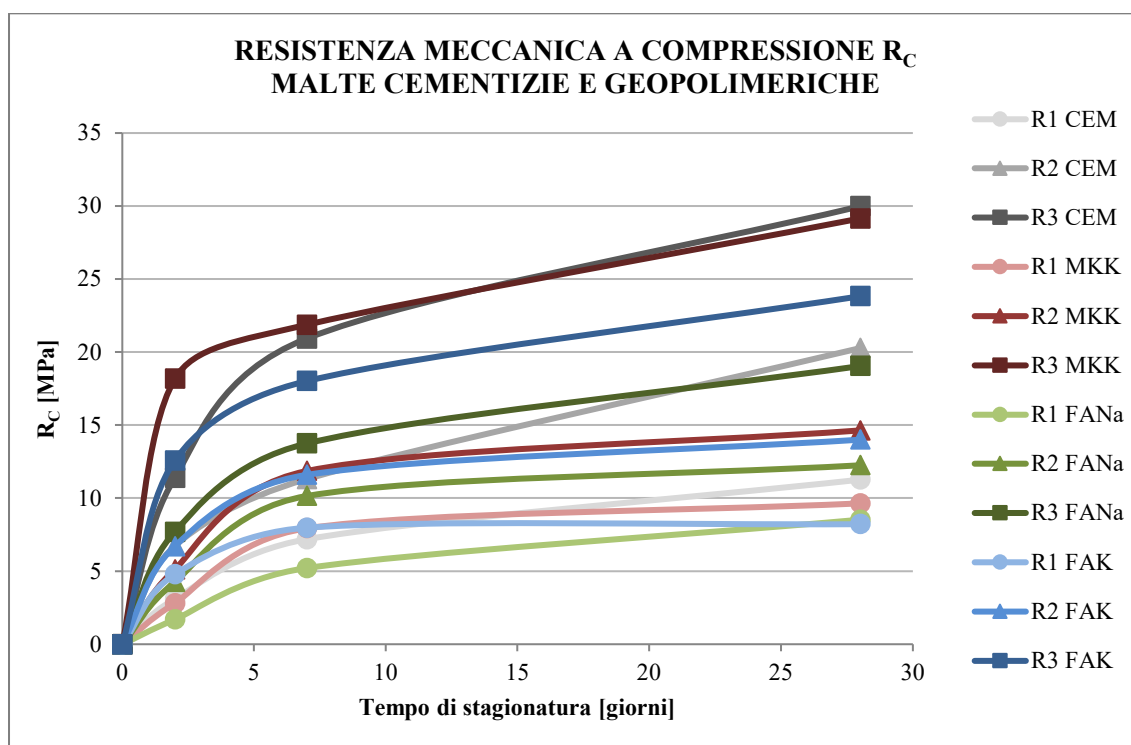


Figura 69 Resistenza meccanica a compressione nelle malte cementizie e geopolimeriche

Da questo studio, per quanto riguarda la tensione di aderenza, è emerso quanto segue (Figura 70).

Per la classe R3, nelle malte geopolimeriche a base di metacaolino emergono delle tensioni inferiori di circa il 30% rispetto alle malte cementizie. Invece nella classe R2 si nota che nelle malte geopolimeriche a base di cenere volante ci sono delle tensioni inferiori del 30% rispetto a quella cementizia. Infine nella classe R1 risulta che la malta in metacaolino ha una percentuale di circa il 40%, mentre le altre hanno delle percentuali maggiori, rispetto alla malta cementizia.

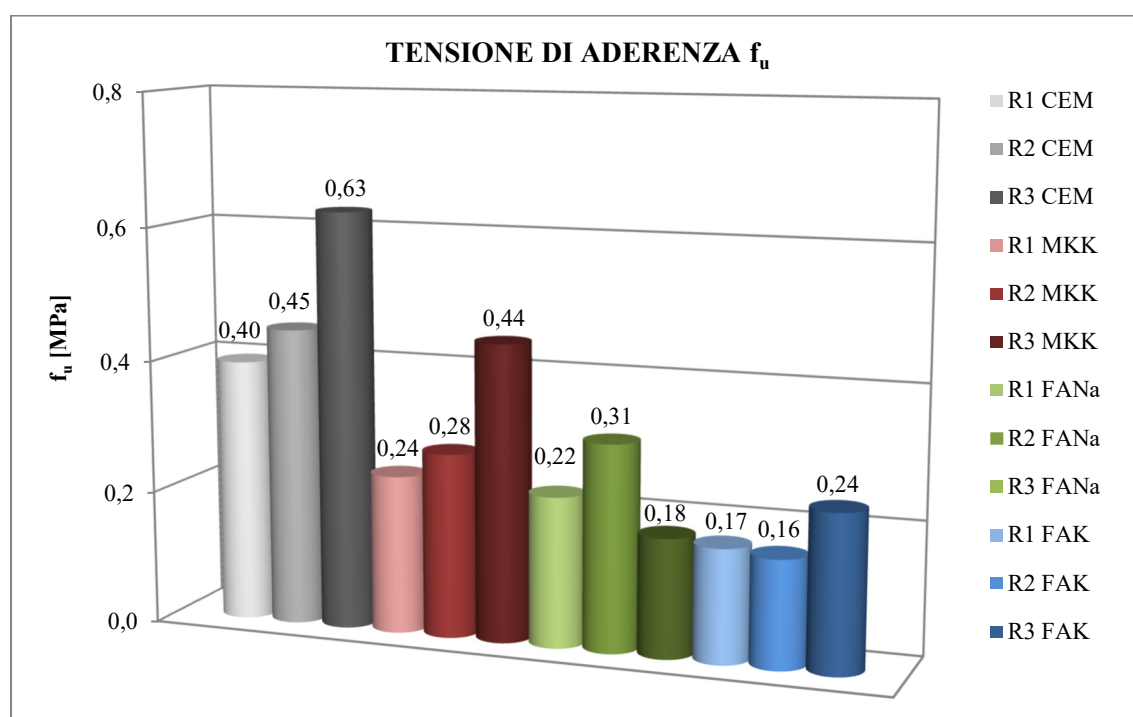


Figura 70 Tensione di aderenza nelle malte cementizie e geopolimeriche

Capitolo 7

Porosimetria: analisi e confronti

7.1 Introduzione

La porosimetria è una tecnica che permette di misurare alcune caratteristiche di un materiale che si manifestano con la presenza di pori come il diametro dei pori, l'area superficiale, il volume totale dei pori, la densità di bulk e la densità assoluta. Spesso il liquido utilizzato è il mercurio, per questo viene chiamata “porosimetria ad intrusione di mercurio”.

La porosità è una delle caratteristiche che influenzano maggiormente le proprietà di un materiale da costruzione e che contribuisce a confluire le potenzialità applicative in un ambito piuttosto che in un altro. Dalla porosità è possibile individuare la presenza di proprietà traspiranti dal materiale generico (la malta in questo caso), ovvero la sua propensione alla permeabilità al vapore acqueo, ma anche la capacità del materiale nel trasportare, al suo interno, elementi e composti chimici nocivi per la matrice (elementi che possono provocare fenomeni di cristallizzazione espansivi e/o cedimenti strutturali), attraverso l'assorbimento di acqua.

Nello specifico, per comprendere meglio la natura di questi fenomeni, che influenzano le caratteristiche della durabilità della malta, si è fatto riferimento alla tecnica analitica chiamata porosimetria ad intrusione di mercurio.

Quest'ultima consiste in un metodo di rilevazione che permette di analizzare la porosità di un materiale e la quantifica in base a dati che riguardano il diametro dei pori, il volume totale dei pori, la loro area superficiale, la densità di bulk (che consiste nel rapporto tra la massa del solido e il volume totale da esso occupato) e la densità assoluta.

Nel presente capitolo di questo lavoro verranno approfonditi il concetto di porosità e gli studi eseguiti riguardanti la porosimetria, sulle proprietà degli impasti cementizi e geopolimerici. Infine le due tipologie oggetto di studio e osservazione verranno messe a confronto.

7.2 Porosità: definizione ed esecuzione delle prove

La porosità è una grandezza scalare che risulta di importanza fondamentale in diversi settori della scienza moderna e in maniera particolare nella chimica che riguarda i cementi. Questa viene sperimentalmente misurata tramite un valore che viene detto “porosità percentuale ϕ ”, e si individua dal rapporto tra il volume dei vuoti (pori) contenuti all’interno della pasta cementizia e il volume totale della stessa. Di seguito la formula:

$$\phi = \frac{V_v}{V_{tot}}$$

La presenza di pori all’interno di una miscela di malta definisce maggiormente il settore di utilizzo nel campo edilizio. Nel caso in cui vi è una elevata porosità nelle malte a cui viene richiesta una elevata resistenza, essa è considerata nociva perché contribuisce all’abbattimento delle capacità meccaniche. D’altro canto, la porosità viene ricercata nei materiali a cui si richiedono alte proprietà traspiranti, come ad esempio alcune malte da intonaco macro-porose.

Nell’esecuzione delle prove della presente ricerca, come accennato poc’anzi, si è utilizzata la tecnica della porosimetria ad intrusione di mercurio, che prevede l’infiltrazione del mercurio nel materiale soggetto a rilevazione, che non lo bagna, attraverso l’uso di un porosimetro (Figura 71).



Figura 71 Porosimetro a mercurio

La teoria che regola gli strumenti porosimetrici si basa su un principio fisico secondo il quale un liquido non reattivo e non bagnante, non penetra nei pori di un materiale fino a che non viene applicata una pressione sufficiente. In questa maniera, la dimensione dei pori presenti nel materiale può essere determinata in base alla pressione esterna necessaria per forzare il liquido in un poro, contro la forza opposta dalla tensione superficiale del liquido stesso.

I dati della porosità si elaborano partendo dal valore della pressione del liquido e secondo l'equazione di Washburn, che descrive il bilanciamento delle forze nei materiali aventi pori cilindrici.

Ovvero:

$$P_L - P_G = \frac{4 * \sigma * \cos \theta}{D_P}$$

Dove:

- P_L è la pressione del liquido rilevata, espressa in MPa;
- P_G è la pressione del gas presente all'interno dei pori, pari a 0 atm, in quanto il liquido viene introdotto nel campione posto sottovuoto;

- σ è la tensione superficiale del liquido, pari a 480 mN/m, (per il mercurio sottovuoto a 20°C);
- θ è l'angolo di contatto di intrusione del liquido, approssimato a 140° per il mercurio;
- D_P è il diametro dei pori, espresso in μm .

In base alle debite sostituzioni e approssimazioni, l'equazione di calcolo del Diametro dei pori D_P è data da:

$$D_P = \frac{1470 [kPa \cdot \mu m]}{P_L}$$

Per ogni incremento di pressione del liquido intrusivo viene, perciò, rilevato il volume incrementale dei pori (riportato in mm^3/g) e la dimensione dei pori interessati dalla rilevazione (in base al loro diametro, misurato in μm).

Questi due dati vengono, infine, graficizzati, così da elaborare la distribuzione porosimetrica caratteristica del materiale, in modo da poter stimare la quantità di pori di determinate dimensioni presenti nel composto in base alla presenza di punti di flesso nella curva ottenuta nel grafico.

7.2.1 Porosità nelle malte cementizie

I materiali cementizi usati, vengono in chimica, generalmente classificati come materiali porosi, in quanto in essi sono presenti micro-porosità, meso-porosità e macro-porosità.

A questo punto risulta chiaro che all'interno delle matrici cementizie sono presenti diverse tipologie di pori e si possono classificare come segue:

- Porosità da gel, come vengono definite le micro-porosità presenti all'interno dei prodotti idratati del cemento. Le dimensioni dei pori rientranti in questa categoria si collocano tra gli 0,5 nm e i 10 nm, e il

volume da loro occupato è costituito da circa un terzo del volume occupato dai prodotti idratati propri della malta.

- Porosità capillare, comprendente meso-porosità di dimensioni comprese fra i 10 nm e 1 μm (1000 nm) e di forma irregolare. In questa categoria rientrano le porosità presenti tra i prodotti idratati del cemento, e la loro presenza più o meno accentuata è proporzionalmente legata al rapporto acqua/cemento.
- Macro-porosità, ovvero la presenza di macro-vuoti causata da una incompleta espulsione dell'aria nella miscela fresca, provocata da un'inadeguata azione di costipamento. I pori rientranti in questa categoria possiedono dimensioni notevoli (maggiori di 1 μm) e sono visibili anche a occhio nudo.
- Porosità degli inerti, di tipologia e dimensioni variabili a seconda dell'inerte utilizzato.

La frazione di calce idraulica, nelle malte cementizie, è caratteristica nel totale della polvere legante e si presenta notevolmente influente nello sviluppo delle porosità interne dei composti e in particolar modo sulla dimensione media dei pori in essi contenuti (Figure 72-73, Tabella 70).

Il rapporto calce/cemento influisce relativamente poco sulla presenza totale di vuoti all'interno delle miscele (dalla classe R1 alla classe R2 non si hanno variazioni apprezzabili dei valori delle porosità percentuali), ma ciò nonostante esso contribuisce ad aumentare il diametro medio dei pori del 34% passando da un rapporto pari a 0 a un rapporto pari a 1, e del 100% passando da un rapporto pari a 0 a un rapporto pari a 4.

Le porosità percentuali variano dal 18% (per la malta di classe R3) al 25% (per malta di classe R1).

Tabella 70 Porosità nelle malte cementizie

	POROSITÀ [%]	DIAMETRO MEDIO [nm]
R1 CEM	25	97,0
R2 CEM	24	64,5
R3 CEM	18	48,2

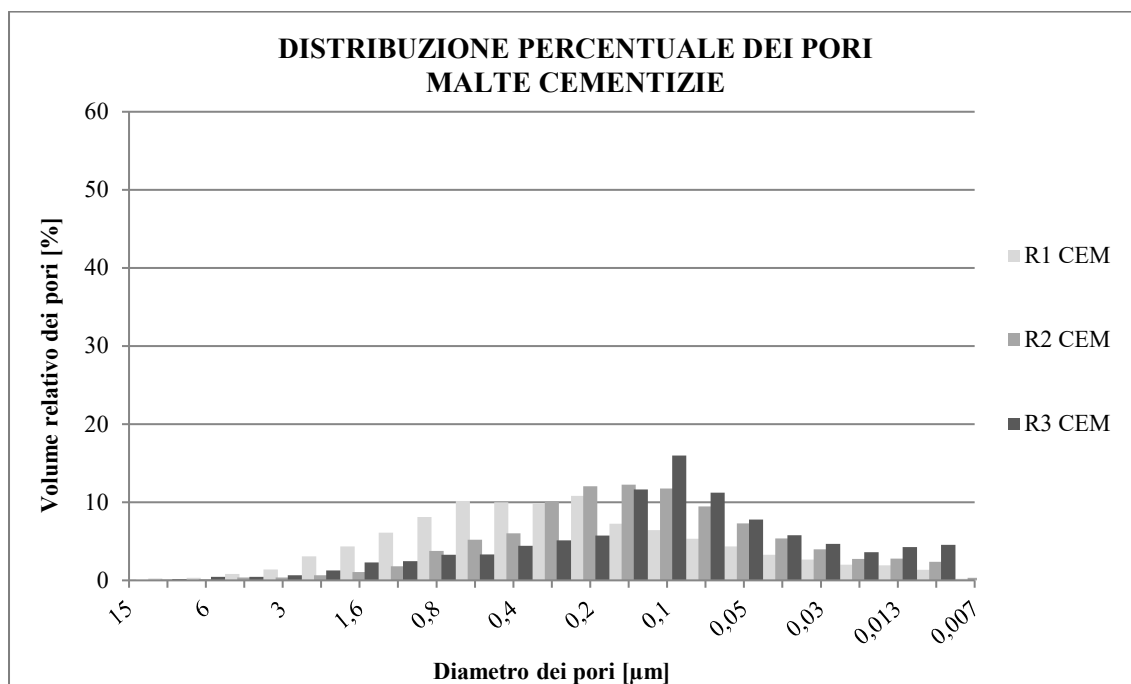


Figura 72 Distribuzione percentuale del diametro dei pori. Malte cementizie

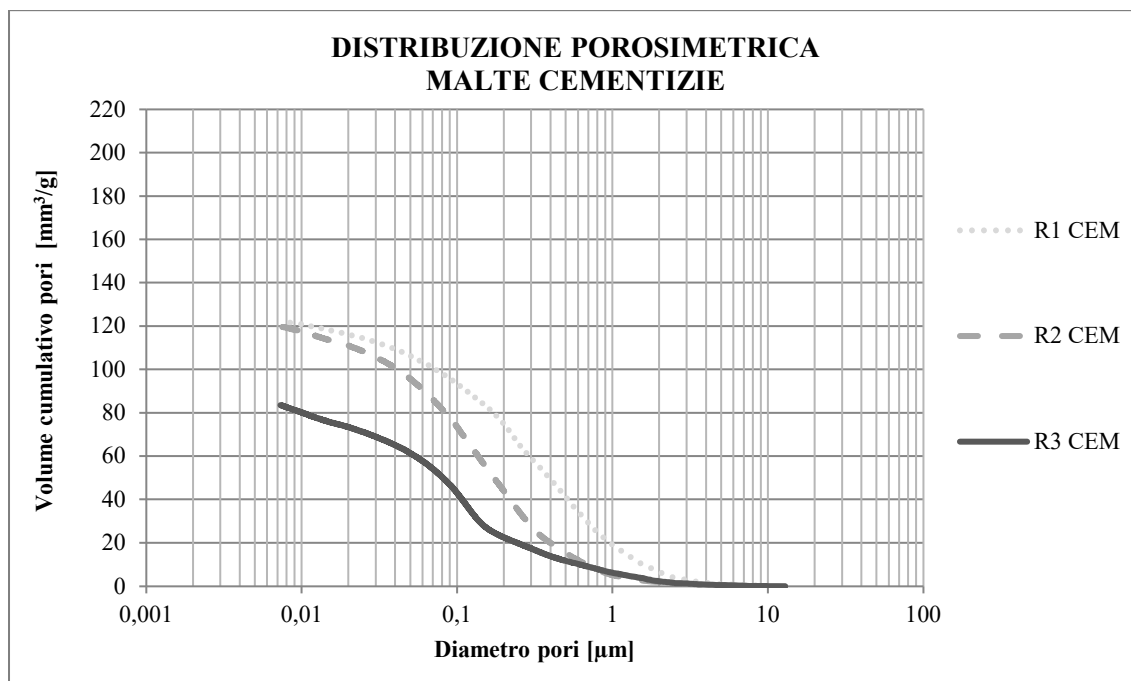


Figura 73 Distribuzione porosimetrica. Malte cementizie

7.2.2 Porosità nelle malte geopolimeriche

Anche le malte geopolimeriche indurite possono essere classificate come materiali porosi e come già analizzato, essi sono materiali costituiti da reticoli tridimensionali di alluminosilicati.

Grazie alla presenza di componenti alluminosilicatici reagenti in condizioni alcaline vengono formati i legami polimerici Al-O-Si-O. Questo comporta la formazione di un materiale geopolimerico finale costituito da nano-particelle con dimensioni variabili da 5 nm a 15 nm, con in mezzo dei nano-pori di dimensioni comprese tra i 3 nm e i 10 nm. Questo rende i composti geopolimerici fondamentalmente dei materiali nano-porosi.

La composizione chimica dell'impasto geopolimerico, e in particolare il dosaggio degli elementi chimici in esso presenti interviene ed agisce sulla formazione di cavità porose all'interno delle malte geopolimeriche interviene (come per altre proprietà tecniche già analizzate).

Nello specifico, meritano particolare attenzione i quantitativi di silicio e di alluminio, dirette funzioni delle tipologie di polveri alluminosilicatiche utilizzate, e il rapporto Si/Al. Questi due elementi influiscono in particolare sul processo di reazione dell'acqua di impasto all'interno dello sviluppo della geopolimerizzazione.

Nel processo di indurimento della pasta geopolimerica, l'acqua copre il ruolo di mezzo di reazione, e viene rilasciata durante la condensazione per formare pori e creare la struttura bifasica. La chimica della soluzione, e in particolare il rapporto atomico Si/Al e il tipo di catione di metallo alcalino, determinano la distribuzione dell'acqua all'interno del gel bifasico composito. Il volume assoluto dei pori è, invece, determinato dal contenuto nominale di acqua. Le dimensioni dei pori formati in un materiale interamente geopolimerico (resina geopolimerica) sono tanto piccole da classificare le porosità come parte dello scheletro della struttura, riducendo la sua densità effettiva e il volume accessibile dei pori.

Il rapporto Si/Al influisce anche sulla qualità della struttura della matrice geopolimerica analizzata. Da studi effettuati sulle micrografie ottenute mediante microscopia elettronica a scansione da matrici geopolimeriche a basso e alto rapporto Si/Al, è stato possibile rilevare le loro differenze di porosità in relazione al contenuto di silicio e alluminio.

Le differenze relative alle porosità maggiori sono essenzialmente nulle, e in gran parte influenzate dalla tecnica di impasto utilizzata. I risultati dell'analisi dei pori fini (ovvero di diametro inferiore ai 20 μm) effettuata tramite la porosimetria al mercurio, mostrano che in entrambi i casi il contributo dei pori di dimensioni superiori a 1 μm è trascurabile. Tuttavia, nel caso di matrici geopolimeriche con un elevato rapporto Si/Al ($1,5 < \text{Si/Al} < 2,5$), il volume cumulativo dei pori è inferiore, risultando pari a 250 mm^3/g , contro i 300 mm^3/g e superiori registrato per i geopolimeri con

rapporto Si/Al basso. Il diametro medio dei pori si presenta inferiore nelle paste geopolimeriche ad elevato rapporto Si/Al (attorno ai 18 nm), rispetto al diametro medio caratteristico dei pori nelle paste a ridotto rapporto Si/Al (attorno ai 31 nm). È stato, inoltre, provato come un elevato rapporto Si/Al contribuisca ad aumentare considerevolmente la frazione in volume dei micro-pori del geopolimero (vale a dire i pori di dimensione uguali o inferiori ai 15 nm circa).

Nella letteratura recente si riscontrano anche relazioni tra il quantitativo di frazione porosa e il rapporto $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ nelle miscele geopolimeriche. Questo valore di scoperta sperimentale viene attribuito al legame esistente tra l'aumento del contenuto di silice e la conseguente indisponibilità di un'adeguata quantità di ossido di sodio atta a garantirne la completa dissoluzione. Per tale motivo, le particelle non reagite di SiO_2 , permangono nel gel geopolimerico, generando successivamente una microstruttura porosa.

Quanto appena fornito è un quadro riassuntivo che fornisce informazioni chiare su come la struttura porosa del composto geopolimerico, e di conseguenza le sue proprietà traspiranti, siano diretta funzione dei macro-componenti chimici in esso contenuti, a loro volta funzione delle materie prime utilizzate come alluminosilicati e per il confezionamento delle soluzioni alcaline.

Per quanto riguarda le malte a base di metacaolino, possiamo dire che si nota un'elevata presenza di porosità di ridotte dimensioni (meso-porosità) all'interno di questa tipologia di legante.

Le porosità maggiori sono, perciò, contenute negli impasti con la presenza di dosaggi minori di KOH e la resistenza meccanica a compressione inferiore. Il volume totale dei vuoti, al contrario, si aggira intorno al 35% del volume della malta, indipendentemente dalla classe di resistenza.

Il diametro medio dei pori per questa tipologia di miscele è compreso tra i 34 nm e i 67 nm, a seconda della classe di resistenza. Mentre sono praticamente assenti, nelle malte in caolino calcinato, porosità superiori a 1 μm (Tabella 71, Figure 74-75).

Tabella 71 Porosità nelle malte geopolimeriche a base di metacaolino

	POROSITÀ [%]	DIAMETRO MEDIO [nm]
R1 MKK	35	67
R2 MKK	35	49
R3 MKK	34	34

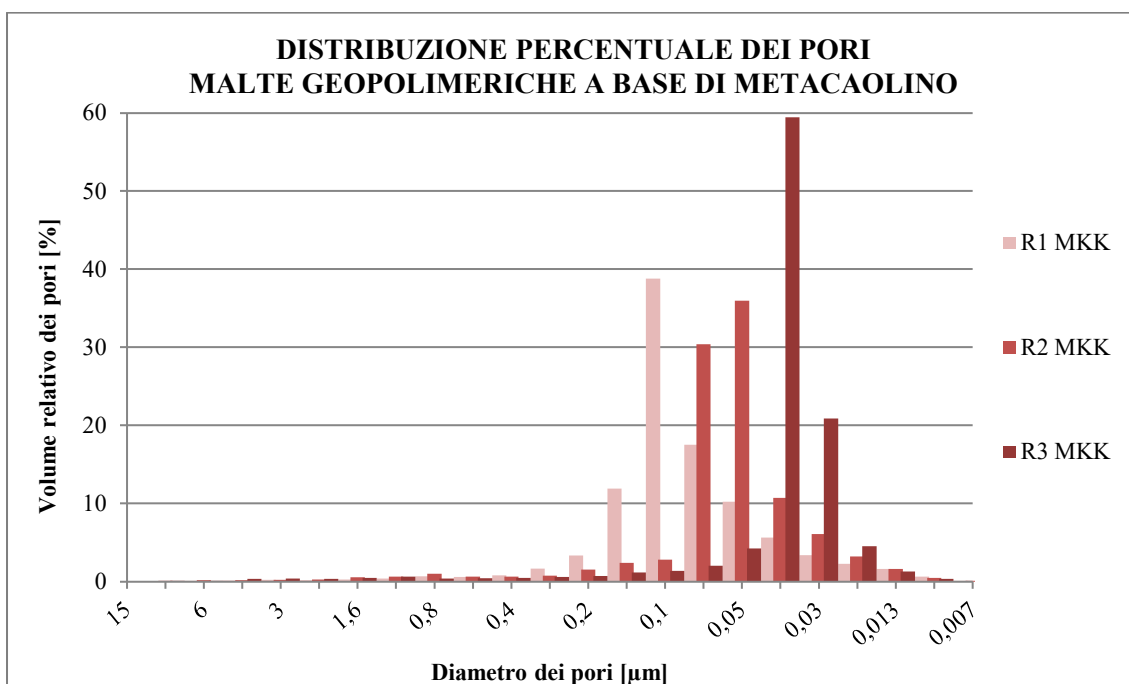


Figura 74 Distribuzione percentuale del diametro dei pori. Malte geopolimeriche in metacaolino

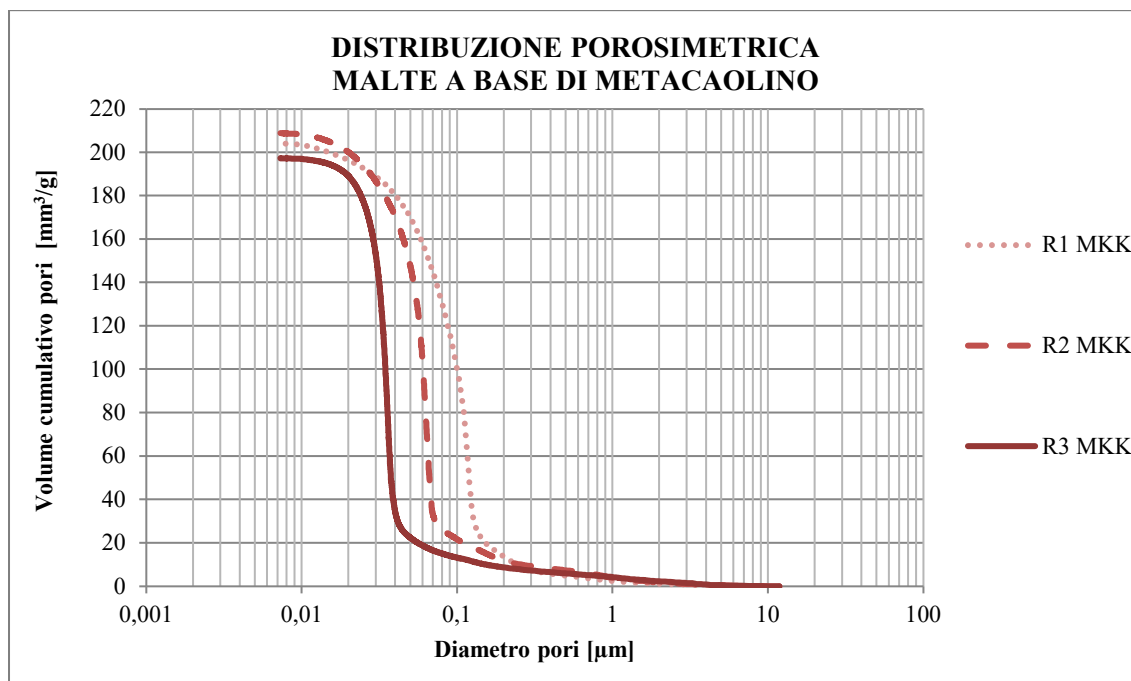


Figura 75 Distribuzione porosimetrica. Malte geopolimeriche a base di metacaolino

Invece, per le malte geopolimeriche in cenere volante e NaOH si è notato una presenza di pori maggiormente distribuiti in relazione al loro diametro (Tabella 72, Figure 76-77). Tali malte mostrano, in pari numero, la presenza di porosità di grandi e piccole dimensioni.

In media, le malte di classe di resistenza superiore, presentano un minore quantitativo di macro-porosità, e il volume totale dei pori è compreso tra il 15% (per la malta a maggior contenuto di NaOH) e il 19% (per la malta a minor contenuto di NaOH).

A differenza di quelle ottenute nelle malte cementizie e nelle malte in metacaolino, le curve ottenute dalle distribuzioni porosimetriche delle malte geopolimeriche in cenere volante, presentano più punti di flesso, ovvero una distribuzione bimodale. Questo denota la frequente presenza di pori di dimensioni considerevolmente diverse tra loro. Per questa tipologia di malte, perciò, non verrà calcolato un diametro medio, ma verranno riportati i

diametri presenti con maggiore frequenza, rilevando le mode dalla distribuzione dei valori.

Tabella 72 Porosità nelle malte geopolimeriche a base di cenere volante

	POROSITÀ [%]	DIAMETRI FREQUENTI [nm]	
		MODA I	MODA II
R1 FANa	19	26	1147
R2 FANa	16	26	1617
R3 FANa	15	19	813

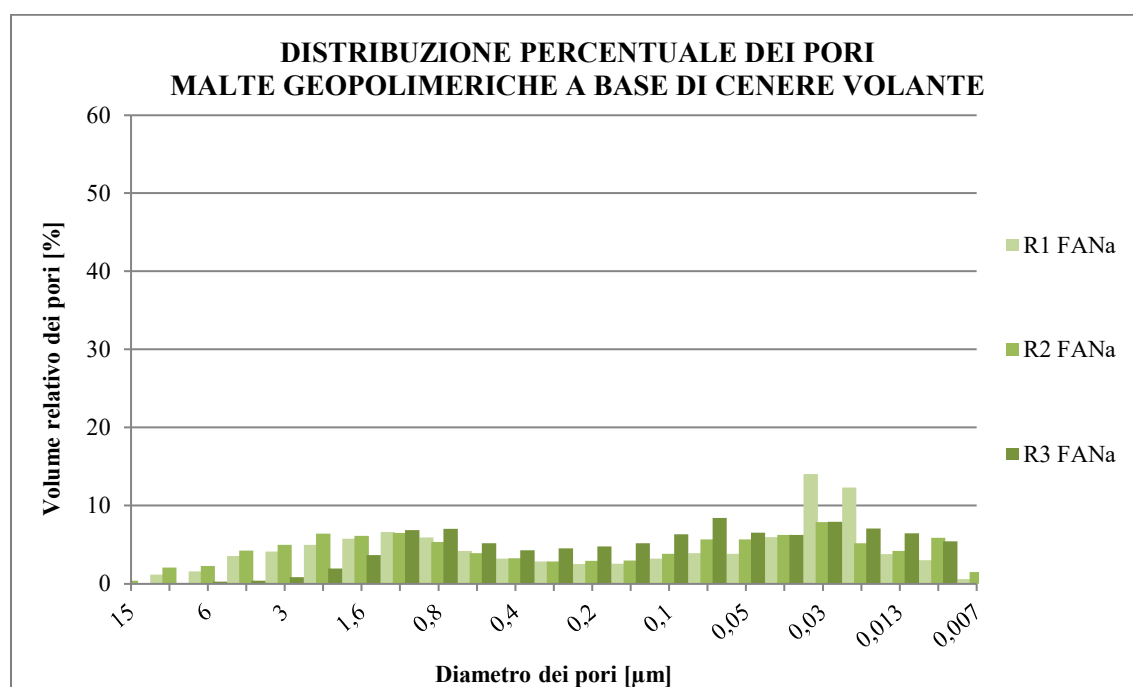


Figura 76 Distribuzione percentuale del diametro dei pori. Malte geopolimeriche in cenere volante

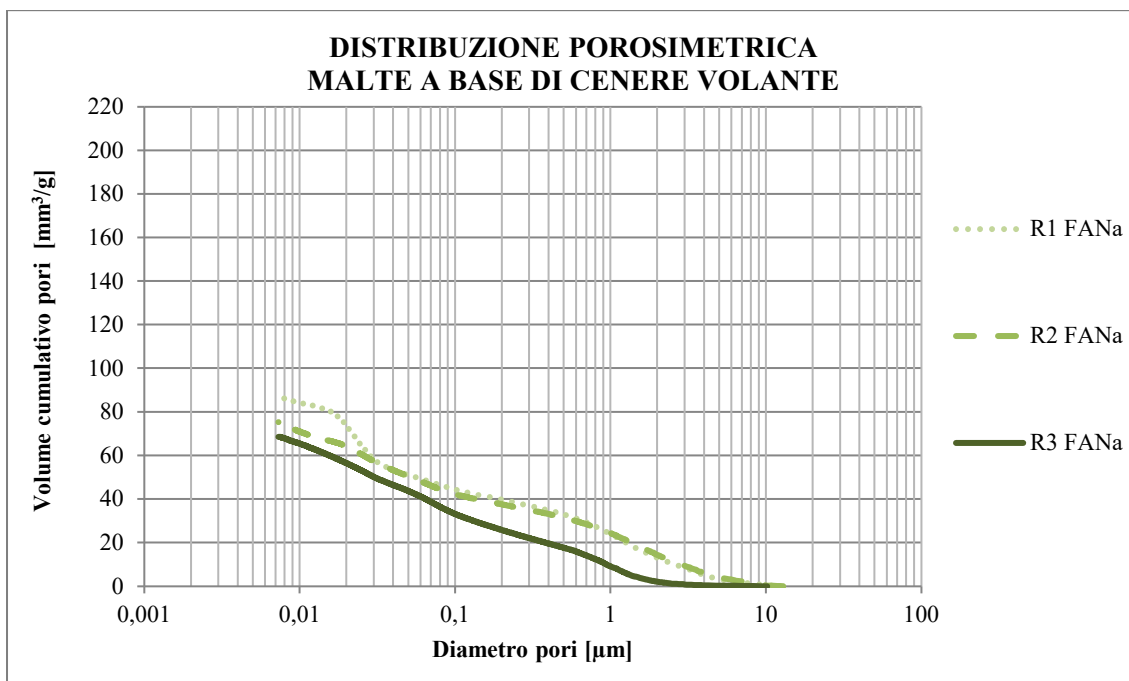


Figura 77 Distribuzione porosimetrica. Malte geopolimeriche a base di cenere volante

Anche le malte in cenere volante e KOH (come le loro controparti contenenti NaOH) mostrano una distribuzione uniforme delle porosità, in relazione alla loro dimensione (Tabella 73, Figura 78-79).

La percentuale di vuoti si attesta tra il 13% (per la malta a minor contenuto di KOH) e il 17% (per la malta a maggior contenuto di KOH). Le malte di classe di resistenza più alta presentano, quindi, una minor presenza di vuoti e porosità di dimensioni inferiori.

Tabella 73 Porosità nelle malte geopolimeriche a base di cenere volante e cemento alluminoso

	POROSITÀ [%]	DIAMETRI FREQUENTI [nm]	
		MODA I	MODA II
R1 FAK	17	13	1147
R2 FAK	14	9	1147
R3 FAK	13	13	73

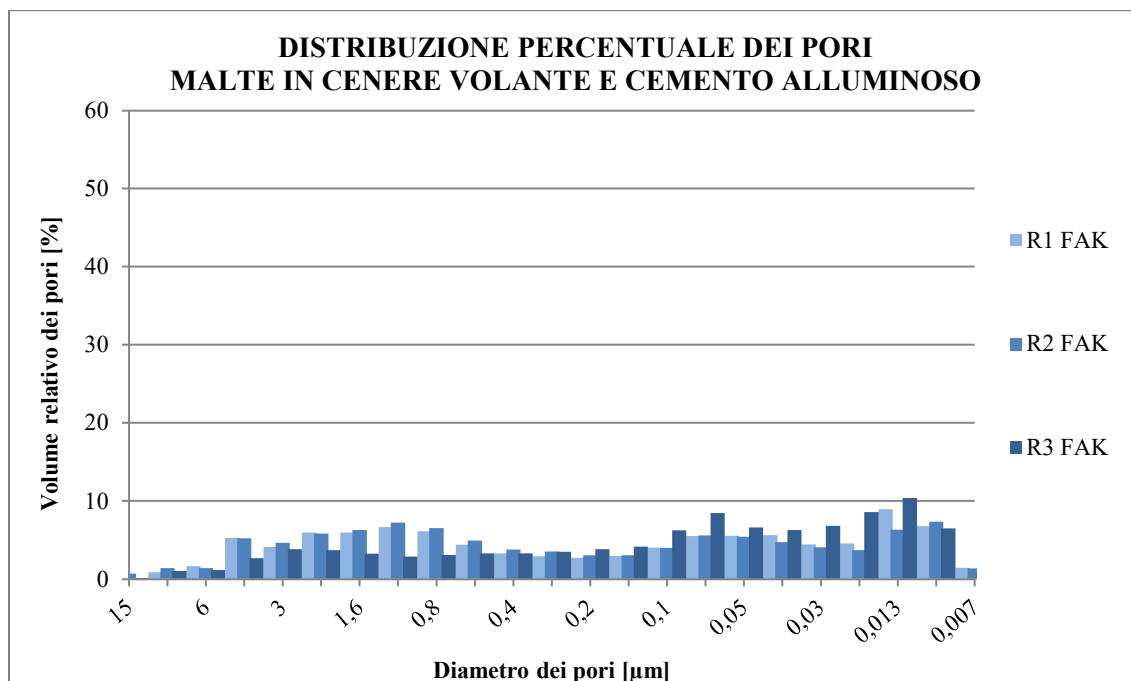


Figura 78 Percentuale del diametro dei pori. Malte geopolimeriche in cenere volante e cemento alluminoso

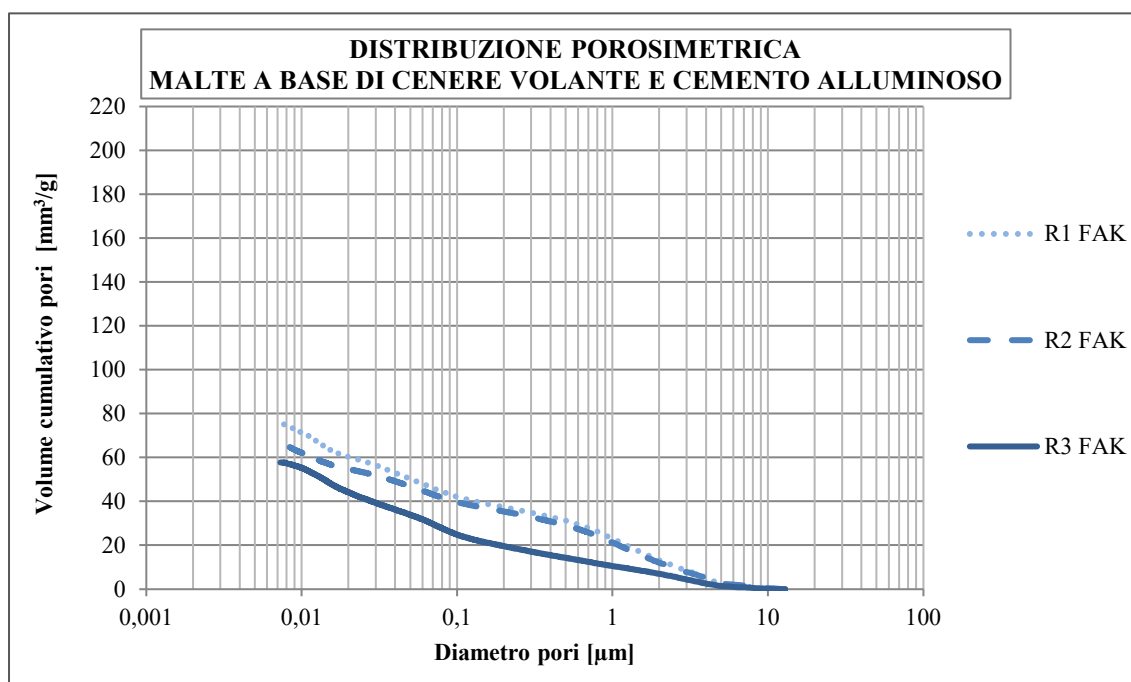


Figura 79 Distribuzione porosimetrica. Malte geopolimeriche a base di cenere volante e cemento alluminoso

7.3 Considerazioni finali

Dalle analisi porosimetriche condotte in questa tesi sulle malte cementizie e sulle malte geopolimeriche si possono trarre le seguenti conclusioni (Tabella 74, Figure 80-85):

- Maggiore è la classe di resistenza e minore è la porosità percentuale, questo è dovuto a una maggiore presenza di cemento idratato per le malte cementizie, e quindi ad una maggiore formazione di fibre di C-S-H, che contribuiscono a rendere più compatta la malta indurita; nelle malte geopolimeriche questo è, invece, da imputare ad una maggiore presenza di solidi di idrossido a discapito dell'acqua e quindi una maggiore molarità della soluzione alcalina.
- Maggiore è la classe di resistenza e minore è il diametro medio dei pori nelle malte cementizie e geopolimeriche (anche se nelle malte in cenere volante questa caratteristica è poco accentuata).
- Le malte in metacaolino e in cemento hanno una distribuzione porosimetrica in cui è presente un solo flesso, e quindi un solo diametro medio, mentre le malte geopolimeriche in cenere volante presentano una distribuzione porosimetrica bimodale con una distribuzione più omogenea di pori nell'intervallo $0,1 \div 10 \mu\text{m}$.
- Le malte geopolimeriche in cenere volante presentano una minore porosità percentuale rispetto alle malte cementizie. Le malte in metacaolino, al contrario, presentano una maggiore presenza di vuoti, indipendentemente dalla classe di resistenza analizzata.
- Le malte geopolimeriche in metacaolino presentano una porosità maggiore delle malte in cenere volante rispetto al volume totale del composto. Tuttavia, le malte in caolino calcinato presentano un

minore quantitativo di porosità capillari (ovvero di pori di diametro maggiore di 0,1 μm).

- Le malte in cenere volante contenenti KOH in soluzione possiedono una porosità inferiore (anche se di poco) rispetto alle malte in cenere volante e NaOH. Inoltre, il diametro dei pori presenti nelle malte in cenere volante e cemento alluminoso, è mediamente inferiore rispetto a quello caratteristico delle altre malte geopolimeriche.
- Un aumento degli idrossidi solidi presenti nella miscela di malta geopolimerica contribuisce a diminuire le porosità presenti nel composto, indipendentemente dall'alluminosilicato utilizzato.

Tabella 74 Porosità nelle malte cementizie e geopolimeriche

	POROSITÀ [%]	DIAMETRI MEDI O MODALI [nm]	
R1 CEM	25	97,0	
R2 CEM	24	64,5	
R3 CEM	18	48,2	
R1 MKK	35	66,7	
R2 MKK	35	49,1	
R3 MKK	34	33,8	
R1 FANa	19	26	1147
R2 FANa	16	26	1617
R3 FANa	15	19	813
R1 FAK	17	13	1147
R2 FAK	14	9	1147
R3 FAK	13	13	73

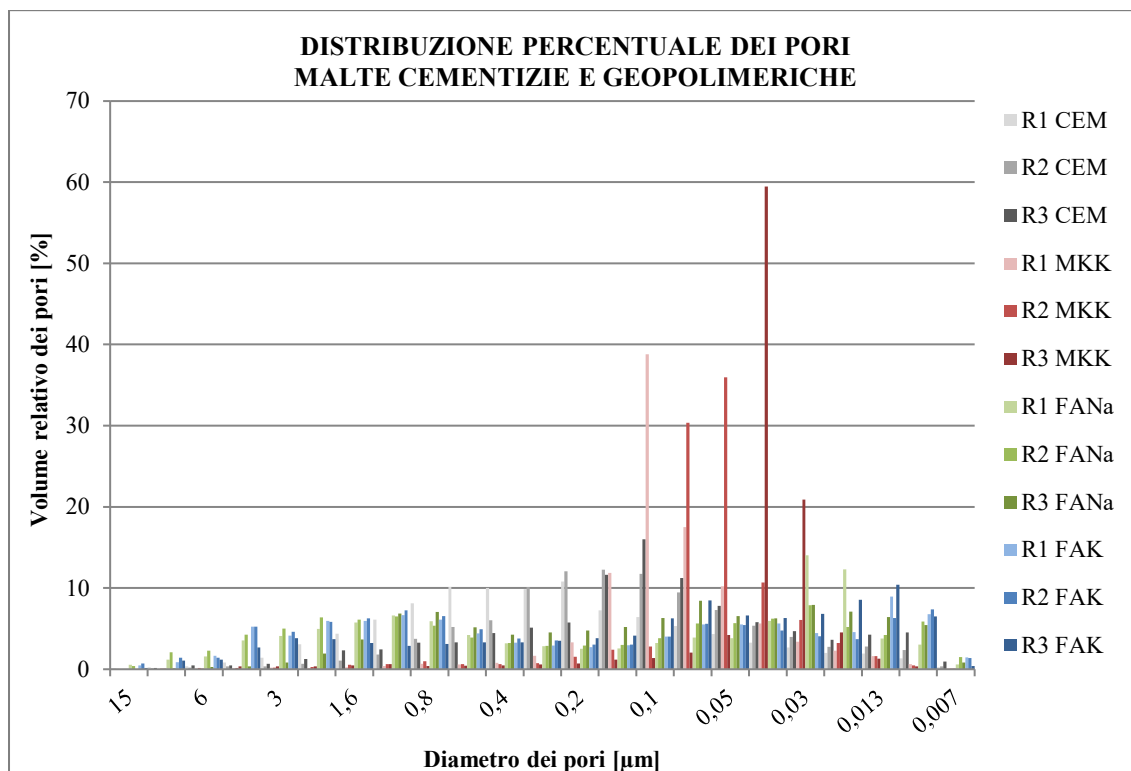


Figura 80 Distribuzione percentuale del diametro dei pori. Malte cementizie e geopolimeriche

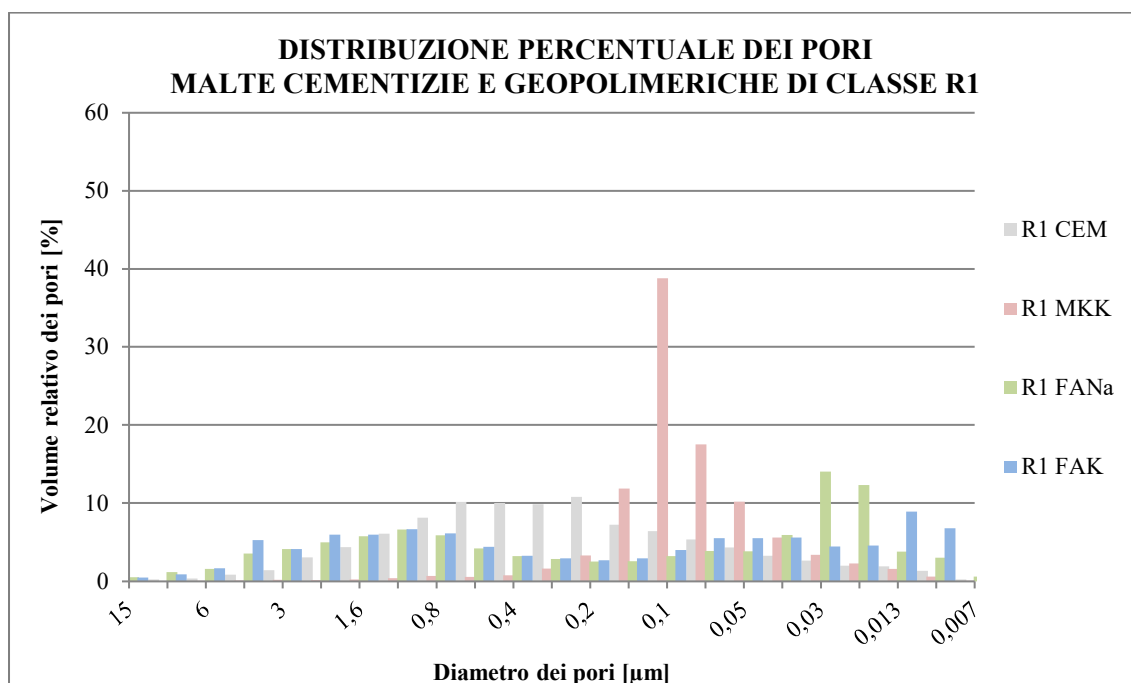


Figura 81 Distribuzione percentuale del diametro dei pori. Malte cementizie e geopolimeriche di classe R1

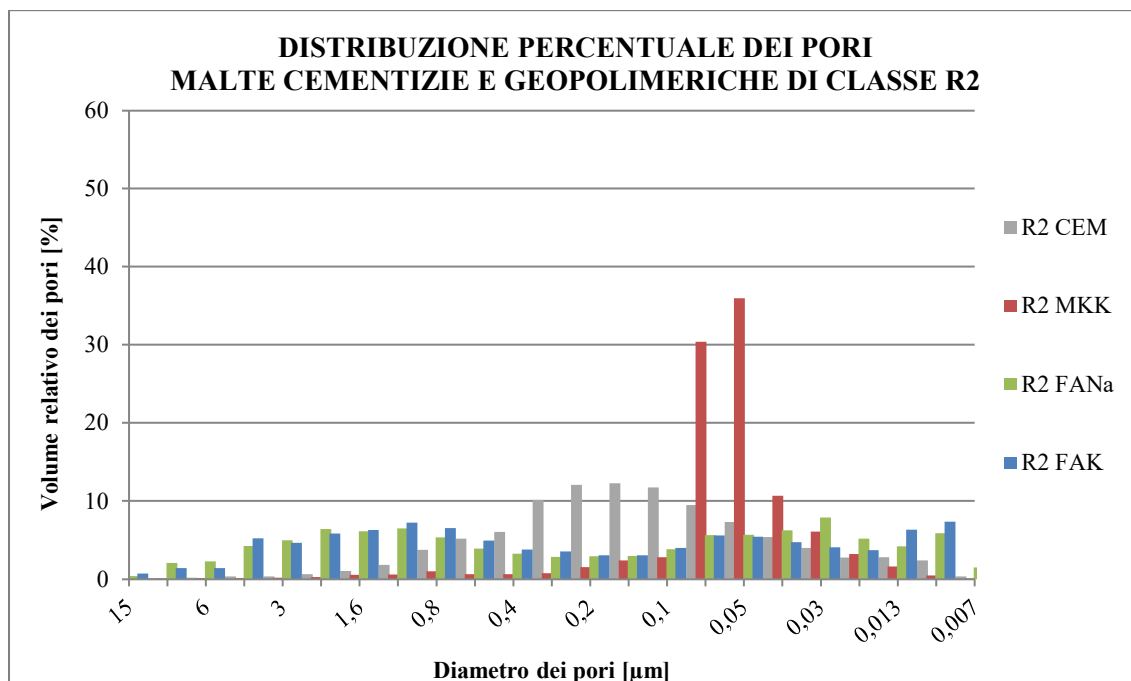


Figura 82 Distribuzione percentuale del diametro dei pori. Malte cementizie e geopolimeriche di classe R2

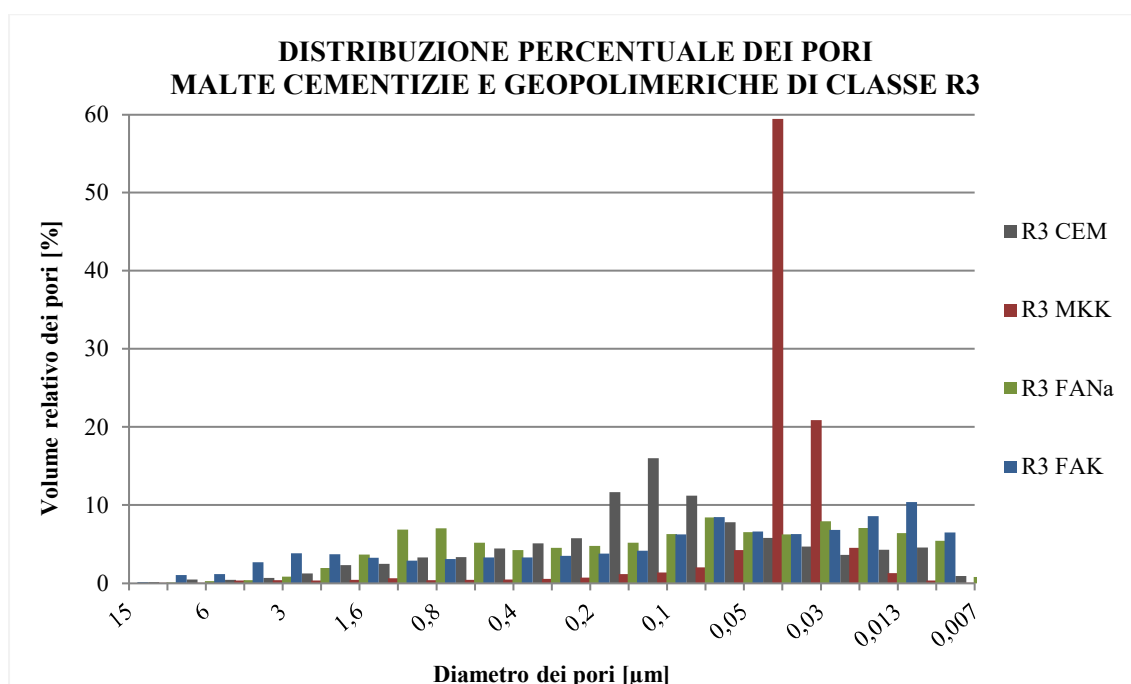


Figura 83 Distribuzione percentuale del diametro dei pori. Malte cementizie e geopolimeriche di classe R3

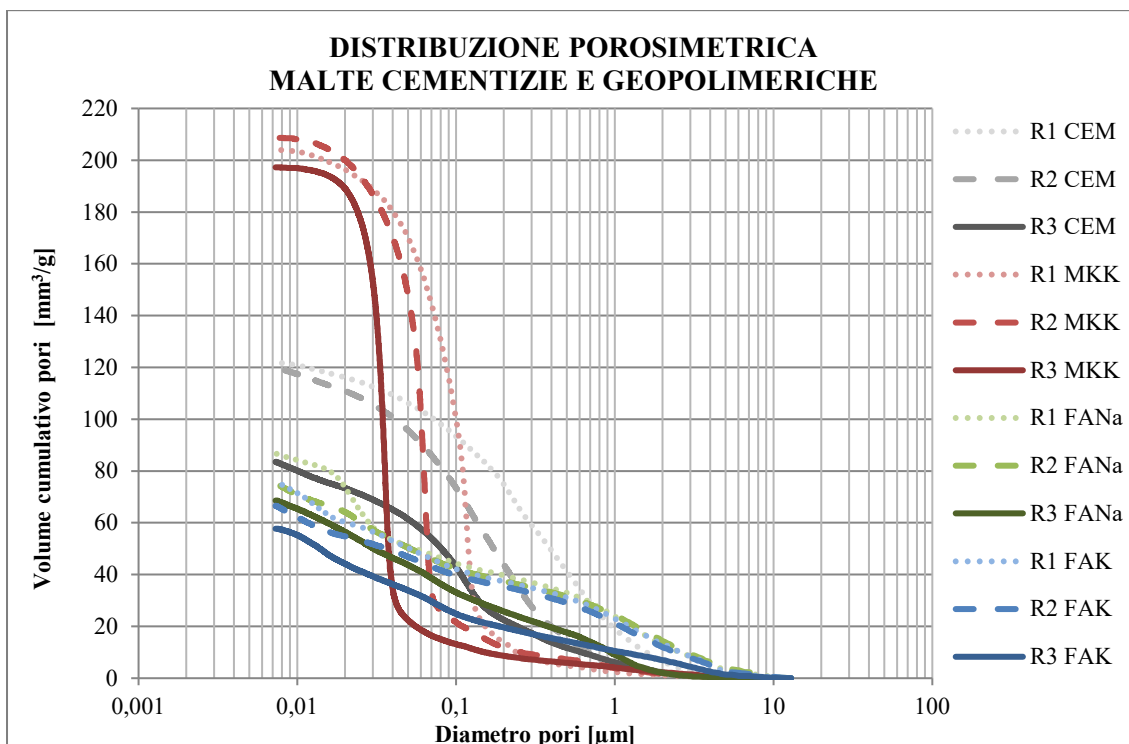


Figura 84 Distribuzione porosimetrica nelle malte cementizie e geopolimeriche

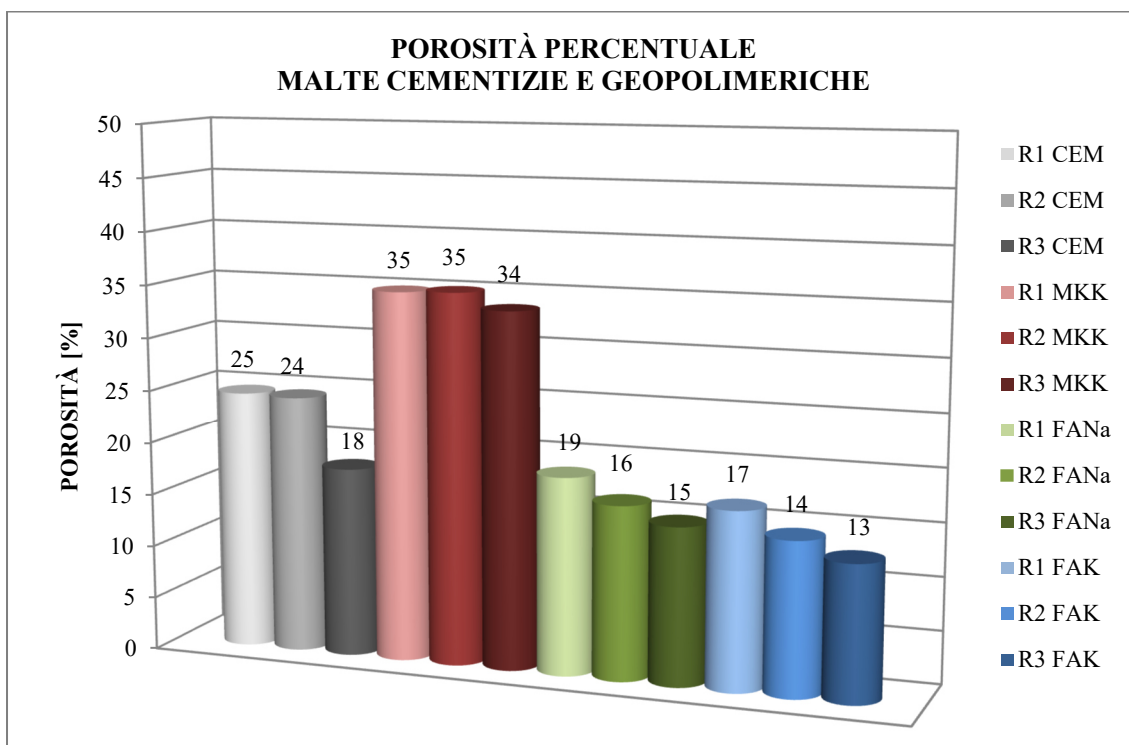


Figura 85 Porosità percentuale nelle malte cementizie e geopolimeriche

Capitolo 8

Conducibilità termica

8.1 Introduzione

La conducibilità termica, detta anche conduttività termica, è il rapporto tra il flusso di calore e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore nel caso di conduzione; dove il flusso di calore è la quantità di calore trasferita nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie. Il rapporto tra questi due elementi, affinché si possa parlare di conducibilità termica, deve essere in condizioni stazionarie. In sintesi, essa è una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere calore e dipende solo dalla natura del materiale e non dalla sua forma.

La conducibilità termica non va confusa con la diffusività termica, detta anche conducibilità termometrica, che invece è il rapporto tra la conducibilità termica e il prodotto tra densità e calore specifico della sostanza presa in considerazione, inoltre misura l'attitudine di una sostanza a trasmettere, non il calore, ma la variazione di temperatura.

È stato fondamentale tenere conto di questo elemento negli studi eseguiti in questa tesi, in quanto l'analisi della conducibilità termica di un materiale permette di capire quanto esso sia isolante o meno.

La conducibilità termica viene indicata con λ , la definizione data sopra, viene espressa in formula con quanto segue:

$$\lambda = \frac{J \cdot d}{(T_2 - T_1)}$$

dove; J è il flusso di calore (W/m^2), d è la distanza a cui sono poste le termocoppie (m), e T_1 e T_2 sono le temperature sulle facce opposte del provino ($^{\circ}\text{C}$ o K), λ si misura in W/mK .

8.2 Campionatura e stagionatura

Per eseguire le prove di conducibilità termica sono stati realizzati dei provini a forma cilindrica, di diametro 140 mm e di altezza 30 mm, con un supporto in PVC. I provini sono stati sottoposti ad un processo di stagionatura (come descritto nei dettagli nel paragrafo 4.4) e successivamente sono stati levigati manualmente per ottenere delle superfici piane per la realizzazione della prova.

8.3 Conducibilità termica rilevata

Prima di specificare quanto è risultato dalle prove delle due tipologie di malte (cementizie e geopolimeriche) tenute in considerazione in questo studio, si tiene a descrivere i dettagli dell'esecuzione della prova.

Innanzitutto, gli strumenti utilizzati sono stati forniti dal Dipartimento di Energetica dell'Università Politecnica delle Marche e il lavoro è stato coordinato dal Prof. Costanzo Di Perna con l'ausilio di un tecnico di laboratorio.

Per eseguire il rilievo dei valori termici delle malte, inizialmente sono stati messi in maniera simmetrica dei sensori di rilevamento, nel rispetto della normativa UNI EN 1015-19, che specifica un metodo per la determinazione della permeabilità al vapore d'acqua in condizioni di flusso stazionario per condizioni di umidità bassa ed elevata di malte per intonaci, in effetti applicabile a malte con cui si possono ottenere campioni a forma di disco di

spessore uniforme compreso tra 10 mm e 30 mm (nel caso studiato in questo lavoro: 30 mm).

In seguito, su entrambi le superfici del provino sono stati posti centralmente una piastra flussimetrica e due termocoppie allineate, tarate precedentemente e fissate con pasta termoconduttiva (Figura 86). Tra le piastre, che sono state mantenute a temperatura costante grazie alla circolazione di fluidi termostati, ed i sensori si trovano nei fogli di contatto. Le piastre usate sono di dimensioni 500x500x30 mm.

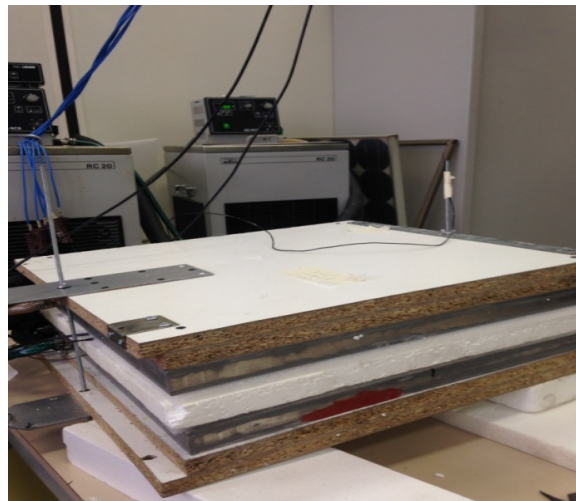


Figura 86 Strumentazione per le prove di conducibilità termica nelle malte

Le termocoppie sono dei sensori di temperatura costituiti da una coppia di conduttori elettrici di diverso materiale uniti tra loro in un punto.

Il materiale che costituisce i fogli contatto è adeguatamente comprimibile affinché non si creino o si eliminano sacche d'aria tra le facce del provino e l'apparecchiatura.

In ultimo la strumentazione viene chiusa quando tutte le superfici sono strettamente a contatto tra di esse per evitare la presenza di aria che provocherebbero un errore nel risultato finale.

8.3.1 Conducibilità termica nelle malte cementizie

Nelle malte cementizie si sono ottenuti i valori come seguono, in base alle classi di resistenza:

- Classe R2 CEM; $J=1245,44 \text{ W/m}^2$, $d=0,0303 \text{ m}$, $(T_2-T_1) = 4,53^\circ\text{C}$,
 $\lambda=0,1359 \text{ W/mK}$, $\rho=1993 \text{ kg/dm}^3$
- Classe R3 CEM; $J=1421,12 \text{ W/m}^2$, $d=0,0318 \text{ m}$, $(T_2-T_1) = 4,10^\circ\text{C}$,
 $\lambda=0,1630 \text{ W/mK}$, $\rho=2081 \text{ kg/dm}^3$

8.3.2 Conducibilità termica nelle malte geopolimeriche

Mentre nelle malte geopolimeriche si è rilevato quanto segue:

- per le malte in metacaolino:
Classe R2 MKK. $J=1066,90 \text{ W/m}^2$, $d=0,0297 \text{ m}$, $(T_2-T_1) = 5,05^\circ\text{C}$,
 $\lambda=0,1139 \text{ W/mK}$, $\rho=1667 \text{ kg/dm}^3$
Classe R3 MKK. $J=1057,42 \text{ W/m}^2$, $d=0,0312 \text{ m}$, $(T_2-T_1) = 5,26^\circ\text{C}$,
 $\lambda=0,1185 \text{ W/mK}$, $\rho=1655 \text{ kg/dm}^3$
- per le malte in cenere volante:
Classe R2 FANa. $J=1298,89 \text{ W/m}^2$, $d=0,0299 \text{ m}$, $(T_2-T_1) = 5,05^\circ\text{C}$,
 $\lambda=0,1396 \text{ W/mK}$, $\rho=2013 \text{ kg/dm}^3$
Classe R3 FANa. $J=1283,49 \text{ W/m}^2$, $d=0,0319 \text{ m}$, $(T_2-T_1) = 4,62^\circ\text{C}$,
 $\lambda=0,1474 \text{ W/mK}$, $\rho=2037 \text{ kg/dm}^3$
- per le malte in cenere volante e cemento alluminoso:
Classe R2 FAK. $J=1262,86 \text{ W/m}^2$, $d=0,0307 \text{ m}$, $(T_2-T_1) = 4,75^\circ\text{C}$,
 $\lambda=0,1396 \text{ W/mK}$, $\rho=2000 \text{ kg/dm}^3$
Classe R3 FAK. $J=1201,74 \text{ W/m}^2$, $d=0,0314 \text{ m}$, $(T_2-T_1) = 4,78^\circ\text{C}$,
 $\lambda=0,1356 \text{ W/mK}$, $\rho=2117 \text{ kg/dm}^3$

8.4 Confronto e conclusioni

Dalle prove di conducibilità termiche effettuate sui campioni cilindrici di malte cementizie e geopolimeriche si sono ottenuti valori di conduttività in linea con quelle degli altri materiali usati in edilizia, come intonaci e rifiniture, in relazione alla densità del materiale.

Per fare uno studio più completo si è deciso di confrontare i valori ottenuti da questa prova con quelli riguardanti la densità e la porosimetria delle malte per le classi di resistenza R2 ed R3.

Dai confronti effettuati si nota che (Tabella 74, Figure 87-91):

- le malte geopolimeriche in metacaolino risultano essere le meno termicamente conduttive perché hanno una maggiore porosità percentuale e una minore porosità capillare (pori con diametro $> 0,1 \mu\text{m}$) oltre ad avere una inferiore densità rispetto alle altre malte per entrambe le classi di resistenza. Si può concludere dicendo che hanno scarsa capacità di assorbire il calore e possiedono quindi proprietà isolanti;
- la malta geopolimerica in cenere volante e cemento alluminoso risultano avere valori di conducibilità termica più alti tra le malte di classe di resistenza R2. Esse hanno una percentuale di porosità più bassa e una densità tra le più alte;
- la malta cementizia di classe R3 risulta avere la più alta conducibilità termica tra le malte analizzate. Essa presenta una densità massima.

Tabella 74 Riepilogo sulla porosità percentuale, sul diametro medio o modale dei pori, sulla densità allo stato indurito e sulla conducibilità termica dei provini.

	POROSITÀ [%]	DIAMETRO MEDIO O MODALE [nm]		DENSITÀ ALLO STATO INDURITO [Kg/m³]	CONDUCIBILITÀ λ [W/mK]
R2 CEM	24	64,5		1992,97	0,136
R3 CEM	18	48,2		2080,65	0,163
R2 MKK	35	49,1		1667,26	0,114
R3 MKK	34	33,8		1655,28	0,119
R2 FANa	16	26	1617	2013,48	0,118
R3 FANa	15	19	813	2037,29	0,147
R2 FAK	14	9	1147	2000,15	0,140
R3 FAK	13	13	73	2117,33	0,136

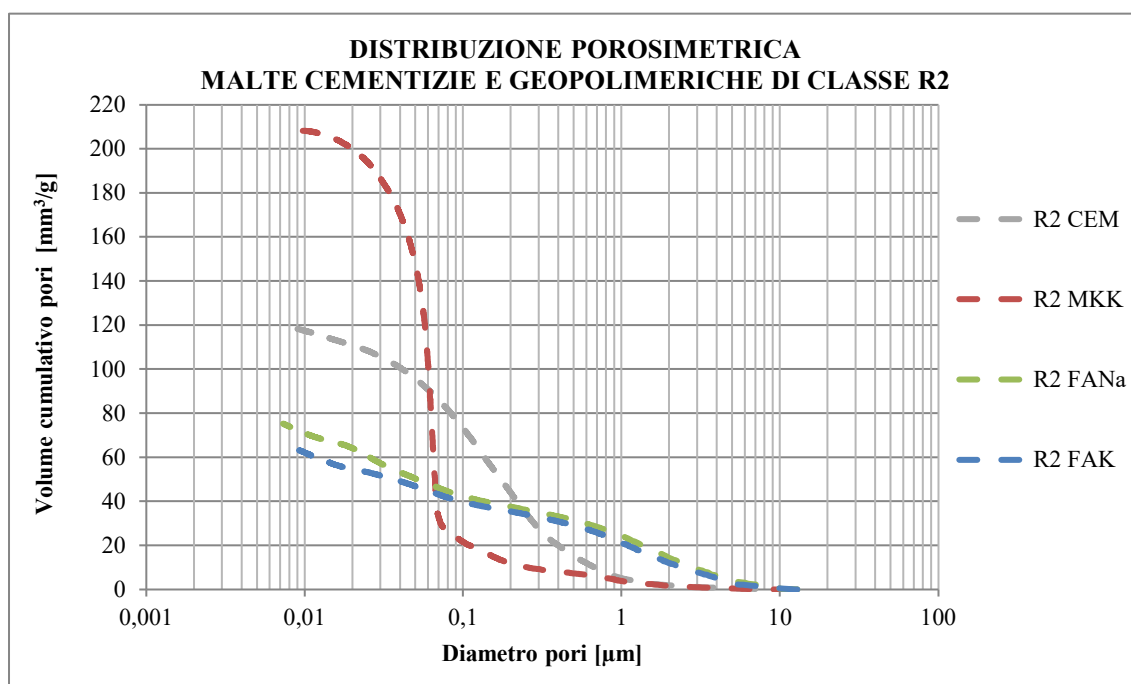


Figura 87 Distribuzione porosimetrica nelle malte cementizie e geopolimeriche di classe R2

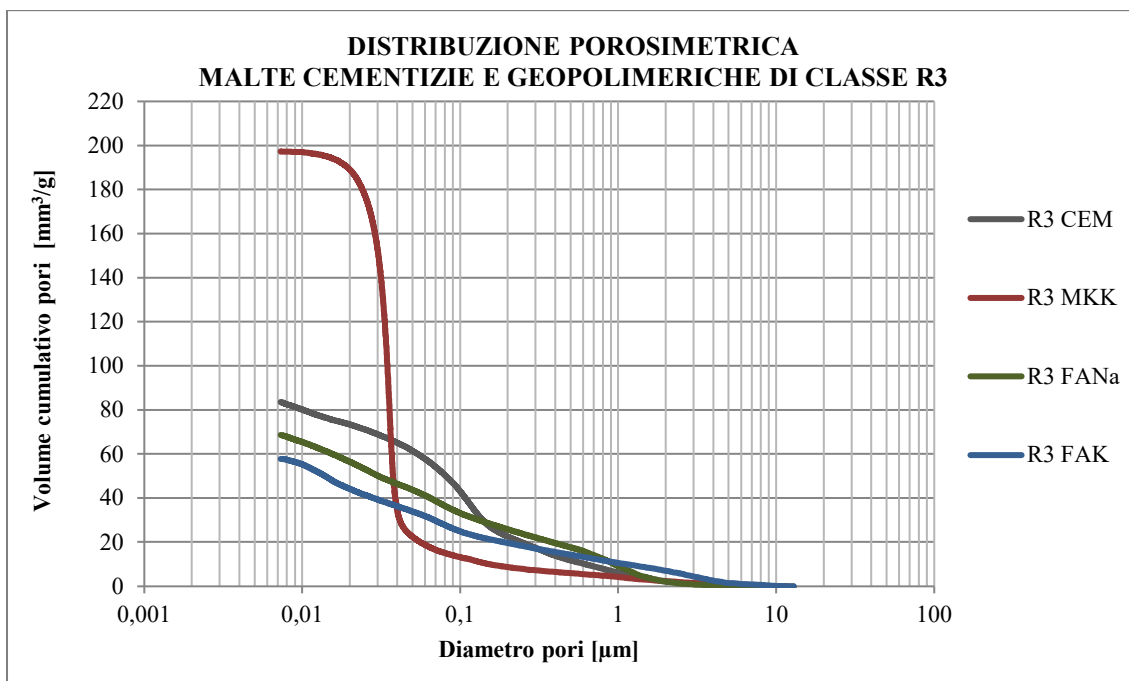


Figura 88 Distribuzione porosimetrica nelle malte cementizie e geopolimeriche di classe R3

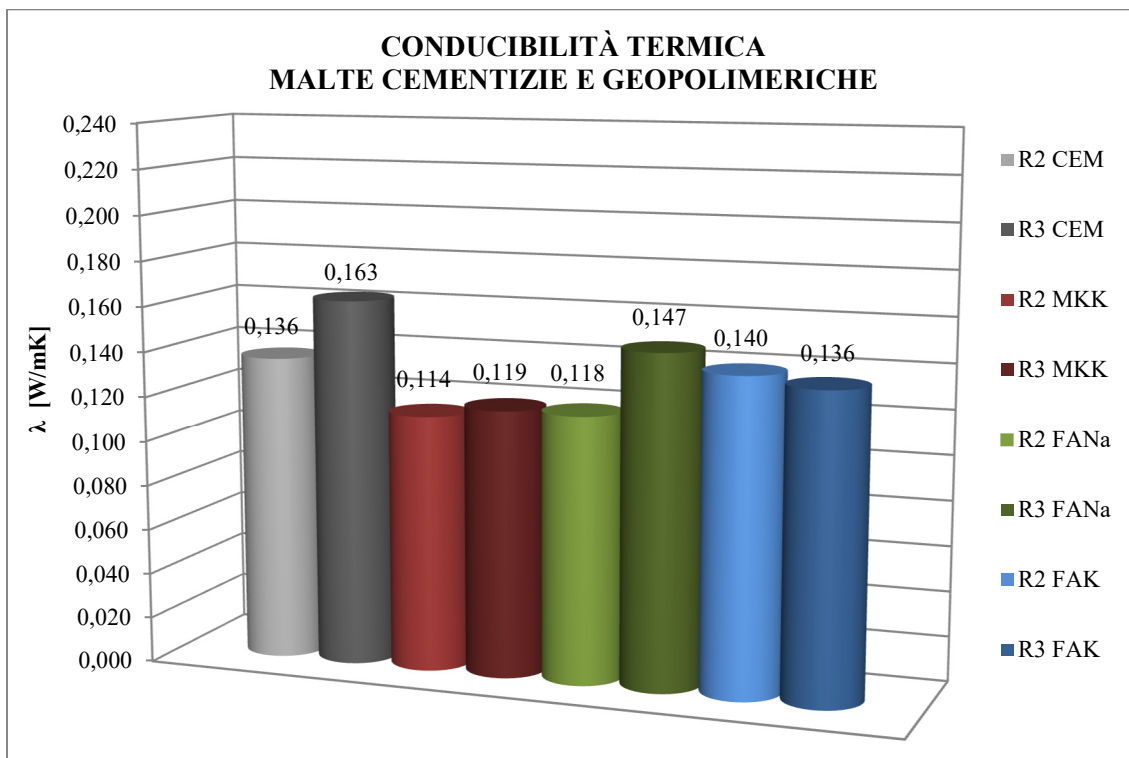


Figura 89 Conducibilità termica nelle malte delle classi R2 ed R3

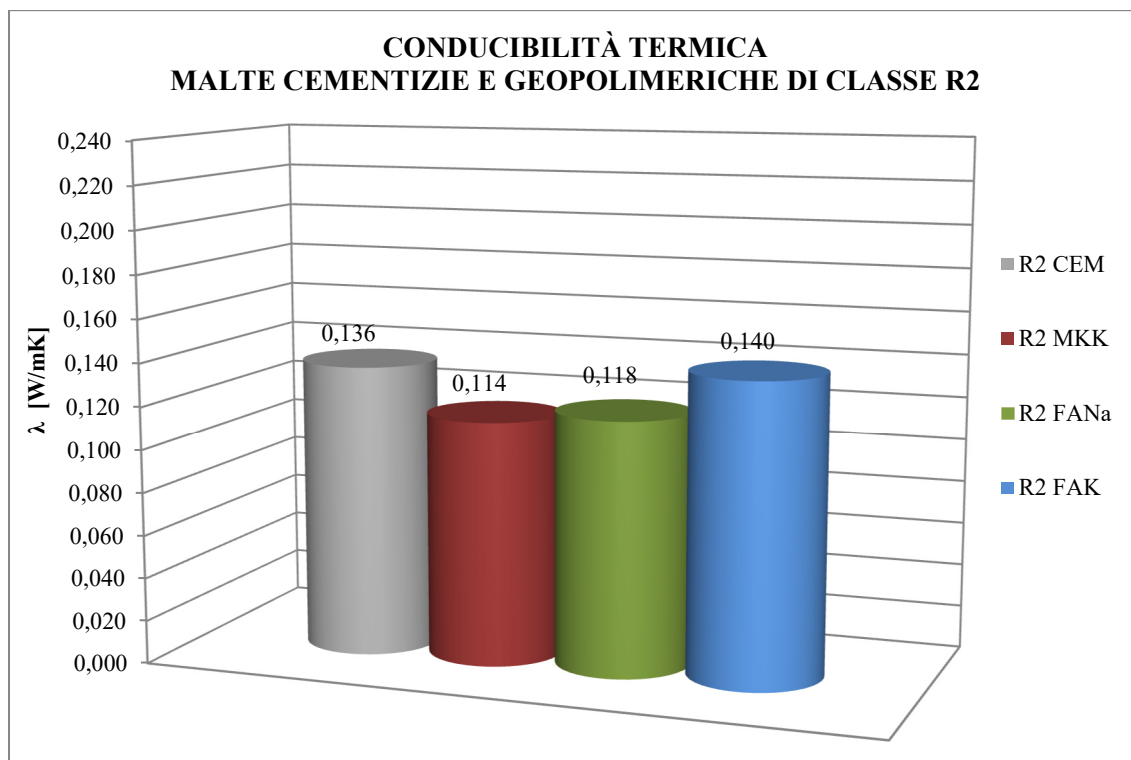


Figura 90 Conducibilità termica nelle malte di classe R2

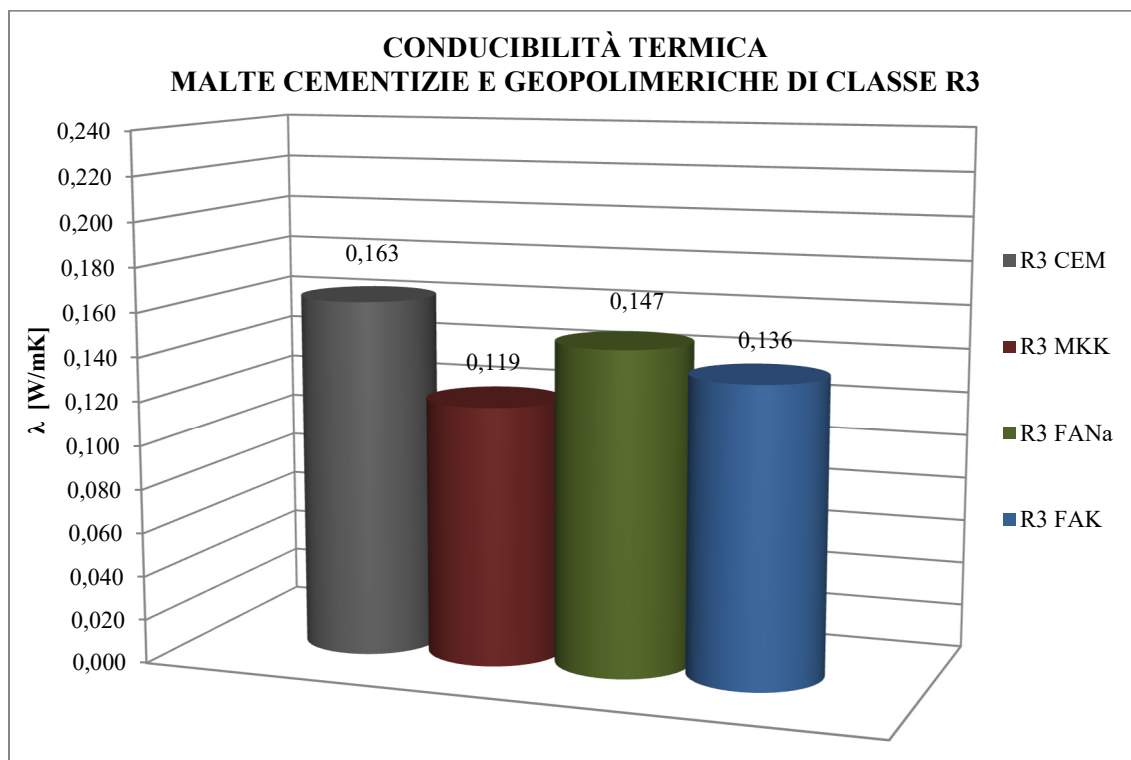


Figura 91 Conducibilità termica nelle malte di classe R3

PARTE TERZA

La durabilità delle armature e lo studio dei provini sulla carbonatazione

Capitolo 9

La durabilità delle armature

9.1 Introduzione

Secondo il D.M. 17/01/2018, per durabilità si intende la conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture; essa è una caratteristica essenziale affinché i livelli di sicurezza vengano garantiti durante la vita nominale di un progetto dell'opera.

Per studiare il comportamento alla corrosione delle barre di armatura immerse nelle malte cementizie e geopolimeriche prese in considerazione, sono state effettuate misurazioni elettrochimiche non distruttive destinate alla rilevazione del potenziale e della velocità di corrosione. Una delle principali cause di degrado delle armature immerse all'interno di un prodotto cementizio sono i fenomeni corrosivi.

In questo capitolo si analizzeranno le tipologie di corrosione e le loro differenze, in particolar modo approfondiremo lo studio della corrosione per carbonatazione all'interno delle matrici cementizie e geopolimeriche.

9.2 La corrosione: definizione e tipologia

Per corrosione si intende una progressiva alterazione della superficie di un corpo. È un fenomeno essenzialmente chimico-fisico che provoca il graduale

e irreversibile deterioramento dei materiali soprattutto metallici, i quali in seguito a reazioni più o meno complesse, danno origine a composti la cui resistenza chimica e meccanica è molto inferiore a quella del metallo originale²³. La corrosione delle armature metalliche consiste nella trasformazione dell'acciaio (prevalentemente costituito da ferro metallico, Fe) in ruggine formata da ossidi ferrici, tra cui Fe(OH)_2 , Fe(OH)_3 , Fe_2O_3 , ecc., porosi incoerenti e voluminosi:



Tale processo è alimentato dalla presenza di aria umida che contiene gli elementi (O_2 , H_2O) necessari alla corrosione. Il processo corrosivo deve essere attivato da uno dei seguenti meccanismi: corrosione promossa dalla carbonatazione del calcestruzzo e corrosione promossa dal cloruro:

- Corrosione promossa dalla carbonatazione: in questo tipo di corrosione, l'aria (in particolare l'anidride carbonica, l'ossigeno e l'umidità in essa contenuti) può provocare la corrosione delle armature metalliche a seguito di un fenomeno denominato carbonatazione. L'anidride carbonica, quando riesce ad insinuarsi all'interno dei pori del conglomerato determina una modifica delle proprietà alcaline, abbattendo il suo pH e trasformando la calce in calcare:



Il calcare a dispetto della calce non protegge più i ferri i quali, a contatto con ossigeno e umidità, si corrodono.

- Corrosione promossa dal cloruro: la perdita del carattere protettivo da parte del film di ossido ferrico nei confronti del substrato metallico, può avvenire anche per la presenza dello ione Cl^- sulla superficie dei ferri di armatura, a seguito dell'esposizione ai cloruri presenti nei sali

²³ S.Pasquetto, L.Patrone, Chimica Fisica. Termodinamica chimica, cinetica chimica, elettrochimica, Zanichelli, 1998.

disgelanti applicati d'inverno sulle pavimentazioni o nelle acque marine. Anche in questo caso è necessario che il processo di corrosione sia alimentato da ossigeno e acqua.

La corrosione da carbonatazione si presenta uniformemente distribuita sulla superficie delle armature, mentre la corrosione da cloruri è solitamente di tipo localizzato (pitting corrosion), creando dei crateri (pit), circondati da zone non corrose.

9.3 Processo elettrochimico

L'elettrochimica è quella branca della chimica che si occupa dei processi che coinvolgono il trasferimento di elettroni tramite un circuito elettrico esterno e non per scambio diretto come per le reazioni di ossidoriduzione.

La corrosione viene considerata un meccanismo elettrochimico costituito da quattro processi principali che avvengono contemporaneamente:

- Processo anodico: ossidazione del metallo costituito (nel caso del ferro) dalla reazione $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^-$ che dà luogo a prodotti di corrosione e libera elettroni nel metallo.
- Processo catodico: riduce la specie chimica e consuma gli elettroni prodotti dal processo anodico. In questo caso si parla di riduzione dell'ossigeno e produzione di alcalinità, ovvero si ha; $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$.
- Trasporto degli elettroni: avviene all'interno del metallo dalle regioni anodiche dove vengono resi disponibili a quelle catodiche dove sono consumati.
- Circolazione della corrente: avviene a chiusura del circuito e consiste nella circolazione della corrente elettrica all'interno del calcestruzzo

dalle regioni anodiche e quelle catodiche, trasportata dagli ioni, perché il cemento in presenza di acqua è un elettrolita.

Questi quattro processi devono prodursi alla stessa velocità. Infatti il numero di elettroni liberati dalla reazione anodica nell'unità di tempo (I_a), quello degli elettroni che nello stesso tempo vengono consumati dalla reazione catodica (I_c), la corrente che passa all'interno dell'armatura dalla regione anodica a quella catodica (I_m) e infine la corrente che circola all'interno del calcestruzzo dalla regione catodica a quella anodica (I_{cls}) e che chiude il circuito devono essere uguali tra loro (Figura 92):

$$I_a = I_c = I_m = I_{cls} = I_{corr}$$

Il valore comune di queste correnti I_{corr} misura la velocità del processo di corrosione.

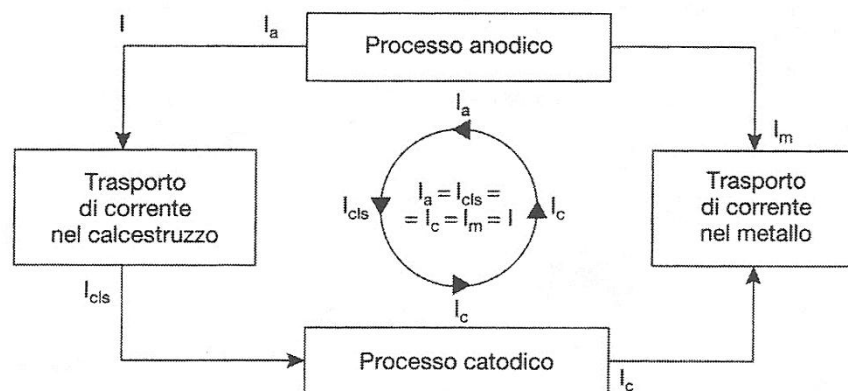


Figura 92 Processi che determinano il meccanismo elettrochimico di corrosione

9.4 La velocità di corrosione

In qualsiasi processo corrosivo si ha una perdita di massa. La velocità di corrosione può essere espressa come perdita di massa per unità di superficie e di tempo. Generalmente si preferisce considerare la velocità di penetrazione della corrosione, che in questo caso è espressa come la

diminuzione dello spessore nell'unità di tempo, utilizzando come unità di misura il $\mu\text{m}/\text{anno}$. L'attacco sulle armature è trascurabile se la velocità di penetrazione si mantiene intorno a 1,5-2 $\mu\text{m}/\text{anno}$, mentre se supera i 2 $\mu\text{m}/\text{anno}$, i prodotti di corrosione si accumulano sull'interfaccia armatura/calcestruzzo provocando inizialmente una riduzione di aderenza e successivamente danneggiamenti del calcestruzzo, una volta che l'attacco rientra in uno spessore tra i 20 e i 200 $\mu\text{m}/\text{anno}$.

Solitamente si parla di velocità di corrosione bassa se rientra tra i 2-5 $\mu\text{m}/\text{anno}$, moderata se rientra tra 5-10 $\mu\text{m}/\text{anno}$, intermedia tra 10-50 $\mu\text{m}/\text{anno}$, alta tra i 50-100 $\mu\text{m}/\text{anno}$ e elevatissima per valori che superano i 100 $\mu\text{m}/\text{anno}$.

9.5 Tecniche di campionamento

Durante la fase di campionamento sono stati realizzati 12 provini di cui un provino per le malte di ciascuna classe di resistenza delle quattro tipologie di miscele realizzate.

Pertanto sono stati analizzati 9 campioni realizzati con malte geopolimeriche di cui 3 in metacaolino, 3 in cenere volante, 3 in cenere volante e cemento alluminoso e 3 campioni realizzati con malte cementizie in leganti idraulici tradizionali.

I provini sono di forma cilindrica (detti lollipop) con un diametro pari a 115 mm e altezza pari a 125 mm. All'interno di ciascuna forma cilindrica sono state posizionate due barre di acciaio nero e due barre di acciaio zincato del diametro di 8 mm ad aderenza migliorata. Inoltre, il cassero di formatura è composto da un cilindro e due coperchi in cloruro di polivinile (Figure 93-94). Sul coperchio sono presenti 7 fori di cui 4 nel coperchio superiore, sono state allocate le 4 barre di armatura, mentre in 2 dei restanti fori verrà inserito

l'elettrodo di riferimento durante l'esecuzione delle misurazioni. Nel foro centrale è posizionata una barra in acciaio inossidabile con funzioni da contro-elettrodo.



Figura 93 Casseforme con coperchi superiori

Il coperchio inferiore dei casseri è stato fissato con del silicone al tubo in PVC, in modo da sigillare il sistema alla base, e le barre di armatura sono state bloccate al coperchio superiore con degli anelli di elastomero, così da impedirne la indesiderata mobilità.

In questo modo, nella malta fresca versata all'interno del tubo in PVC, sono state immerse le barre di armatura fissate al coperchio superiore, per assicurare un'adeguata compattazione della malta all'interno del contenitore e lo stesso è stato vibrato manualmente.

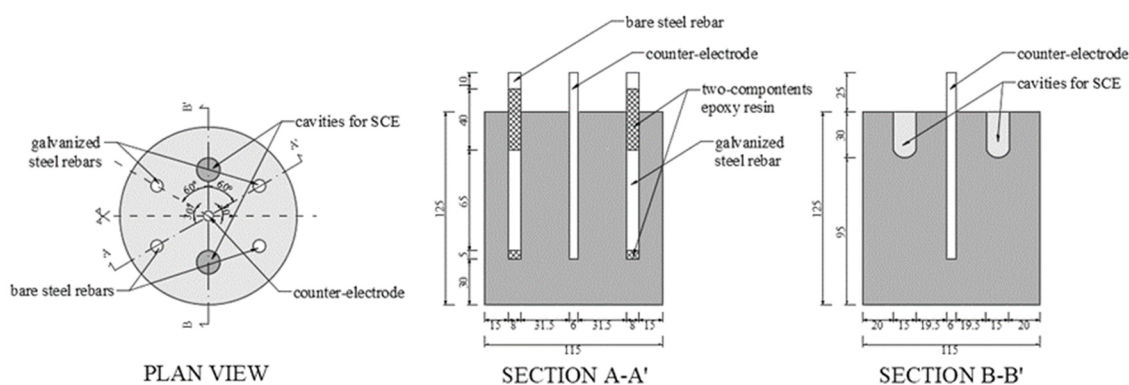


Figura 94 Schema del sistema malta-armature all'interno dei provini di forma cilindrica (lollipop)

I campioni così realizzati sono stati conservati per 3 giorni all'interno delle casseforme. Trascorse le 72 ore dalla realizzazione del getto (a rilevazione già iniziata), i provini sono stati scasserati e conservati a temperatura ambiente (Figura 95).



Figura 94 Provini di malta geopolimerica a base di metacaolino scasserati

Le barre di armatura in acciaio zincato sono state sottoposte a molatura, al fine di eliminarne gli spigoli vivi, e resinate con un adesivo epossidico bicomponente, per assicurare una superficie laterale esposta di $15,93 \text{ cm}^2$ (Figura 96).



Figura 96 Barre di armatura resinate

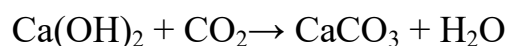
9.6 Corrosione per carbonatazione

L'aggressione dovuta alla CO_2 si può manifestare in due diversi modi a seconda del contesto in cui si trova. Nelle opere idrauliche si verifica il fenomeno di dilavamento della pasta cementizia, invece nelle opere esposte all'aria si verifica la carbonatazione del calcestruzzo.

La carbonatazione è dovuta alla penetrazione della CO_2 nel calcestruzzo.

L'anidride carbonica gassosa è inattiva nei confronti del calcestruzzo, ma in presenza di umidità, può reagire con i prodotti dell'idratazione del cemento.

La reazione di carbonatazione si può riassumere con la seguente formula:



Dove la reazione dell'anidride carbonica CO_2 con l'idrossido di calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, presente naturalmente nei leganti (cemento, calce aerea, calce idraulica), forma carbonato di calcio.

Questo fenomeno consiste nella trasformazione della calce, che si crea a seguito dell'idratazione del cemento, in carbonato di calcio per la presenza di anidride carbonica in cui il contenuto dipende dall'ambiente in cui si trova. Nel calcestruzzo dopo la carbonatazione si osserva una mutazione delle sue proprietà fisico meccaniche, tra cui: aumento delle prestazioni meccaniche, riduzione della permeabilità e aumento del ritiro.

La corrosione delle armature è una delle cause più frequenti di degrado delle strutture in calcestruzzo armato. Questo processo è corrosivo ed ha una natura elettrochimica e richiede la presenza di un elettrolita a contatto con l'acciaio, che nel caso in studio l'elettrolita è costituito dalla soluzione nei pori capillari della pasta cementizia.

Se l'acciaio resiste alla corrosione, si trova in uno stato passivo cioè si corrode con velocità quasi nulla dove il processo corrosivo è termodinamicamente possibile. La passività non è una caratteristica dell'acciaio, ma lo diventa nel momento in cui si colloca in un determinato ambiente che favorisce un elevato pH.

Un calcestruzzo sano ha un $\text{pH} > 13$ e sui ferri si crea un film di ossido ferrico passivo che li rende impermeabili al passaggio di ossigeno e umidità.

Il pH del calcestruzzo si abbassa se la struttura è carbonatata e passa a valori che si possono dimostrare inferiori a 9 creando per le armature un ambiente poco alcalino. In presenza di pH inferiore a 11 il film passivante viene neutralizzato lasciando così i ferri esposti all'aggressione dell'ossigeno e dell'umidità presenti nell'aria. In queste condizioni si genera un'espansione e si innesca il processo di corrosione delle armature. Il copriferro in questo modo si distacca dall'armatura fino ad arrivare alla completa espulsione.

Nelle soluzioni alcaline aventi un $\text{pH} > 11,5$ ed in assenza di cloruri, il ferro d'armatura rimane in condizioni di passività e si contraddistingue perché

contiene un sottilissimo strato di ossido. Questo strato è costituito da ossidi di ferro, è ancorato alla sua superficie ed è in grado di isolarlo dalle sostanze aggressive che sono capaci di provocare corrosione. La velocità di corrosione, in condizioni di questo tipo, risulta nulla. A causa della presenza di ossido di sodio e di potassio nella soluzione dei pori, che stabilizzano il pH tra 13 e 14, il calcestruzzo si comporta come una soluzione alcalina, ma solo se confezionato e posato in opera correttamente.

Il calcestruzzo, una volta fessurato si presenta con un deterioramento dei ferri sempre più veloce in quanto si creeranno vie di accesso preferenziali per ossigeno e umidità.

L'anidride carbonica procede dall'esterno verso l'interno del calcestruzzo; la velocità con cui penetra è influenzata molto dal tenore di umidità. Il trasporto dell'anidride carbonica è più veloce in fase gassosa; all'interno dei pori colmi d'aria. Mentre è lento quando nei pori c'è presenza di umidità, di conseguenza nei pori saturi di acqua la velocità di penetrazione risulterà nulla. È importante ricordare che la carbonatazione avviene solo con presenza di umidità per cui essa risulta necessaria.

Il concetto di velocità della penetrazione della CO_2 , legata all'umidità relativa del calcestruzzo viene riassunta nel grafico che segue (Figura 97):

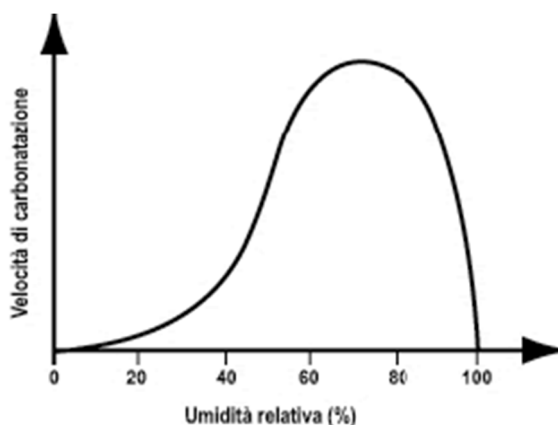


Figura 97 Velocità di carbonatazione rispetto alla percentuale di umidità relativa

I valori di umidità più pericolosi sono quelli compresi tra il 50 e l'80%, all'esterno di questo intervallo la velocità va diminuendo fino ad azzerarsi, sia in condizioni completamente asciutte che in condizioni completamente sature.

Il calcestruzzo armato, con il trascorrere del tempo può perdere le sue proprietà protettive e di conseguenza il film stesso di passività può essere danneggiato per questi motivi:

- Per carbonatazione; la neutralizzazione dell'alcalinità del calcestruzzo da parte dell'anidride carbonica proveniente dall'ambiente esterno.
- Per penetrazione di cloruri; quando sulla superficie delle armature viene raggiunto o superato un determinato tenore critico, in grado di distruggere il film protettivo.
- Per correnti disperse; che interferiscono con le armature passando in alcune parti dal calcestruzzo alle armature e in altre dalle armature al calcestruzzo.

Il processo corrosivo delle armature avviene se nel calcestruzzo a contatto con la loro superficie sono presenti ossigeno e acqua; questi due componenti combinati con il ferro danno origine ai prodotti di corrosione e vengono a mancare le condizioni di passività.

La presenza di anidride carbonica nell'atmosfera crea il fenomeno della carbonatazione. La concentrazione di CO₂ nell'aria è influenzata dai processi di combustione dei carburanti di origine fossile e da una riduzione generale della vegetazione che interessa senza alcuna distinzione, tutte le aree del pianeta. La concentrazione media attuale di CO₂ nell'aria nell'anno 2019, ha raggiunto 408 ppm (parti per milione) che equivale a 0,00066 kg CO₂ / m³.

La misurazione della carbonatazione del calcestruzzo avviene tramite il metodo della fenolftaleina. Questo metodo è definito dalla norma UNI EN 14630 e ha lo scopo di misurare lo spessore dello strato carbonato situato presso la superficie del calcestruzzo indurito. Il metodo di prova della fenolftaleina è inteso a misurare lo spessore dello strato carbonatato vicino alla superficie del calcestruzzo indurito (Figura 98). Può essere utilizzato in sito oppure in laboratorio, su provini o su carote o frammenti rimossi da strutture di calcestruzzo indurite.

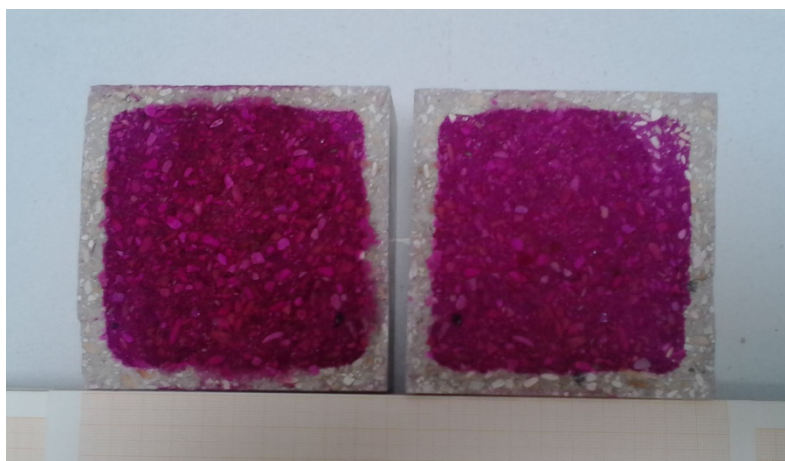


Figura 98 Esempio di zona non carbonatata (colore violaceo) sul provino R3 CEM dopo l'effettuazione della prova della fenolftaleina

Per stabilire se ci sia uno spessore sufficiente di calcestruzzo non carbonatato a proteggere l'armatura per il tempo di vita di progetto rimanente della struttura, dovrebbero essere determinate la profondità totale del copriferro e la profondità della carbonatazione. La profondità di carbonatazione determinata come definito nella presente norma è il metodo usato più diffusamente per misurare la profondità di carbonatazione. Si misura utilizzando come indicatore la fenolftaleina. Al di sopra di un valore del pH di circa 9, l'indicatore dà al calcestruzzo un colore rosso-violaceo, mentre al

di sotto è incolore. Solo il calcestruzzo che è colorato ha un'alcalinità sufficiente a fornire la passività per l'acciaio.

L'andamento della penetrazione della carbonatazione, in funzione del tempo, rispetta la seguente legge analitica:

$$x = k \cdot \sqrt{t}$$

dove x è lo spessore carbonatato, t è il tempo, k è un coefficiente che esprime la velocità con cui avviene la carbonatazione in funzione di alcuni fattori ambientali, tra cui l'umidità relativa, la temperatura e i fattori legati al calcestruzzo, come: l'alcalinità e la porosità. Infatti la porosità è legata al rapporto acqua/cemento, nel momento in cui diminuisce questo rapporto, si riduce anche la velocità di carbonatazione poiché diminuisce anche la porosità del materiale (Figura 99).

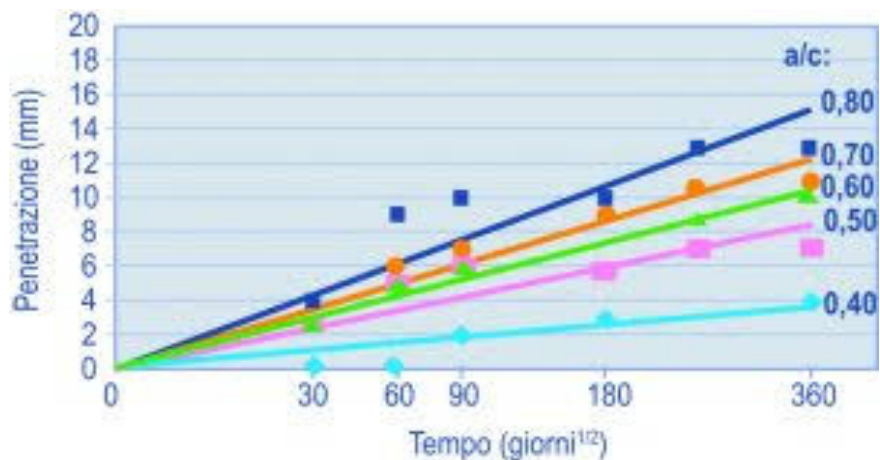


Figura 99 Spessore di calcestruzzo penetrato dalla CO₂ (x) in funzione del tempo (t) di esposizione all'aria, con UR=65% al variare del rapporto acqua/cemento (a/c)

9.7 Studio e analisi del processo di carbonatazione nelle malte

Nella presente tesi è stato effettuato uno studio relativo al processo di carbonatazione. I provini di calcestruzzo e di geopolimeri (lollipop e cubici), dopo il loro confezionamento e la loro regolare stagionatura sono stati inseriti in una camera a temperatura di $21 \pm 1^\circ\text{C}$ e con un'umidità relativa $65 \pm 10\%$, che effettua un processo di carbonatazione accelerata. Per far passare il gas all'interno della camera è stato utilizzato un serbatoio di gas CO_2 , strettamente sigillato per evitare delle perdite. La concentrazione di CO_2 è pari a $3 \pm 0,2 \text{ vol}\%$. Inoltre affinché l'anidride carbonica si presenti uniforme all'interno della camera, sono stati utilizzati dei ventilatori ad azione continua, posizionati su ogni ripiano (Figura 100).



Figura 100 Vista dell'interno della camera di carbonatazione accelerata

Sia i provini lollipop che i provini cubici sono stati sottoposti in camera di carbonatazione accelerata per circa 60 giorni in cui, per i primi sono state effettuate delle misurazioni temporali a cadenza settimanale e per i secondi sono state effettuate delle rotture per sottoporli alla prova della fenolftaleina.

Per i provini cubici sono state realizzati tre provini per ogni tipologia di malta e classe di resistenza, in totale 24 provini sottoposti a rottura e destinati ad essere analizzati con il metodo della fenolftaleina.

Le prime due rotture si sono verificate a 16 e 30 gg ed hanno portato i provini ad una divisione a metà dove è stata spruzzata la soluzione di fenolftaleina per verificare lo spessore di carbonatazione presente; ovvero la parte carbonatata da quella non carbonatata cioè alcalina. Infine i provini sono stati rivestiti con uno strato di resina trasparente impermeabile per poi essere reinserite in camera di carbonatazione.

Queste metà di provini sono state rotte di nuovo a 37, 44 e 58 giorni per effettuare nuovamente la prova di fenolftaleina.

Durante il periodo di carbonatazione accelerata, sia per i provini di malta cementizia che per quelli di malta geopolimerica, si sono ottenuti valori di profondità media di carbonatazione maggiori per le classi R1, valori intermedi per la classe R2, infine valori più bassi per la classe R3.

Nelle malte cementizie, durante il periodo suddetto, si sono rilevati i seguenti dati (Tabelle 75-77, Figura 101):

- i provini delle malte cementizie, dopo 16 giorni in camera di carbonatazione, hanno registrato delle profondità medie di carbonatazione pari a 33 mm per la classe R1, di 17 mm per la classe R2 e di 8 mm per la classe R3. Ottenendo un risultato che si mostra con la prima circa il doppio della seconda e quasi quattro volte la terza;
- la neutralizzazione del copriferro (15 mm) per le malte cementizie di classe R1 ed R2 si è verificata nei primi 16 giorni in camera di carbonatazione, invece nella classe R3 non si è rilevata per tutta la durata della prova. Infatti, la profondità media di carbonatazione per la classe R3 alla fine della prova si presenta di 14 mm;

- nella malta cementizia di classe R1 (in cui il rapporto calce/cemento è pari a 4), si sono ottenuti valori di profondità media di carbonatazione maggiori della classe R2, in cui il rapporto calce/cemento è pari a 1. Nella classe R3, i valori di profondità si mostrano decisamente minori rispetto alla classe R1 e il rapporto calce/cemento è 0.

A parità di percentuale di porosità ottenuta tra le due malte, in quelle di classe R1 l'anidride carbonica si è insinuata più velocemente rispetto alle malte di classe R2, a causa della presenza di pori con diametro medio maggiore del 50%. (25% per R1 e 24% per R2).

Tabella 75 Spessore medio carbonatato dopo le prove di fenolftaleina. Malta R1 CEM

R1 CEM				
DATA DELLA PROVA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (gg)	AREA PROVINO (mm ²)	AREA NON CARBONATATA (mm ²)	SPESSORE MEDIO CARBONATATO (mm)
11/05/2015	0	10000	1000	0
27/05/2015	16	10000	1752	33
10/06/2015	30	10000	1082	38
17/06/2015	37	5000	0	56

Tabella 76 Spessore medio carbonatato dopo le prove di fenolftaleina. Malta R2 CEM

R2 CEM

DATA DELLA PROVA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (gg)	AREA PROVINO (mm ²)	AREA NON CARBONATATA (mm ²)	SPESSORE MEDIO CARBONATATO (mm)
11/05/2015	0	10000	10000	0
27/05/2015	16	10000	4842	17
10/06/2015	30	10000	3933	21
17/06/2015	37	5000	1927	21
24/06/2015	44	5000	1601	24
08/07/2015	58	5000	931	33

Tabella 77 Spessore medio carbonatato dopo le prove di fenolftaleina. Malta R3 CEM

R3 CEM

DATA DELLA PROVA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (gg)	AREA PROVINO (mm ²)	AREA NON CARBONATATA (mm ²)	SPESSORE MEDIO CARBONATATO (mm)
11/05/2015	0	10000	10000	0
27/05/2015	16	10000	7243	8
10/06/2015	30	10000	6572	11
17/06/2015	37	5000	3216	11
24/06/2015	44	5000	2806	11
08/07/2015	58	5000	3278	14

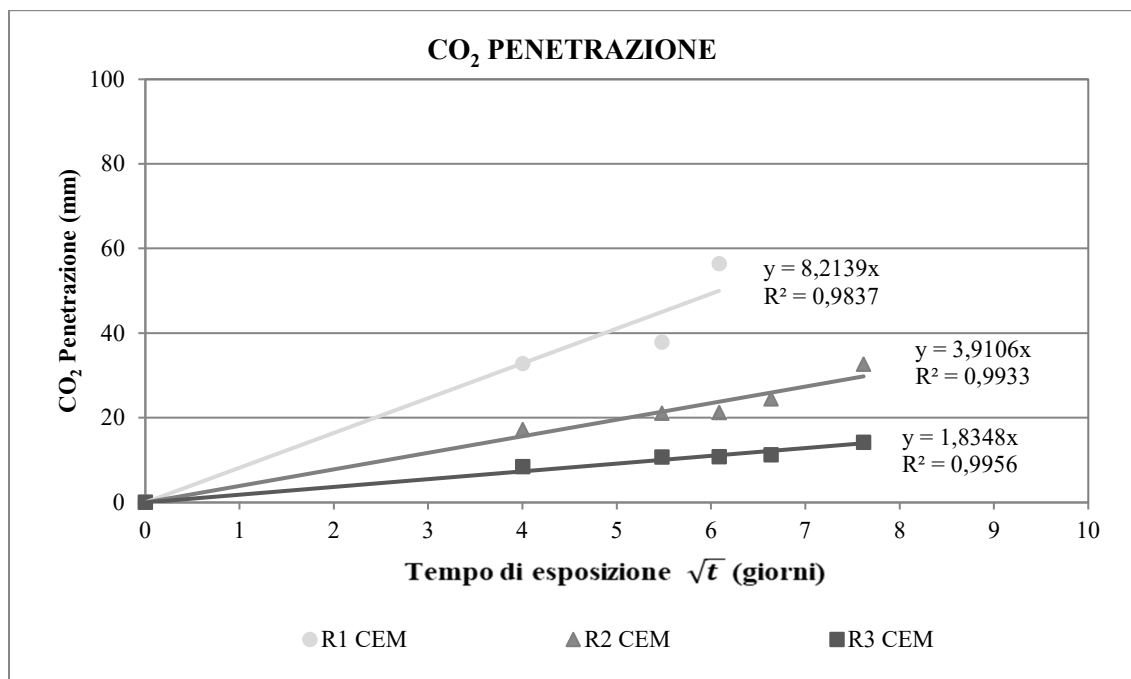


Figura 101 Spessore di malta penetrato dalla CO₂ in funzione del tempo (t). Malte cementizie

Nelle malte geopolimeriche in cenere volante e cemento alluminoso si sono ottenuti i seguenti dati (Tabelle 78-80, Figura 102):

- dopo 16 giorni in camera di carbonatazione, i provini hanno registrato delle profondità medie di carbonatazione pari a 51 mm per la classe R1, 39 mm per la classe R2 e 17 mm per la classe R3;
- la neutralizzazione del copriferro (15 mm) è avvenuta dopo i primi 16 giorni in camera di carbonatazione per tutte le malte in cenere volante e cemento alluminoso di ogni classe di resistenza;
- l'anidride carbonica si è insinuata più velocemente nelle malte di classe di resistenza R1 (rispetto a R2) e R2 (rispetto a R3), a causa di una maggiore porosità percentuale e di una maggiore presenza di vuoti e dimensioni dei pori.

Tabella 78 Spessore medio carbonatato dopo le prove di fenolftaleina. Malta R1 FAK

R1 FAK

DATA DELLA PROVA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (gg)	AREA PROVINO (mm ²)	AREA NON CARBONATATA (mm ²)	SPESSORE MEDIO CARBONATATO (mm)
11/05/2015	0	10000	10000	0
27/05/2015	16	10000	80	51
10/06/2015	30	10000	0	56

Tabella 79 Spessore medio carbonatato dopo le prove di fenolftaleina. Malta R2 FAK

R2 FAK

DATA DELLA PROVA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (gg)	AREA PROVINO (mm ²)	AREA NON CARBONATATA (mm ²)	SPESSORE MEDIO CARBONATATO (mm)
11/05/2015	0	10000	10000	0
27/05/2015	16	10000	926	39
10/06/2015	30	10000	370	46
17/06/2015	37	5000	0	56

Tabella 80 Spessore medio carbonatato dopo le prove di fenolftaleina. Malta R3 FAK

R3 FAK

DATA DELLA PROVA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (gg)	AREA PROVINO (mm ²)	AREA NON CARBONATATA (mm ²)	SPESSORE MEDIO CARBONATATO (mm)
11/05/2015	0	10000	10000	0
27/05/2015	16	10000	4899	17
10/06/2015	30	10000	4477	19
17/06/2015	37	5000	2018	21
24/06/2015	44	5000	1854	22
08/07/2015	58	5000	1837	22

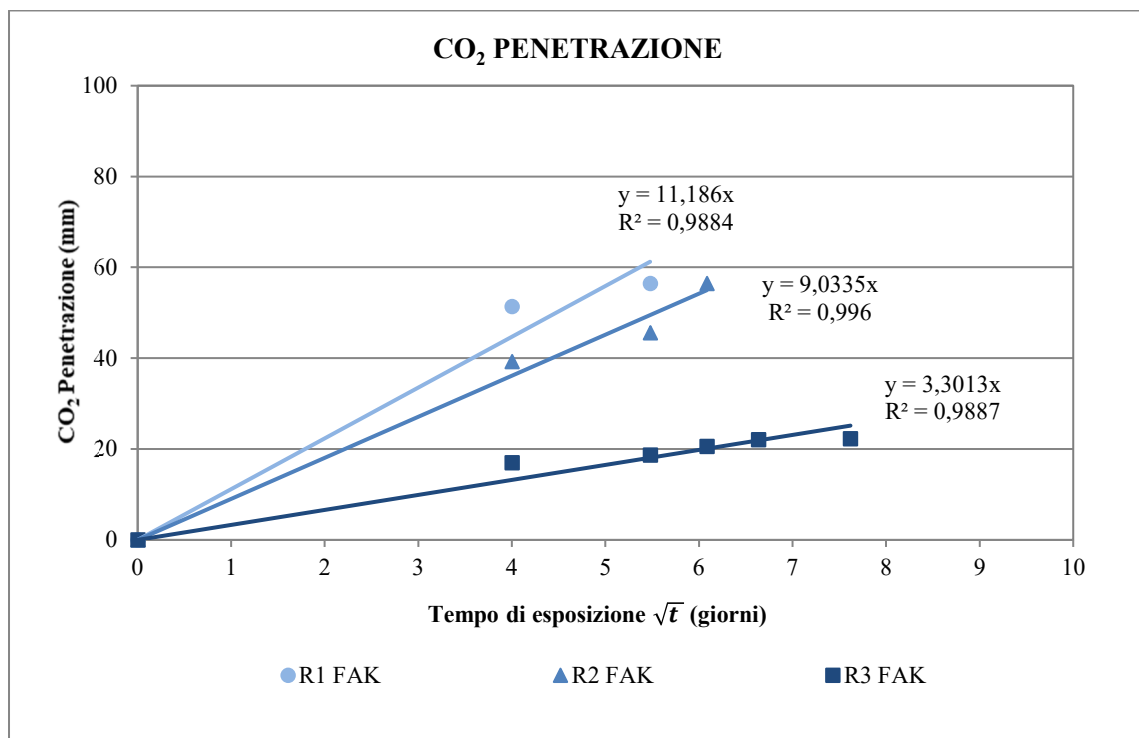


Figura 102 Spessore di malta penetrato dalla CO₂ in funzione del tempo (t). Malte geopolimeriche a base di cenere volante e cemento alluminoso

Nelle malte geopolimeriche in metacaolino si sono avuti i dati che seguono (Tabella 81-83, Figura 103):

- dopo 7 giorni di camera di carbonatazione, i provini hanno registrato delle profondità medie di carbonatazione pari a 51 mm per la classe R1, 45 mm per la classe R2 e 14 mm per la classe R3;
- la neutralizzazione del copriferro (15 mm) per le malte in metacaolino di classe R1 ed R2 è avvenuta nella prima settimana in camera di carbonatazione, mentre per la classe R3 si nota la neutralizzazione dopo due settimane della prova; infatti la profondità media di carbonatazione per la classe R3 dopo 14 giorni della prova si è mostrata di 15 mm;
- nelle malte in metacaolino di classe R1, dopo la prima settimana dall'inizio della prova si sono ottenuti valori di profondità media di carbonatazione che superano leggermente quelli della classe R2 e molto più grandi rispetto alla classe R3. Qui l'anidride carbonica è riuscita (a parità di porosità percentuale), ad insinuarsi più velocemente nelle malte di classe R1 rispetto alla classe R2 per la presenza di diametri medi dei pori maggiori del 35%.

Tabella 81 Spessore medio carbonatato dopo le prove di fenolftaleina. Malta R1 MKK

R1 MKK				
DATA DELLA PROVA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (gg)	AREA PROVINO (mm ²)	AREA NON CARBONATATA (mm ²)	SPESSORE MEDIO CARBONATATO (mm)
10/06/2015	0	10000	10000	0
17/06/2015	7	10000	4875	51
24/06/2015	14	10000	834	92
08/07/2015	28	5000	0	100

Tabella 82 Spessore medio carbonatato dopo le prove di fenolftaleina. Malta R2 MKK

R2 MKK

DATA DELLA PROVA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (gg)	AREA PROVINO (mm ²)	AREA NON CARBONATATA (mm ²)	SPESSORE MEDIO CARBONATATO (mm)
10/06/2015	0	10000	10000	0
17/06/2015	7	10000	5503	45
24/06/2015	14	10000	4335	57
08/07/2015	28	5000	0	100

Tabella 83 Spessore medio carbonatato dopo le prove di fenolftaleina. Malta R3 MKK

R3 MKK

DATA DELLA PROVA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (gg)	AREA PROVINO (mm ²)	AREA NON CARBONATATA (mm ²)	SPESSORE MEDIO CARBONATATO (mm)
10/06/2015	0	10000	10000	0
17/06/2015	7	10000	5693	14
24/06/2015	14	10000	5313	15
01/07/2015	21	5000	2585	16
08/07/2015	28	5000	2514	16

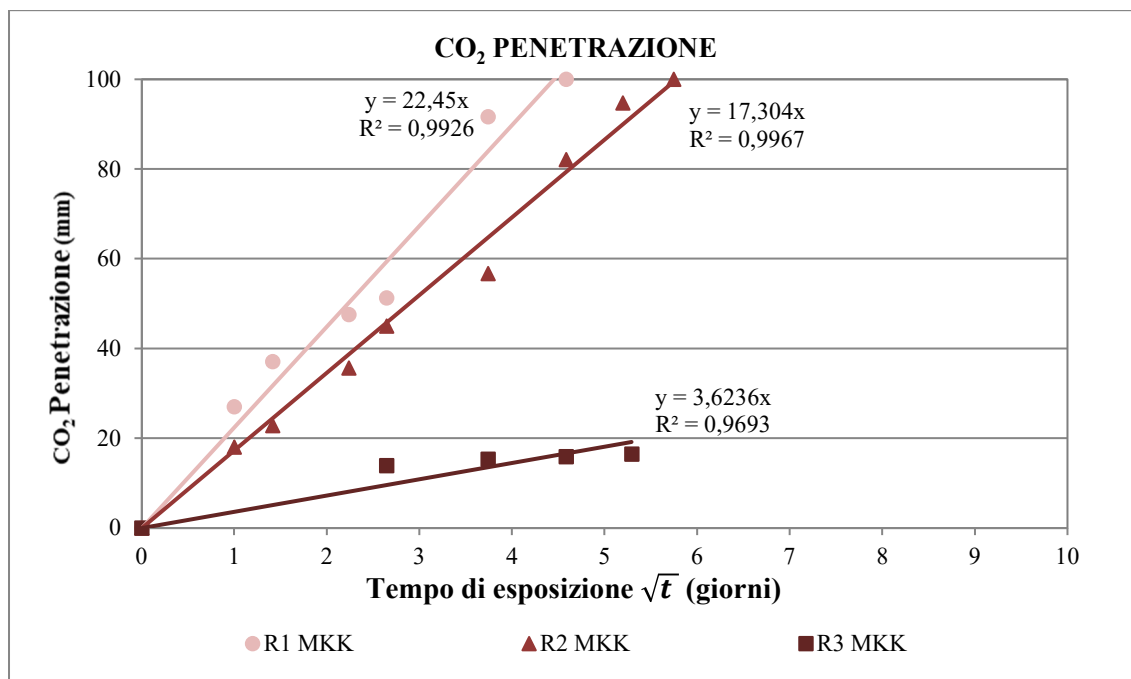


Figura 103 Spessore di malta penetrato dalla CO₂ in funzione del tempo (t). Malte geopolimeriche a base di metacaolino

Nelle malte geopolimeriche in cenere volante si sono ottenuti i seguenti dati (Tabelle 84-86, Figura 104):

- dopo 16 giorni di camera di carbonatazione, i provini hanno registrato delle profondità medie di carbonatazione pari a 33 mm per la classe R1, 27 mm per la classe R2 e 10 mm per la classe R3;
- la neutralizzazione del copriferro (15 mm) per le malte in cenere volante di classe R1 ed R2 è avvenuta nei primi 16 giorni di permanenza in camera di carbonatazione, a differenza della classe R3 in cui non è avvenuta per tutta la durata della prova, di fatto la profondità media di carbonatazione per la classe R3 alla fine della prova è di 13 mm;

- l'anidride carbonica si è insinuata più velocemente nelle malte di classe di resistenza R1 rispetto a R2 e quest'ultima rispetto a R3, a causa di una maggiore porosità percentuale e di una maggiore presenza di macro-porosità e dimensioni dei pori.

Tabella 84 Spessore medio carbonatato dopo le prove di fenolftaleina. Malta R1 FANa

R1 FANa				
DATA DELLA PROVA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (gg)	AREA PROVINO (mm ²)	AREA NON CARBONATATA (mm ²)	SPESSORE MEDIO CARBONATATO (mm)
11/05/2015	0	10000	10000	0
27/05/2015	16	10000	1694	33
10/06/2015	30	10000	305	47
17/06/2015	37	5000	0	56

Tabella 85 Spessore medio carbonatato dopo le prove di fenolftaleina. Malta R2 FANa

R2 FANa				
DATA DELLA PROVA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (gg)	AREA PROVINO (mm ²)	AREA NON CARBONATATA (mm ²)	SPESSORE MEDIO CARBONATATO (mm)
11/05/2015	0	10000	10000	0
27/05/2015	16	10000	2642	27
10/06/2015	30	10000	1329	36
17/06/2015	37	5000	479	39
24/06/2015	44	5000	0	56

Tabella 86 Spessore medio carbonatato dopo le prove di fenolftaleina. Malta R3 FANa

R3 FANa				
DATA DELLA PROVA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (gg)	AREA PROVINO (mm ²)	AREA NON CARBONATATA (mm ²)	SPESSORE MEDIO CARBONATATO (mm)
11/05/2015	0	10000	10000	0
27/05/2015	16	10000	6730	10
10/06/2015	30	10000	6635	10
17/06/2015	37	5000	3179	11
24/06/2015	44	5000	3003	11
08/07/2015	58	5000	3251	13

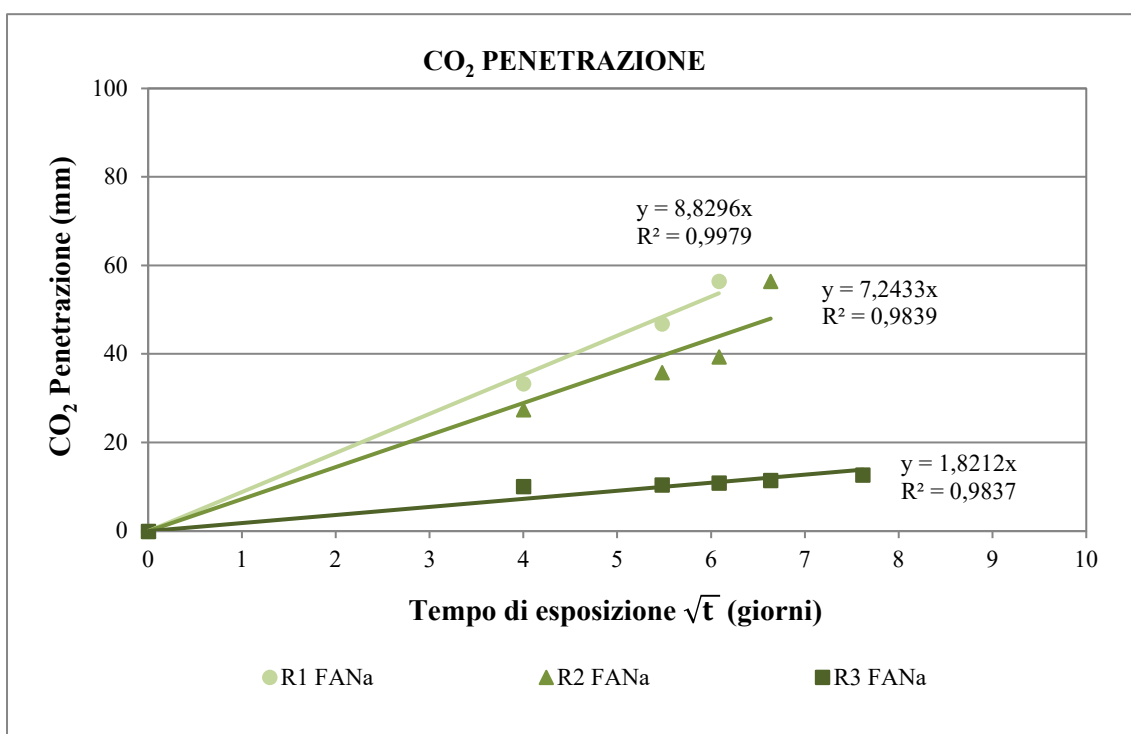


Figura 104 Spessore di malta penetrato dalla CO₂ in funzione del tempo (t). Malte geopolimeriche a base di cenere volante

Confrontando la profondità di carbonatazione per le diverse malte, a parità di classe di resistenza, si nota che (Figure 105-107):

- dopo due settimane in camera di carbonatazione si hanno profondità di carbonatazione superiori al copriferro (15 mm) per tutti i provini di classe R1 e R2;
- per la classe di resistenza R1, dopo due settimane dall'inizio della prova, si ottengono profondità di carbonatazione maggiori per le malte in metacaolino che hanno una porosità totale maggiore rispetto agli altri composti e pari al 35%. Inoltre, i provini di classe R1 CEM, nonostante una porosità totale maggiore rispetto alle malte in cenere volante (FANa e FAK), si caratterizzano per una profondità di carbonatazione minore alle altre due malte, in quanto la malta R1 CEM è composta da un diametro medio dei pori minore rispetto a quello degli altri composti in cenere volante.
- Per la classe di resistenza R2, dopo due settimane dall'inizio della prova, la profondità di carbonatazione è massima per la malta R2 MKK poiché ha una porosità totale maggiore rispetto a tutte le altre. La malta cementizia R2 CEM invece ottiene una carbonatazione maggiore rispetto a quelle in cenere volante (FANa e FaK) poiché ha una porosità maggiore.
- per la classe di resistenza R3 si sono ottenute profondità di carbonatazione che superano il copriferro (15 mm) già dopo 16 giorni per le malte in metacaolino e le malte in cenere volante-cemento alluminoso, mentre per le malte in cemento e cenere volante la profondità è minore al copriferro per tutta la durata della prova (13 mm per R3 FANa e 14 mm per R3 CEM).
- per la classe R3 si hanno per le malte in metacaolino profondità di carbonatazione massime poiché presentano delle porosità totali

maggiori rispetto alle altre malte, mentre si hanno profondità minori per quelle in cenere volante e cementizie.

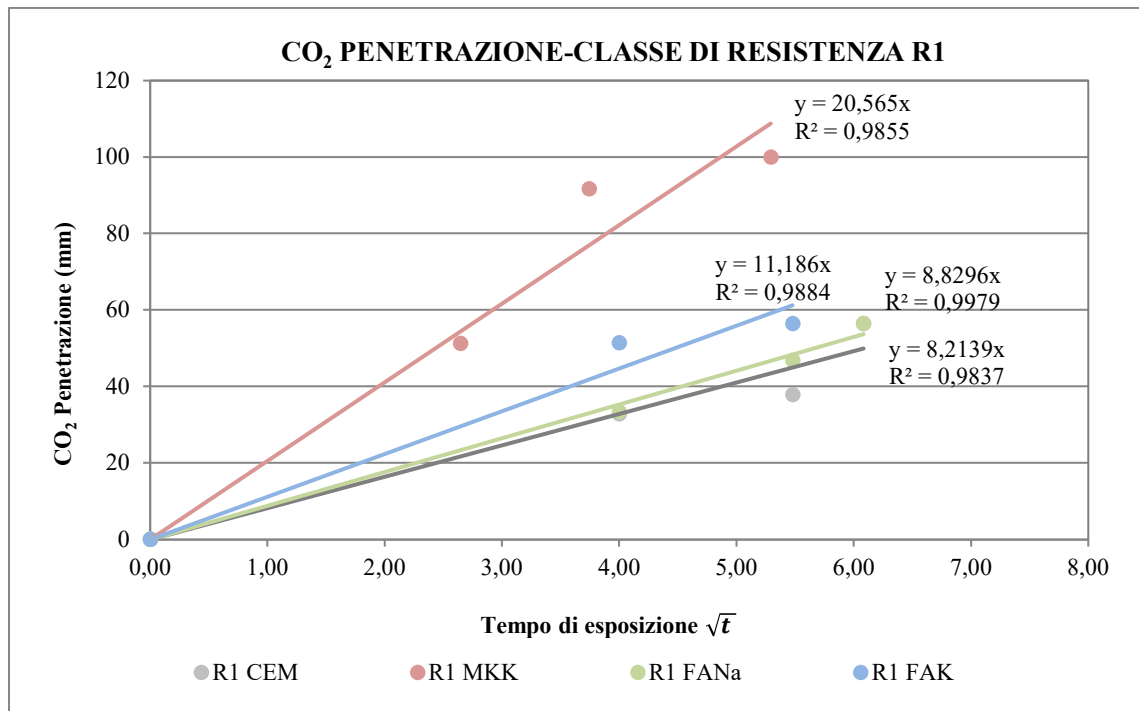


Figura 105 Spessore di malta penetrato dalla CO₂ in funzione del tempo (t). Malte cementizie e geopolimeriche di classe R1

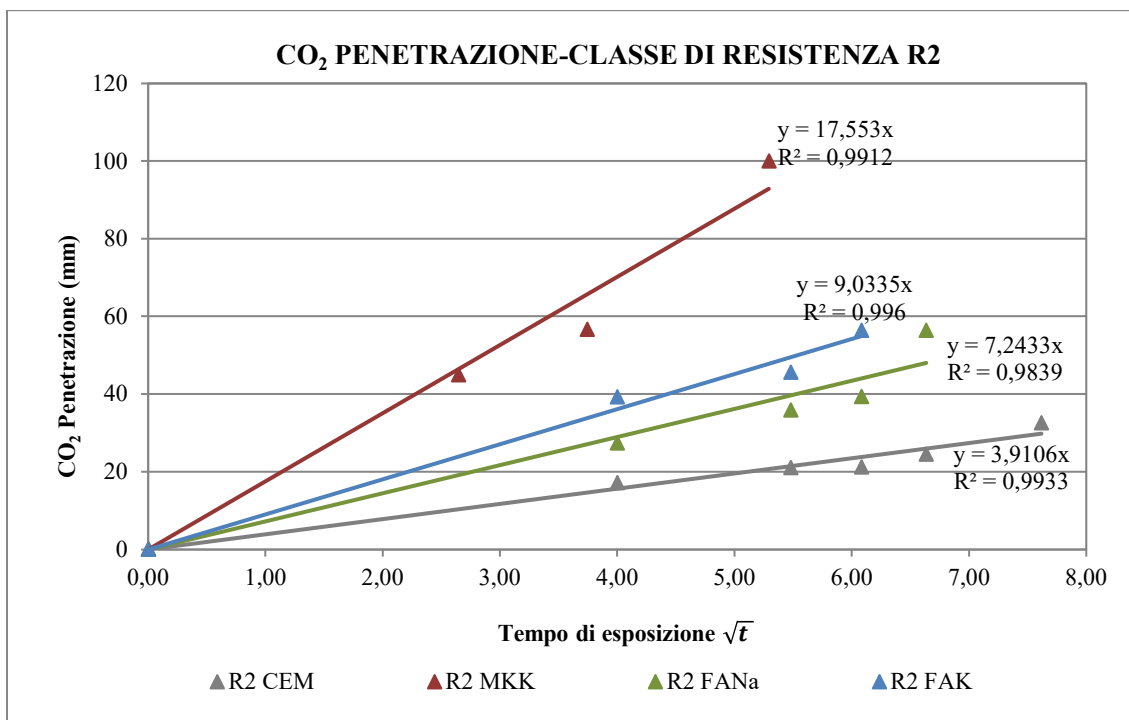


Figura 106 Spessore di malta penetrato dalla CO₂ in funzione del tempo (t). Malte cementizie e geopolimeriche di classe R2

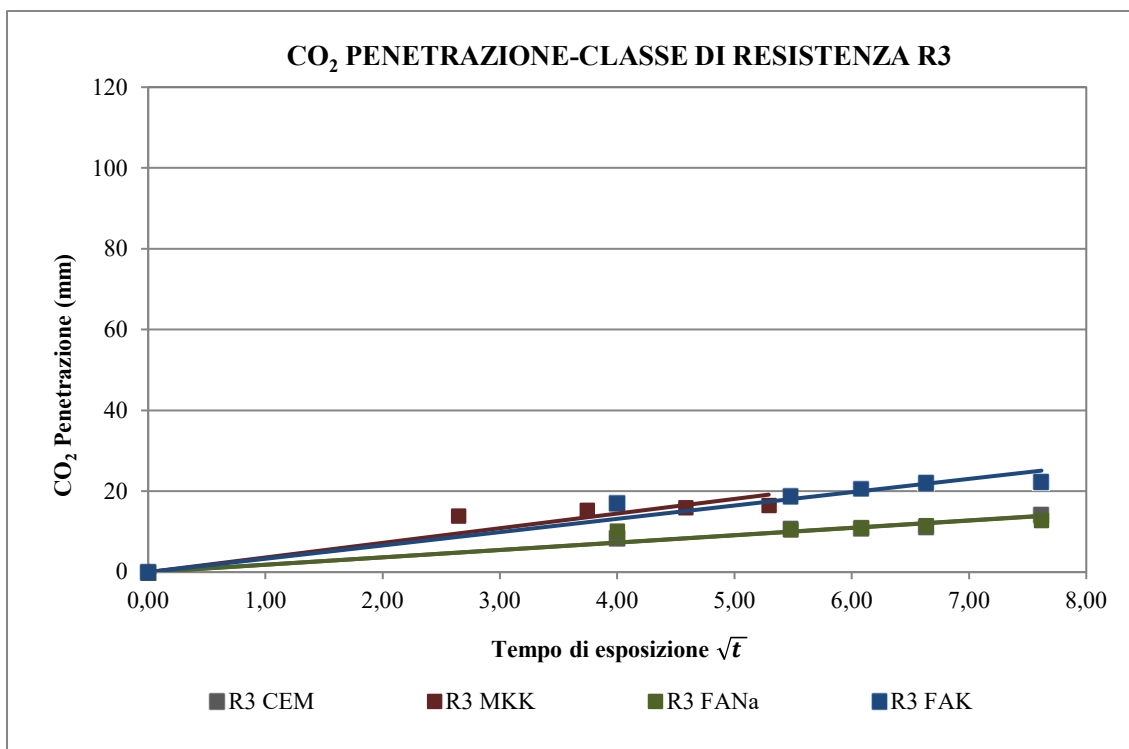


Figura 107 Spessore di malta penetrato dalla CO₂ in funzione del tempo (t). Malte cementizie e geopolimeriche di classe R3

9.8 Misurazione del potenziale di corrosione

Nel presente lavoro nelle misure effettuate è stato rilevato il potenziale di corrosione E_{corr} , che è considerato il principale indicatore dello stato elettrochimico delle barre immerse nei composti di malta.

Questa è una tecnica di misurazione non distruttiva, tramite cui è possibile determinare lo stato di passivazione della barra. In questo modo si rileva la potenziale presenza di un sistema protettivo della barra o se, al contrario, esistono le condizioni per un attacco corrosivo; definito processo di degrado dell'armatura immersa. Secondo questo procedimento si verifica la presenza o meno di fenomeni corrosivi, ma non l'entità degli stessi.

Lo strumento che viene utilizzato per la lettura delle rilevazioni è un multimetro digitale ad alta impedenza in ingresso che si serve di un elettrodo di riferimento (Figura 108).

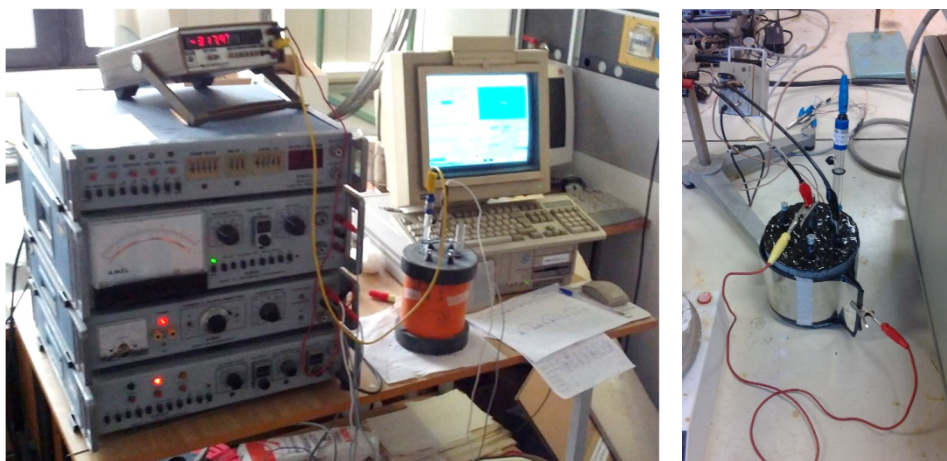


Figura 108 A destra la macchina di rilevazione e a sinistra esempio di connessione adottata con i provini di malta per effettuare le misurazioni

L'elettrodo di riferimento utilizzato è un elettrodo al calomelano saturo (SCE), che viene collocato nelle cavità realizzate sulla superficie superiore dei provini. Un buon contatto elettrico è necessario per una corretta

misurazione del potenziale, per garantire questa condizione sono state utilizzate soluzioni di idrossido 0,04M (ovvero soluzione di idrossido di calcio, di potassio o di sodio, a seconda della malta su cui si effettua la rilevazione). Queste soluzioni prima di ogni rilevazione, sono state versate nelle cavità di alloggiamento degli elettrodi.

Una volta posto l'elettrodo a contatto con la malta, è stato possibile leggere il valore fornito dal multimetro. Così si è verificata la potenziale presenza di uno stato corrosivo che, nel caso delle armature zincate, viene individuata da valori di $E_{\text{corr}} \leq -1043 \text{ mV/SCE}$ e nel caso di armature in acciaio nero con valori di $E_{\text{corr}} \leq -275 \text{ mV/SCE}$.

Le rilevazioni qui descritte sono state effettuate una volta a settimana nei giorni in cui i provini erano sottoposti a carbonatazione accelerata, adottata per carbonatare lo spessore del copriferro. Invece durante i cicli asciutto-bagnato utilizzati per innescare la corrosione (6 giorni in asciutto e 1 in bagnato) per due volte a settimana, uno prima di estrarre i provini dall'acqua e uno prima di rimmergerli nell'acqua.

In seguito, vengono riportati gli andamenti dei potenziali di corrosione delle barre in acciaio nero durante il periodo di carbonatazione accelerata (Figura 109).

Esse in tutte le malte rimangono in uno stato passivo, tranne per le classi R1 e R2 delle malte cementizie in quanto già dopo qualche giorno in camera di carbonatazione, presentano uno stato attivo, poiché il valore di E_{corr} scende sotto i valori di -275 mV/SCE .

Dettagliatamente, le armature in acciaio nero delle malte cementizie nella classe R1, passano in una fase attiva dal nono giorno con valori di potenziale pari a -475 mV/SCE fino a scendere a valori di -536 mV/SCE , per poi tornare in una fase passiva tra il settantanovesimo e l'ottantasettesimo giorno, in cui i valori di potenziale sono pari a -219 mV/SCE . Infine al novantaquattresimo

giorno, i valori di potenziale di corrosione ripresentano uno stato attivo che rimane tale fino alla fine della prova con valori di potenziale che scendono fino a -379 mV/SCE. Nella classe R2 i valori raggiungono una fase attiva dal sedicesimo al quarantaquattresimo giorno con valori di -319 mV/SCE, successivamente passano ad una fase passiva che durerà fino a poco prima dell'uscita dalla camera di carbonatazione accelerata ed infine ritornano ad uno stato attivo con valori di -318 mV/SCE. Nella classe R3, le armature in acciaio hanno un andamento del potenziale leggermente oscillante con valori compresi tra -214 e -41 mV/SCE.

Invece, i provini di malte in metacaolino, presentano andamenti dei potenziali altalenanti crescenti nel tempo, nelle barre di acciaio nero. Precisamente; le armature della classe R1 registrano valori compresi tra 26 e 177 mV/SCE, quelle di classe R2 valori compresi tra 13 e 158 mV/SCE ed infine per la classe R3 valori compresi tra -122 e -8 mV/SCE.

Anche le armature dei provini in cenere volante hanno un andamento del potenziale altalenante crescente nel tempo, ma per le armature dei provini di classe R1 si registrano valori compresi tra -77 e -21 mV/SCE, per quelli di classe R2 i valori sono compresi tra -87 e -73 mV/SCE ed infine nei provini di classe R3 i valori sono compresi tra -117 e -8 mV/SCE.

In ultima analisi le armature dei provini in cenere volante-cemento alluminoso mostrano andamenti altalenanti crescenti nel tempo, ad eccezione delle classi R1 ed R2 che mostrano variazioni significative di potenziale nei primi 27 giorni in camera di carbonatazione accelerata, per procedere con variazioni minime. Nella classe R3, invece le variazioni del potenziale sono piccole per tutta la durata della prova. Le armature della classe R1 presentano valori compresi tra -99 e -62 mV/SCE, ma per la classe R2 i valori sono compresi tra -167 e -62 mV/SCE e per quelli di classe R3 valori compresi tra -175 e -15 mV/SCE.

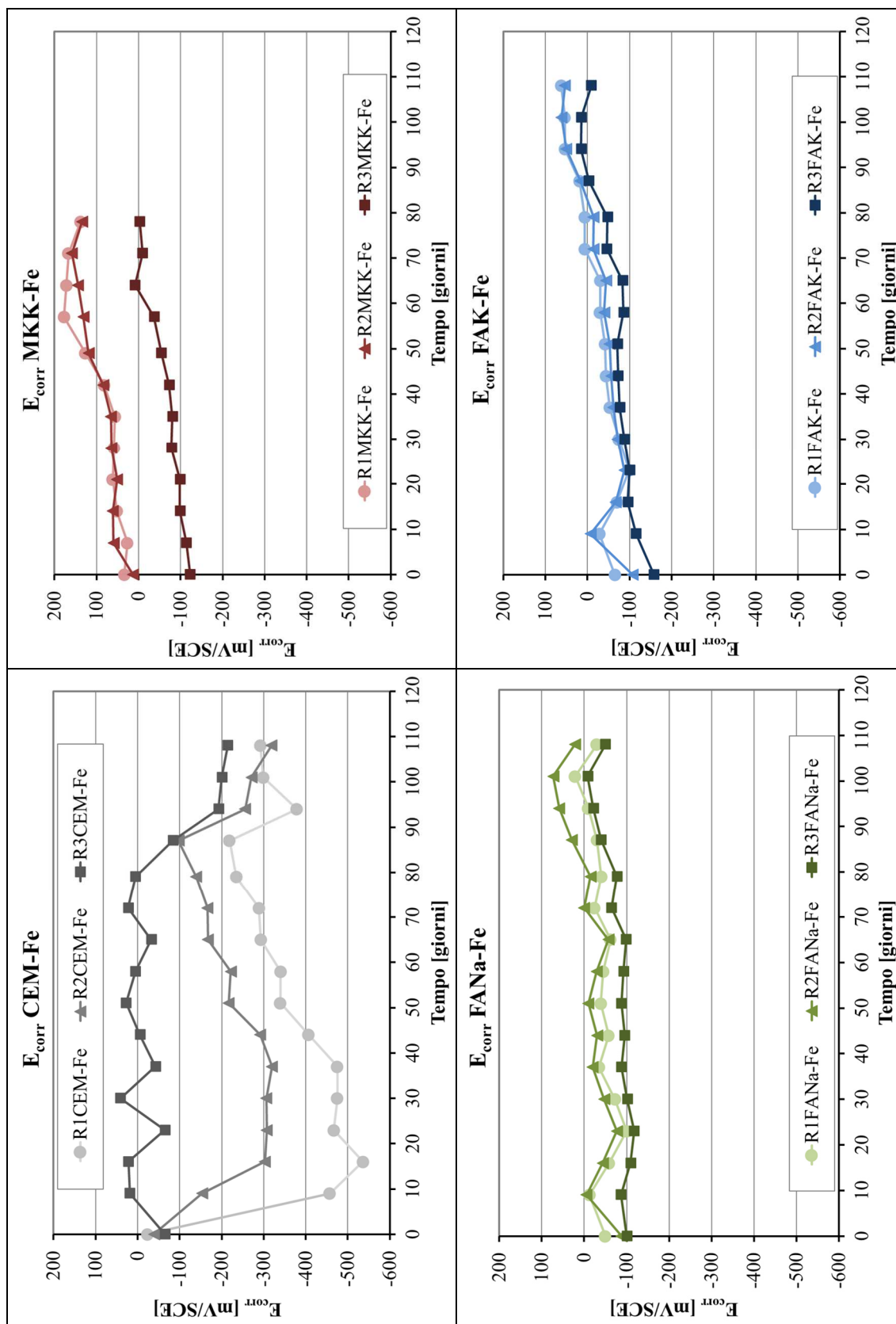


Figura 109 E_{corr} delle barre in acciaio nero durante il periodo di carbonatazione accelerata

Parlando delle barre in acciaio zincato, gli andamenti dei potenziali di corrosione durante il periodo di carbonatazione accelerata mantengono uno stato passivo in tutte le malte prese in esame (Figura 110).

Nelle armature delle malte cementizie gli andamenti di potenziale presentano delle oscillazioni, ma per le classi R1 e R2 si notano fasi con variazioni significative mentre per la classe R3 si hanno variazioni minime. Nello specifico nella classe R1 si sono verificati valori compresi tra -959 e -297 mV/SCE, nella classe R2 valori tra -887 e -292 mV/SCE, per finire nella classe R3 valori compresi tra -360 e -145 mV/SCE.

Gli andamenti dei potenziali delle armature di acciaio zincato nelle malte in metacaolino presentano valori diversi, in cui per le barre delle malte di classe R1 si sono ottenuti valori compresi tra -445 e -121 mV/SCE, per la classe R2 valori compresi tra -339 e -161 mV/SCE e infine in quelli di classe R3 con valori compresi tra -443 e -275 mV/SCE.

Nelle armature delle malte in cenere volante i potenziali hanno variazioni minime. Nelle barre di malta di classe R1 si sono ottenuti valori compresi tra -202 e -76 mV/SCE, mentre in quelle di classe R2 i valori risultano compresi tra -150 e -30 mV/SCE e, infine, in quelli di classe R3 valori compresi tra -202 e -84 mV/SCE.

Anche per le armature delle malte in cenere volante e cemento alluminoso non si notano andamenti altalenanti; dove nelle malte di classe R1 si sono ottenuti valori del potenziale di corrosione compresi tra -284 e -135 mV/SCE, per quella di classe R2 valori compresi tra -241 e -77 mV/SCE ed infine nella classe R3 valori compresi tra -285 e -188 mV/SCE.

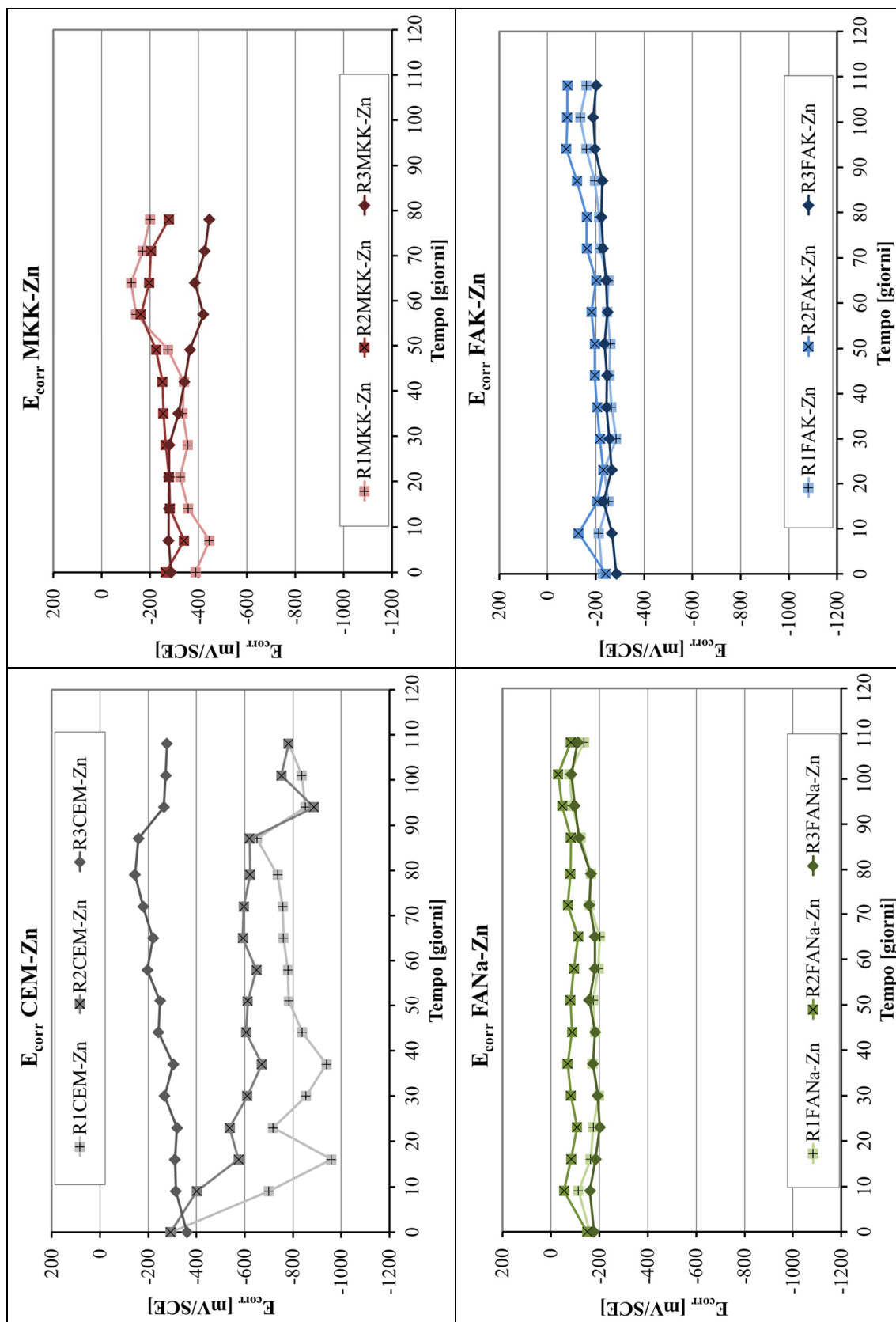


Figura 110 E_{corr} delle barre in acciaio zincato durante il periodo di carbonatazione accelerata

Di seguito si riportano i grafici relativi ai potenziali di corrosione delle barre in acciaio nero durante i cicli di asciutto-bagnato in acqua potabile (Figura 111).

Da una prima analisi, si può affermare che i potenziali delle barre negli impasti geopolimerici restano in una condizione passiva per tutta la durata dei cicli asciutto-bagnato, mentre le armature degli impasti cementizi passano subito ad una fase attiva.

Infatti per le barre delle malte cementizie si registrano andamenti altalenanti dei potenziali con valori più alti durante le fasi asciutte e più basse in quelle bagnate. Per gli impasti di classe R1 e R2 si notano andamenti dei potenziali variabili con valori elevati tra le diverse fasi, mentre in quelle di classe R3 si notano degli andamenti oscillanti contraddistinte da variazioni notevoli tra le due fasi. Dal cinquantasettesimo giorno a partire dall'inizio dei cicli e per diverse fasi di asciutto, il valore del potenziale ritorna passivo.

Nelle barre degli impasti geopolimerici si hanno valori dei potenziali di corrosione oscillanti con variazioni minime tra le diverse fasi di asciutto e bagnato.

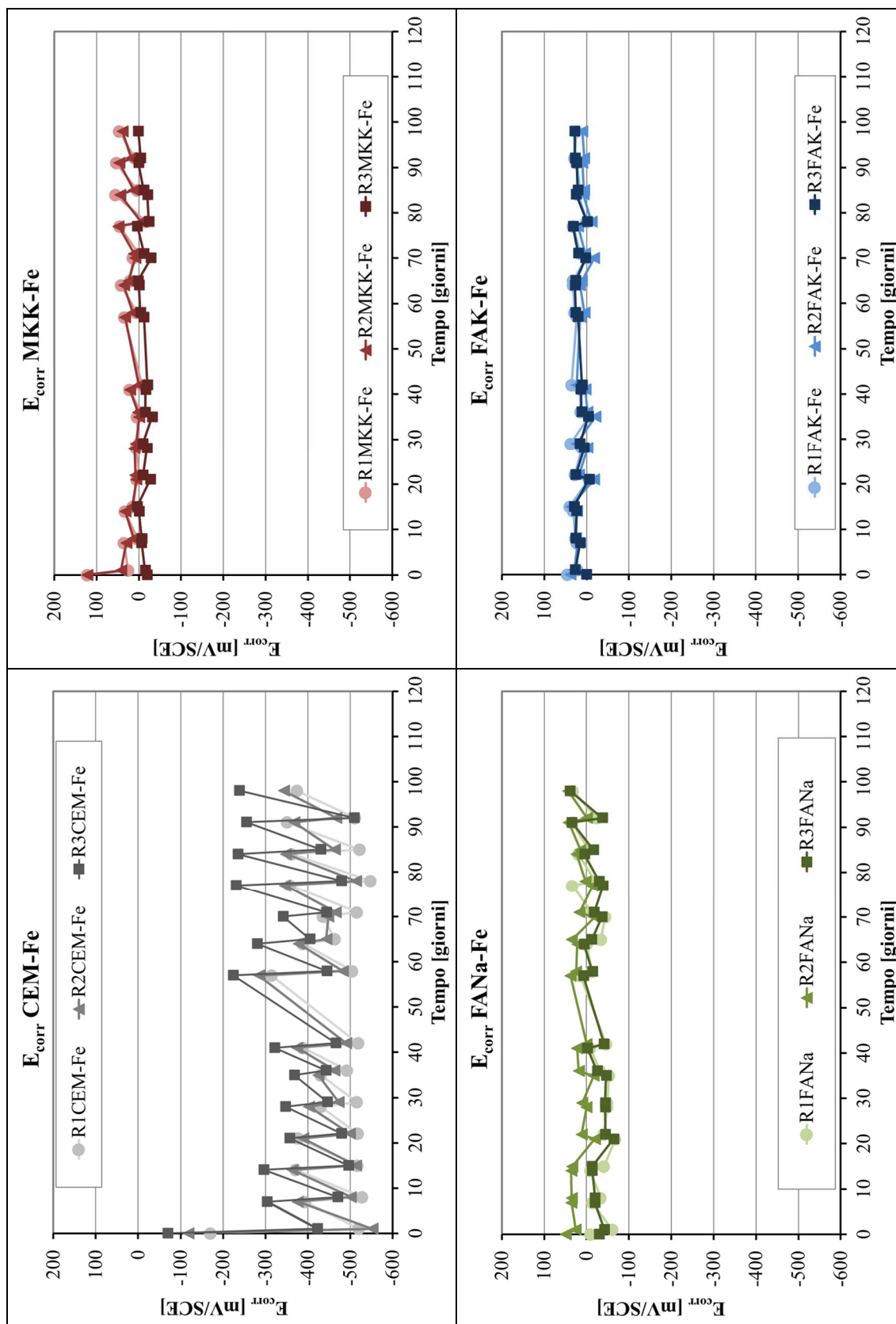


Figura 111 E_{corr} delle barre in acciaio nero durante i cicli di asciutto-bagnato

Dai risultati dei potenziali di corrosione ottenuti nelle barre di acciaio zincato degli impasti cementizi e geopolimerici si nota che, per tutta la durata dei cicli di asciutto-bagnato, esse si trovano in una condizione passiva (Figura 112).

Nelle barre degli impasti cementizi, si hanno degli andamenti dei potenziali con valori in asciutto più alti rispetto a quelle di bagnato; per la classe R1 i potenziali delle barre hanno un andamento con variazioni piccole, mentre in quelle di classe R2 e R3 gli andamenti presentano variazioni alte tra le due fasi.

Negli impasti geopolimerici in metacaolino, si verifica una situazione analoga a quella delle malte cementizie. Il potenziale di corrosione delle barre per tutte e tre le classi di resistenza ha andamenti che oscillano e presentano variazioni notevoli e con valori più alti nelle fasi asciutte e più basse nelle fasi bagnate.

Nelle barre zincate degli impasti in cenere volante e in quelle in cenere volante-cemento alluminoso, si notano degli andamenti di potenziale altalenanti con variazioni piccole; soltanto per le barre dell'impasto in cenere volante-cemento alluminoso nella classe R3, inizialmente si riscontrano valori con variazioni notevoli tra le due fasi presentando valori più alti in asciutto, mentre nelle fasi bagnate i valori si mostrano più bassi e in diminuzione nel tempo fino a terminare con variazioni minime.

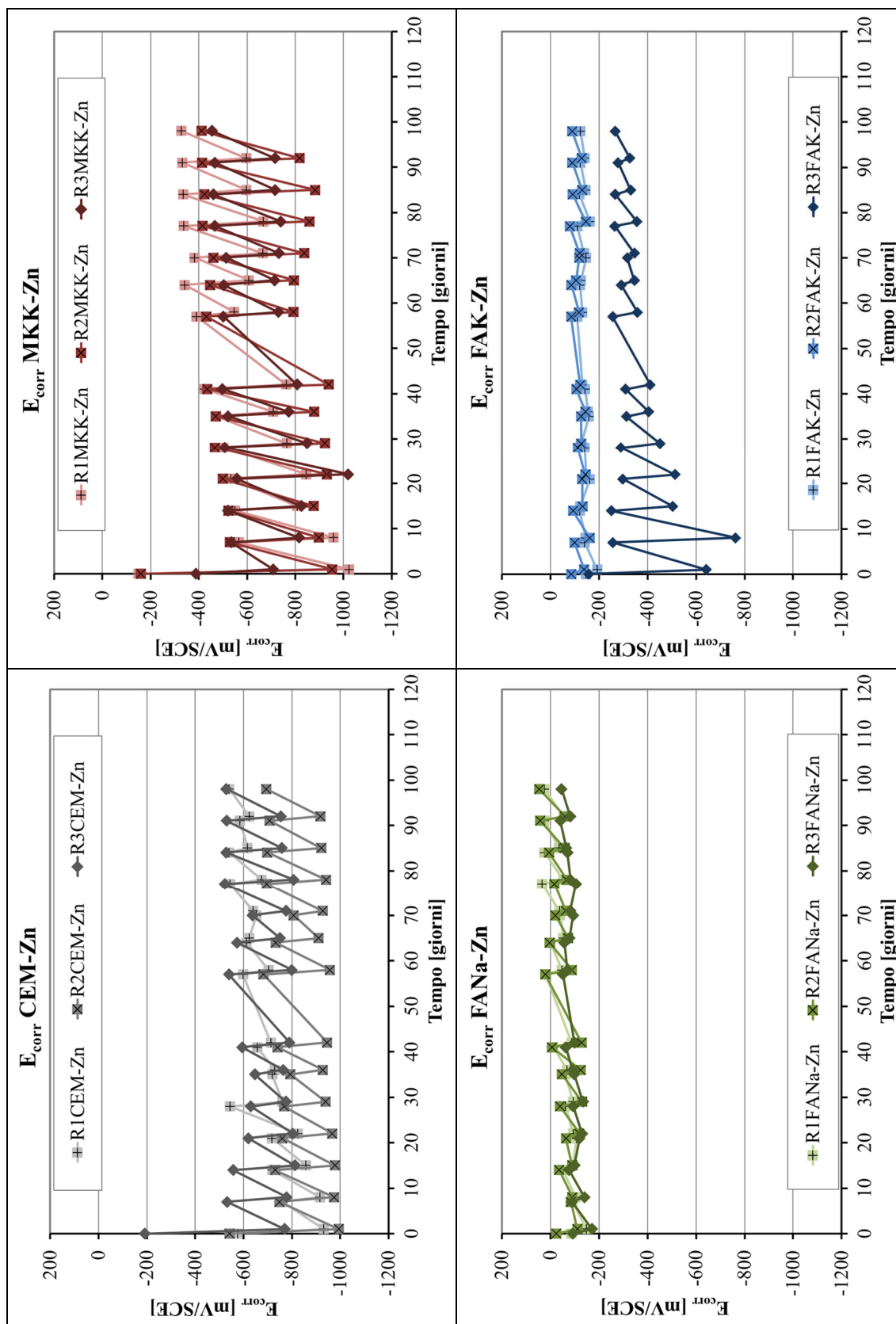


Figura 112 E_{corr} delle barre in acciaio zincato durante i cicli di asciutto-bagnato

9.9 Misurazione della velocità di corrosione

Oltre alla misura del potenziale di corrosione, utilizzata per individuare il possibile innesco dei processi corrosivi, il relativo movimento è stato monitorato mediante la misurazione della velocità di corrosione v_{corr} , nel tempo. Dalla tecnica utilizzata per la rilevazione dei potenziali di corrosione, si ottengono dei dati, da cui una volta elaborati, è possibile ottenere la velocità di corrosione espressa in $\mu\text{m}/\text{anno}$. Questa tecnica si basa sull'esistenza di una dipendenza lineare tra la variazione di potenziale e la corrente che circola nella cella elettrochimica di misura.

Inizialmente, occorre individuare la densità di corrente di corrosione i , espressa dalla seguente equazione:

$$i = \frac{\beta_a \cdot \beta_b}{2,303 \cdot (\beta_a + \beta_b) \cdot R_p}$$

dove β_a rappresenta la pendenza della retta anodica di Tafel e β_b rappresenta la pendenza della retta catodica di Tafel.

La resistenza di polarizzazione R_p , viene individuata come:

$$R_p = \frac{\Delta E}{i \cdot S}$$

dove S è la superficie laterale del campione esposto, misurata in cm^2 e pari a $15,93 \text{ cm}^2$; ΔE è la variazione di potenziale ed i è la densità di corrente di corrosione. La resistenza alla polarizzazione è inversamente proporzionale alla velocità di corrosione.

La resistività elettrica R_s è considerata l'attitudine di un materiale ad opporre resistenza al passaggio delle cariche elettriche. Nel sistema internazionale, la resistività si misura in ohm per metro ($\Omega \cdot \text{m}$). Pertanto, per ridurre la percentuale di errore che si commette, il valore della resistività elettrica è

stato sottratto alla resistenza di polarizzazione elaborata dallo strumento in fase di sperimentazione.

La velocità di corrosione verrà calcolata attraverso delle equazioni con coefficienti variabili (a seconda della tipologia di armatura analizzata).

Per le armature in acciaio zincato si ha:

$$v_{corr} = \frac{389080}{R_p - R_s}$$

Per le armature in acciaio nero si ha:

$$v_{corr} = \frac{301520}{R_p - R_s}$$

Con R_p ottenuta dal prodotto della resistenza misurata in Ω e la superficie esposta della barra, misurata in cm^2 .

La Resistenza alla polarizzazione è stata misurata tramite una cella elettrochimica, ovvero tramite:

- un elettrodo di lavoro (la barra di armatura);
- un contro-elettrodo (la barra in acciaio inox posizionata al centro del provino);
- un elettrodo di riferimento.

Una volta collegati a un galvanostato le barre soggette a rilevazione e il contro-elettrodo, è stata fornita corrente a velocità costante tra l'elettrodo di lavoro e il contro-elettrodo, in modo da polarizzare l'elettrodo di lavoro ed ottenere la variazione del potenziale di corrosione (misurato tramite l'utilizzo di un voltmetro ad alta impedenza).

Il metodo di rilevazione, nel suo insieme, è costituito dalle seguenti fasi:

- la misurazione del potenziale di corrosione della generica barra tramite il voltmetro e l'elettrodo di riferimento;
- la polarizzazione anodica, ovvero l'imposizione di una corrente esterna tale da fornire un aumento di potenziale di +5 mV, portando il potenziale a valori più nobili;
- la polarizzazione catodica, ovvero l'imposizione di una corrente tale da determinare una diminuzione del potenziale di 5 mV, rispetto al potenziale di corrosione (tutto ciò dopo aver atteso che l'armatura riacquistasse il potenziale di corrosione iniziale, una volta interrotto il passaggio di corrente).

La velocità di scansione della corrente utilizzata è pari a 0,5 $\mu\text{A}/\text{sec}$.

Dalle fasi riportate sopra si ottiene (tramite la scheda di acquisizione del terminale) un grafico con le curve di polarizzazione anodica e catodica, in cui in ordinata è presente la variazione di potenziale ΔI e in ascissa la corrente applicata ΔE . Dalla media delle pendenze delle rette di interpolazione delle curve di polarizzazione anodica e catodica si ottiene la resistenza alla polarizzazione R_p .

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dallo studio delle v_{corr} degli acciai neri (Figura 113) e degli acciai zincati durante il periodo di carbonatazione accelerata.

Per le barre di acciaio nero nelle malte cementizie si rispecchia ciò che si è ottenuto dagli sviluppi dei potenziali di corrosione. Infatti per le barre del provino di classe R1 si hanno velocità intermedie con andamenti altalenanti che decrescono durante la fase attiva dei potenziali mentre si hanno velocità moderate nella fase passiva; per la classe R2 abbiamo velocità moderate con andamenti decrescenti oscillanti nella fase attiva e velocità basse nella fase

passiva ed infine per le barre di classe R3 si mostrano velocità moderate con andamenti che decrescono nel tempo.

Le armature degli impasti geopolimerici sono caratterizzati da velocità di corrosione intermedia; nelle barre degli impasti in cenere volante si hanno delle velocità intermedie con andamenti quasi costanti per tutte le classi di resistenza con valori di circa 15 $\mu\text{m}/\text{anno}$, invece per quelle in cenere volante-cemento alluminoso di circa 13 $\mu\text{m}/\text{anno}$, per finire con gli impasti in metacaolino che hanno velocità intermedie oscillanti.

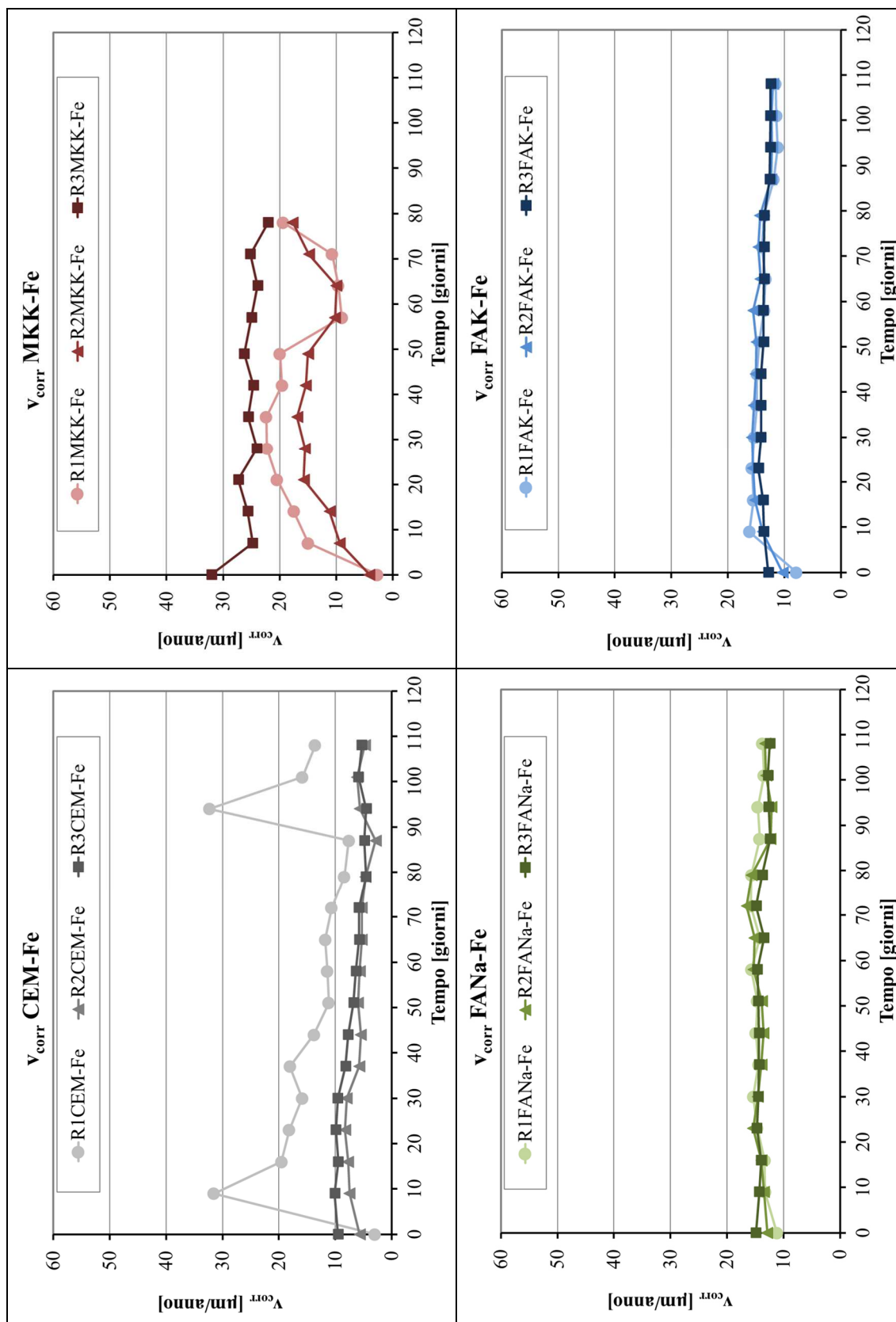


Figura 113 v_{corr} delle barre in acciaio nero durante il periodo di carbonatazione accelerata

Anche nelle armature in acciaio zincato degli impasti cementizi si rispecchiano i valori dei potenziali ottenuti in precedenza (Figura 114). Infatti nelle barre dell'impasto di classe R1 si hanno velocità di corrosione intermedie in corrispondenza dei valori dei potenziali minori di -800 mV/SCE e velocità moderate per valori di potenziali più alti. Nelle armature di classe R2 si hanno velocità basse fino all'ottantasettesimo giorno per arrivare a velocità moderate quando il potenziale si abbassa al di sotto di -800 mV/SCE. Nelle barre di classe R3 si ottengono velocità basse fino all'ottantasettesimo giorno per poi notare delle velocità trascurabili perché sono inferiori a 2 $\mu\text{m}/\text{anno}$.

Per le barre degli impasti geopolimerici in metacaolino si hanno velocità di corrosione basse per gli impasti di classe R1 e R2 mentre velocità moderate per quelle di classe R3.

Negli impasti in cenere volante, le velocità di corrosione delle armature zincate sono moderate nella classe R3, modeste nella classe R2 per un periodo che va dal ventitreesimo giorno fino al settantanovesimo giorno e negli intervalli residui si mostrano velocità basse. Infine nella classe R1, si notano velocità modeste dal ventitreesimo giorno fino al novantaquattresimo giorno, altrimenti si presentano velocità basse.

Nelle barre dei composti in cenere volante e cemento alluminoso si hanno velocità intermedie per tutti i composti delle tre classi di resistenza.

Durante il periodo di carbonatazione accelerata si nota che le barre sono più soggette alla corrosione, sia per tutte le classi delle malte in metacaolino che per quelle di classe R1 cementizia e quella geopolimerica in cenere volante-cemento alluminoso.

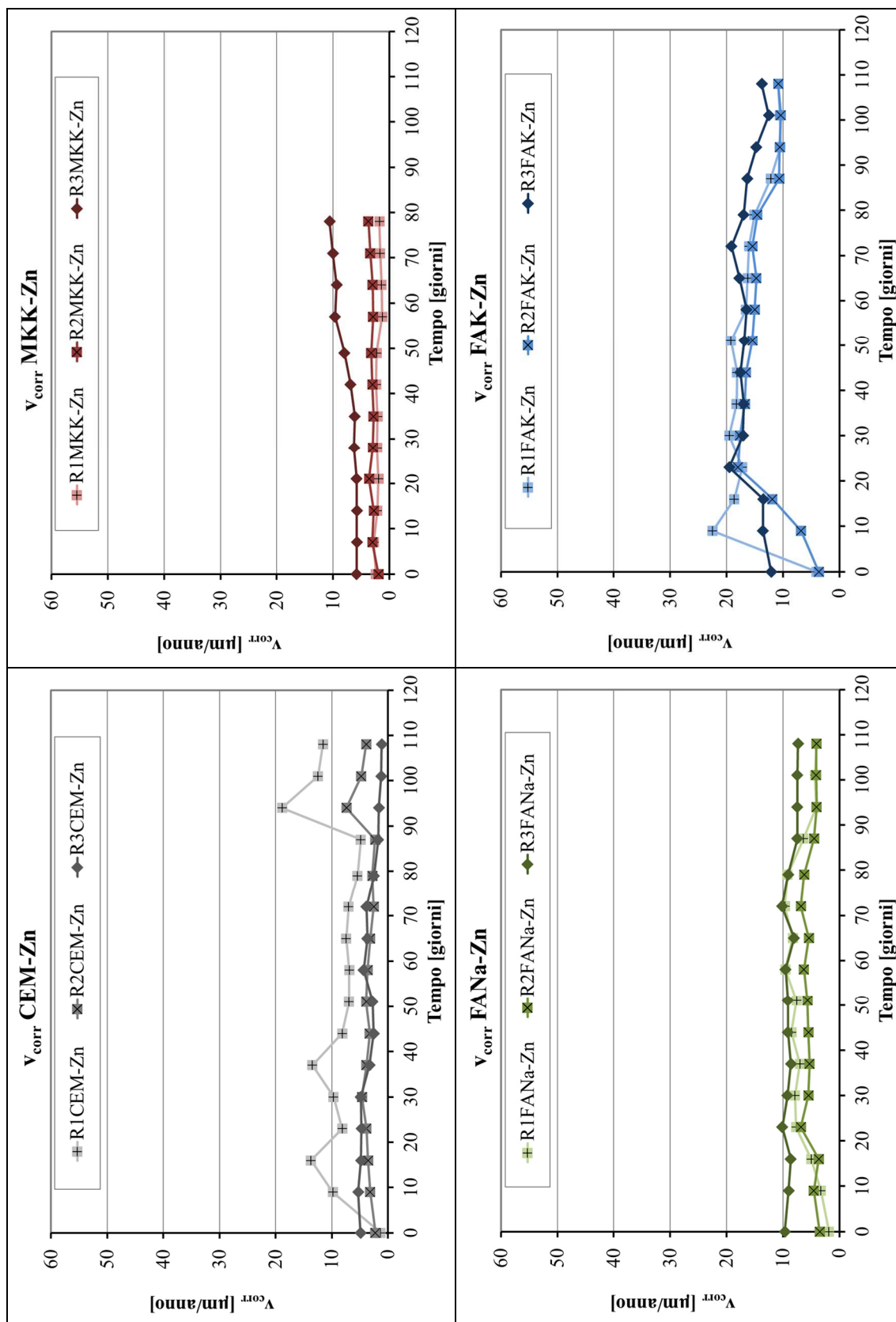


Figura 114 v_{corr} delle barre in acciaio zincato durante il periodo di carbonatazione accelerata

Nei diagrammi delle velocità di corrosione nelle armature in acciaio nero, durante i cicli di asciutto-bagnato, si riscontrano valori più bassi durante la fase asciutta e più alti durante la fase bagnata (Figura 115).

Per quanto riguarda le barre immerse nelle malte cementizie l'andamento delle velocità rispecchia quello dei potenziali descritti nel paragrafo precedente. Infatti nelle barre dei provini di classe R1 si hanno velocità intermedie durante le fasi asciutte e velocità alte durante le fasi bagnate, ad eccezione dei primi otto giorni a causa della presenza di velocità elevatissime. Nei provini di classe R2 per i primi otto giorni si mostrano delle velocità di corrosione alte che passano a intermedie durante le fasi bagnate. Anche nelle fasi di asciutto si presentano velocità intermedie con una differenza di circa 40 $\mu\text{m}/\text{anno}$ tra le due fasi. Nelle armature dei provini di classe R3 si notano velocità moderate per le fasi asciutte e velocità intermedie nelle fasi bagnate.

Nelle barre in acciaio nero delle malte in metacaolino per le classi R1 e R3 si hanno velocità intermedie per entrambe le fasi, con una differenza minima; invece per le barre dei provini di classe R2 si hanno inizialmente velocità elevatissime per diventare velocità alte nelle fasi di bagnato e velocità intermedie nelle fasi di asciutto.

Per le armature in acciaio nero delle malte in cenere volante e cenere volante-cemento alluminoso si hanno velocità di corrosione intermedie per tutte le classi di resistenza e per tutte e due le fasi asciutto-bagnato con differenze minime.

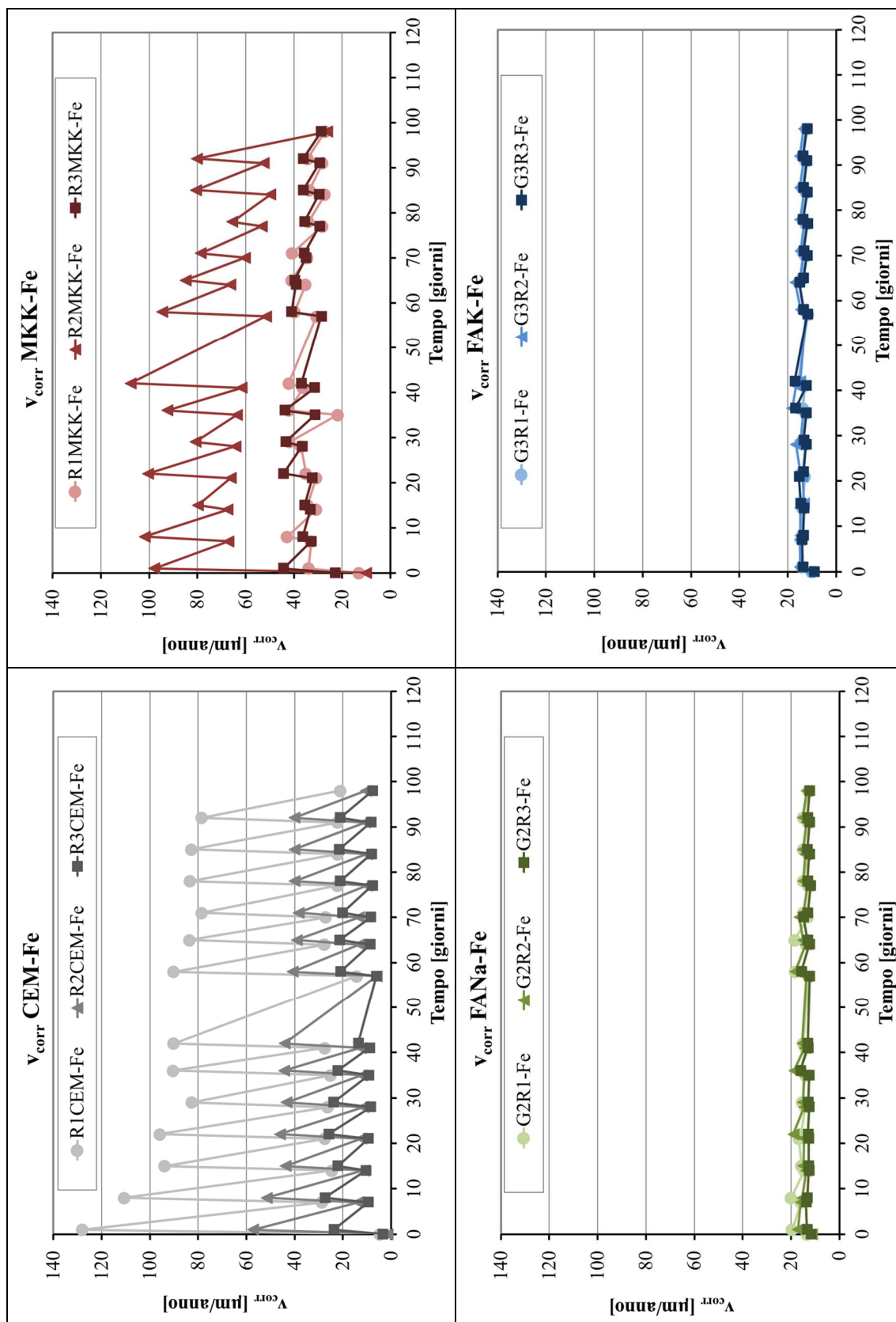


Figura 115 v_{corr} delle barre in acciaio nero durante i cicli di asciutto-bagnato

Le velocità di corrosione delle barre in acciaio zincato sono caratterizzate da velocità di corrosione più alte durante le fasi bagnate e velocità più basse durante le fasi asciutte (Figura 116).

Per le barre dei composti cementizi di classe R1 si hanno velocità alte per la fase bagnata e velocità intermedie in fase asciutta. Nel provino di classe R2 si mostrano velocità intermedie in fase bagnata e velocità modeste in fase asciutta, in ultimo nelle barre del provino di classe R3 si hanno velocità intermedie nelle fasi bagnate e velocità basse per le fasi asciutte.

Negli impasti geopolimerici in metacaolino si hanno per i primi otto giorni dall'inizio dei cicli, per le barre di acciaio zincato del provino di classe R1, delle velocità intermedie che passano a velocità modeste durante le fasi di bagnato e velocità basse durante le fasi asciutte. Nelle barre del provino di classe R2, si presentano andamenti delle velocità intermedie nelle fasi bagnate e velocità modeste per quelle asciutte, per finire per la classe R3 si hanno velocità intermedie nelle fasi di bagnato e velocità moderate nelle fasi di asciutto.

Nelle armature dei composti in cenere volante, nella classe R1 si hanno delle velocità moderate in fase bagnata e velocità basse in fase asciutta. Nelle classi R2 e R3 si hanno velocità intermedie per le fasi bagnate e velocità moderate per le fasi asciutte.

Infine nelle barre dei composti in cenere volante e cemento alluminoso, dei provini di classe R1 e R2 si notano velocità intermedie durante entrambe le fasi, seppur con differenze minime (circa 4 $\mu\text{m}/\text{anno}$ tra la fase bagnata e quella asciutta); nelle barre del provino di classe R3 si hanno all'inizio velocità alte nei primi quattro cicli, per passare a velocità intermedie in entrambe le fasi.

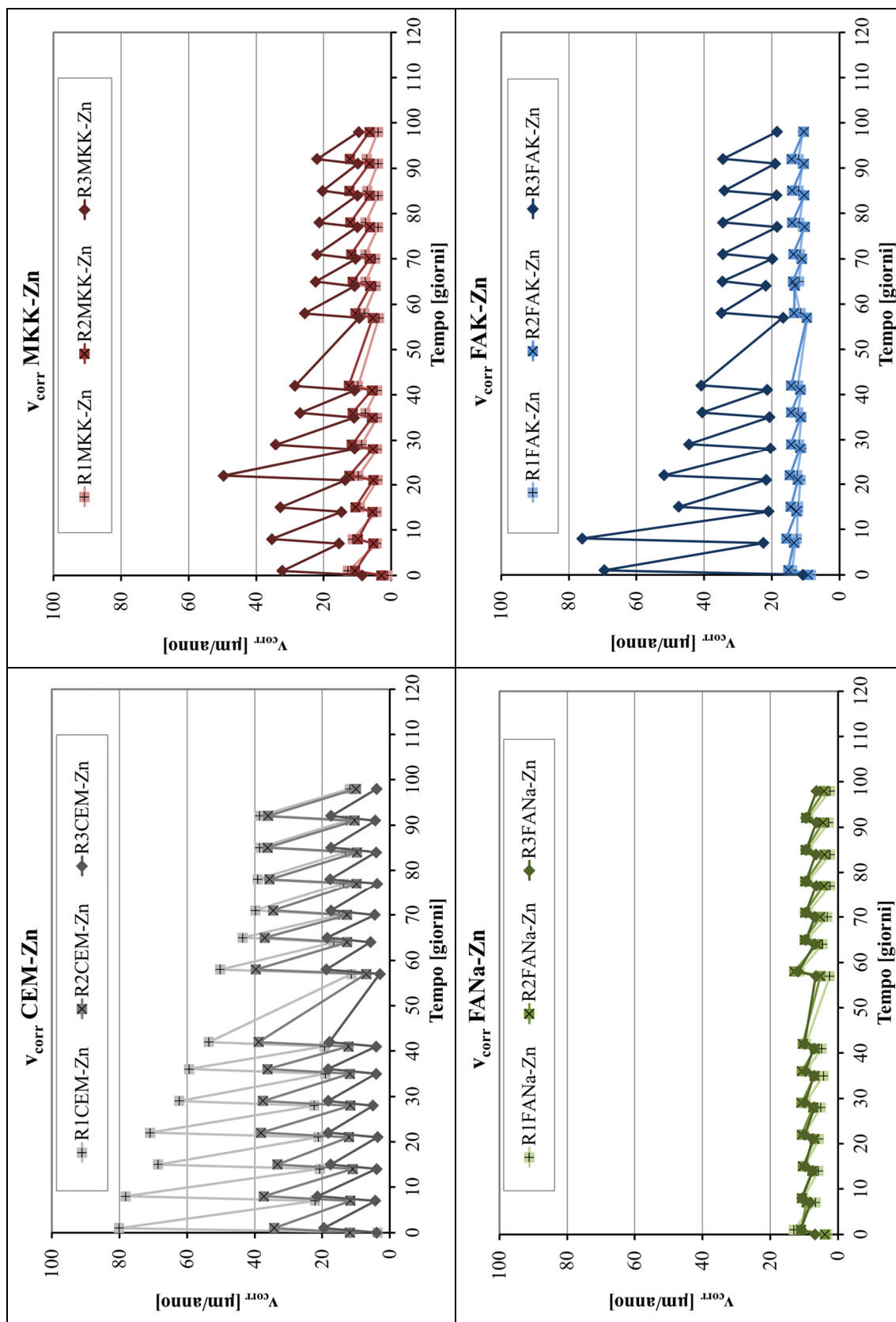


Figura 116 v_{corr} delle barre in acciaio zincato durante i cicli di asciutto-bagnato

9.10 Considerazioni finali

Dallo studio effettuato nella presente tesi sulla potenziale durabilità delle armature in acciaio nero e acciaio zincato, immerse nelle malte, possiamo dedurre le seguenti considerazioni finali:

- Profondità di carbonatazione; a parità di classe di resistenza delle malte si sono ottenute profondità di carbonatazione più alte nelle malte in metacaolino a causa delle loro porosità percentuali maggiori rispetto agli altri composti. Ad eccezione delle classi R3 di cemento e di cenere volante, in cui non siamo riusciti ad abbassare il pH oltre la profondità del copriferro dopo il periodo in camera di carbonatazione accelerata, perché sono caratterizzate da pori con diametri inferiori e da una minore permeabilità dei leganti attivati con soluzione di silicato di sodio e di idrossido di sodio che ritardano la carbonatazione, garantendo una durata più lunga del film passivo.
- Potenziale di corrosione; durante il periodo in camera di carbonatazione accelerata, le armature di acciaio nero raggiungono uno stato passivo immediato in tutte le malte, tranne nelle classi R1 e R2 delle malte cementizie che sono caratterizzate da periodi di fasi attive del potenziale di corrosione, dovuta dalla progressiva penetrazione dell'anidride carbonica fino all'armatura che ha comportato ad una diminuzione in loco del pH (carbonatazione). Nelle armature di acciaio zincato, si hanno per tutte le classi di resistenza degli impasti degli stati passivi.

Durante i cicli asciutto-bagnato, nelle armature in acciaio nero si hanno stati passivi esclusivamente per le malte geopolimeriche, mentre per quelle cementizie gli stati risultano attivi. Nelle armature zincate gli stati passivi risultano per ogni classe di resistenza di tutte le malte.

- Velocità di corrosione; durante l'esposizione a carbonatazione accelerata, le armature di acciaio zincato, a parità di condizione ambientale e classe di resistenza, reagiscono diversamente rispetto a quelle di acciaio nero, con delle differenze di velocità di corrosione che sono di circa la metà per le malte cementizie. Nelle malte geopolimeriche questa differenza è più marcata in quelle in metacaolino e si nota più piccola per quelle in cenere volante. In ultimo, si hanno velocità di corrosione di poco più alte per quelle zincate nelle malte in cenere volante-cemento alluminoso.

Durante i cicli asciutto-bagnato, a parità di condizioni, le velocità di corrosione delle barre in acciaio nero, risultano maggiori rispetto a quelle di acciaio zincato per tutte le classi di resistenza sia nelle malte cementizie che in quelle geopolimeriche, fatta eccezione per la classe R3 di cenere volante-cemento alluminoso in cui i valori risultano più alti.

Conclusioni

In questo lavoro, sono state prodotte malte geopolimeriche con prestazioni meccaniche paragonabili alle malte in cemento Portland a pari classe di resistenza.

Queste malte sono state ottenute manipolando il processo di geopolimerizzazione, variando il contenuto di idrossidi solidi presenti nella miscela, o per meglio dire, agendo sull'alcalinità della soluzione attivatrice.

Procedendo con questo mix design, sono state realizzate diversi tipi di malte, ma solo alcune hanno presentato interessanti caratteristiche:

- malte geopolimeriche in cenere volante e in cenere volante-cemento alluminoso: elevate lavorabilità, ridotta porosità e buona conduttività termica;
- malte geopolimeriche in metacaolino: buone resistenze meccaniche a compressione, si notano valori della tensione di aderenza paragonabili alle malte cementizie;
- malte geopolimeriche in cenere volante: buona resistenza al processo di carbonatazione.

Uno degli obiettivi posti in questo lavoro è stato quello di ricercare e capire la durabilità delle armature in acciaio nero e quelle in acciaio zincato nelle malte sia cementizie che geopolimeriche. Questo studio ha portato ad analizzare prima tutti i tipi di malte, le loro caratteristiche e il loro impiego nell'edilizia, per poi passare allo studio della corrosione per carbonatazione.

Alla luce dei valori ricavati e dall'analisi dei materiali si può dedurre che le armature in acciaio zincato assumono un comportamento migliore verso la corrosione per carbonatazione, rispetto a quelle di acciaio nero. Si può dire questo sulla base dei risultati ottenuti dallo studio dei potenziali e dalle velocità di corrosione che hanno dimostrato come l'acciaio zincato resiste di

più nel tempo al processo di corrosione per carbonatazione. Quindi le armature di acciaio zincato resistono di più in ambienti asciutti, bagnati raramente asciutti, moderatamente umidi, ciclicamente asciutti e bagnati, pertanto è consigliabile il loro utilizzo in diversi campi dell'edilizia.

Le malte geopolimeriche in cenere volante rappresentano le migliori malte in tema di resistenza alla corrosione delle armature, quando si parla delle barre in acciaio nero, mentre per le barre in acciaio zincato, le migliori malte di resistenza sono quelle in cenere volante e la malta cementizia della classe R3.

Bibliografia

- C. Leonelli, M. Romagnoli, “*Geopolimeri: Polimeri inorganici attivati chimicamente*”, I.Cer.S, Bologna, 2011.
- M. Collepari, “*Il nuovo calcestruzzo*”, Tintoretto, Villorba, 2003.
- M. Collepari, J. J. Ogourrah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, “*Il calcestruzzo vulnerabile: prevenzione, diagnosi del degrado e restauro*”, Ed. Enco s.r.l., Ponzano, Veneto, 2005.
- P. Pedferri e L. Bertolini, “*La durabilita del calcestruzzo armato*”, McGraw-Hill Education, Milano, 2000.
- L. Coppola, “*Concretum*”, McGraw-Hill, Milano, 2007.
- L. Bertolini, “*Materiali da costruzione, Volume II: degrado, prevenzione, diagnosi, restauro*”, ed. Città Studi, Torino, 2012.
- “*Il Degrado del calcestruzzo*”, Head Office Mapei Spa, Milano, 2010.
- Joseph Davidovits, Margie Morris, “*The pyramids: an enigma solved*”, Hippocrene Books, New York, 1988.
- M. C. Bignozzi, S. Manzi, M. E. Natali, W. D. A. Rickard, A. van Riessen, “*Room temperature alkali activation of fly ash: the effect of Na_2O/SiO_2* ”, Construction and Building Materials 69, 2014, pp. 262-270.
- R. Modarelli, A. Largo, L. Pascali, “*I geopolimeri: Ritorno al passato o salto nel futuro. Leganti ecosostenibili alternativi al cemento*”, Ingenio, 2014, pp. 1-14.
- J. Davidovits, “*Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials*”, Thermal analysis 37, 1991, pp. 1633-1656.
- Raphaëlle Pouhet, Martin Cyr, “*Carbonation in the pore solution of metakaolin-based geopolymer*”, Cement and Concrete Research 88, 2016, pp. 227-235

- Francesca Tittarelli, Alessandra Mobili, Chiara Giosué, Alberto Belli, Tiziano Bellezze, “*Corrosion behavior of bare and galvanized steel in geopolymer and Ordinary Portland Cement based mortars with the same strength class exposed to chlorides*”, Corrosion Science 134, 2018, pp. 64-77.
- Alessandra Mobili, Alberto Belli, Chiara Giosué, Tiziano Bellezze, Francesca Tittarelli, “*Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class*”, Cement and Concrete Research 88, 2016, pp. 198-210.
- K. Pasupathy, M. Berndt, A. Castel, J. Sanjayan, “*Carbonation of a blended slag-fly ash geopolymer concrete in field conditions after 8 years*”, Construction and Building Materials 125, 2016, pp. 661-669.
- D. Gimeno, J. Davidovits, C. Marini, P. Rocher, S. Tocco, S. Cara, N. Diaz, C. Segura, G. Sistu, “*Development of silicate-based cement from glassy alkaline volcanic rocks: interpretation of preliminary data related to chemical- mineralogical composition of geologic raw materials*” Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 2003, pp. 69-78.
- J. Davidovits, “*Geopolymers: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement*”, J. Materials Education 16, 1994, pp. 91-137.
- J. Davidovits, “*30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs*”, Geopolymer Conference, Melbourne, Australia, 2002.
- J. W. Phair, J. S. J. Van Deventer, “*Effect of silicate activator ph on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers*”, Minerals Engineering 14, 2001, pp. 289-304.
- C. Monticelli, “*Durability: corrosion resistance of rebars in fly-ash geopolymers*”, International Workshop, Bologna, 2013.

- J. Davidovits, “*Geopolymer cement*”, Geopolymer Science and Technics, Geopolymer Institute Library, 2013.
- M. S. H. Khan, A. Castel, A. Noushini, “*Carbonation of a low-calcium fly ash geopolymer concrete*”, Magazine of Concrete Research 69, 2017, pp. 24-34.
- Mónica A. Villaquirán-Caicedo, Ruby Mejía de Gutiérrez, Soumitra Sulekar, Calvin Davis, Juan C. Nino, “*Thermal properties of novel binary geopolymers based on metakaolin and alternative silica sources*”, Applied Clay Science 118, 2015, pp. 276-282.
- Palomo, M. W. Grutzeck, M. T. Blanco, “*Alkali-activated fly ashes: a cement for the future*”, Cement and Concrete Research 29, 1999, pp. 1323-1329.
- C. Kuenzel, L. Vandeperre, S. Donatello, A. R. Boccaccini, C. R. Cheeseman, “*Ambient temperature drying shrinkage and cracking in metakaolin-based geopolymers*”, Journal of the American Ceramic Society, 2012, pp. 3270-3277.
- D. Hardjito, M. Z. Tsen, “*Strength and thermal stability of fly ash based geopolymer mortar*”, 3rd International Conference-ACF/VCA, Curtin University of Technology, Malaysia, 2008.
- M. Izquierdo, X. Querol, J. Davidovits, D. Antenucci, H. Nugteren, C. Fernández-Pereira, “*Coal fly ash-based geopolymers: microstructure and metal leaching*”, Journal of Hazardous Materials 166, 2009, pp. 561-566.
- P. Duxson, A. Fernandez-Jimenez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, J. S. J. van Deventer, “*Geopolymer technology: the current state of the art*”, Journal of Materials Science 42, 2006, pp. 2917-2933.

- R. R. Lloyd, “*Accelerated ageing of geopolymers*”, Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications, J.S.J. Woodhead Publishing, Abingdon UK, 2009, pp. 139-166.
- M. Rashad, “*Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview*”. Construction and Building Materials 41, 2013, pp. 303-318.
- J. Davidovits, “*Geopolymer Cement to Minimize Carbon-dioxide Greenhouse- warming, in Cement-Based Materials: Present, Future and Environmental Aspects*”, Ceramic Transactions 37, 1993, pp. 165-182.
- R. Arellano-Aguilar, O. Burciaga-Díaz, A. Gorokhovskiy, J. I. Escalante-García, “*Geopolymer mortars based on a low grade metakaolin: Effects of the chemical composition, temperature and aggregate: binder ratio*”. Construction and Building Materials 50, 2014, pp. 642-648.
- F. Pelisser, E.L. Guerrino, M. Menger, M.D. Michel, J.A. Labrincha, “*Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers*”, Construction and Building Materials 49, 2013, pp. 547-553.
- P. Duxson, S.W. Mallicoat, G.C. Lukey, W.M. Kriven, J.S.J. van Deventer, “*The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers*”, Physicochemical and Engineering Aspects 292, 2007, pp. 8-20.
- C. Kuenzel, L. Li, L. Vandeperre, A.R. Boccaccini, C.R. Cheeseman, “*Influence of sand on the mechanical properties of metakaolin geopolymers*”. Construction and Building Materials 66, 2014, pp. 442-446.
- C. Kuenzel, T.P. Neville, S. Donatello, L. Vandeperre, A.R. Boccaccini, C.R. Cheeseman, “*Influence of metakaolin characteristics on the mechanical properties of geopolymers*”, Applied Clay Science 83-84, 2013, pp. 308-314.

- A. Autef, E. Joussein, G. Gasgnier, S. Pronier, I. Sobrados, J. Sanz, S. Rossignol, “*Role of metakaolin dehydroxylation in geopolymer synthesis*”. Powder Technology 250, 2013, pp. 33-39.
- P. Duxson, G.C. Luckey, J.S.J. van Deventer, “*Thermal conductivity of metakaolin geopolymers used as a first approximation for determining gel interconnectivity*”, Industrial & Engineering Chemistry Research 45, 2006, pp. 7781-7788.
- D. Sabitha, J. K. Dattatreya, N. Sakthivel, M. Bhuvaneshwari, S. A. JafferSathik, “*Reactivity, workability and strength of potassium versus sodium-activated high volume fly ash-based geopolymers*”, Current Science 11, 2012, pp. 1320-1327.
- D. Hardjito, M.Z. Tsen, “*Strength and thermal stability of fly ash based geopolymer mortar*”, 3rd International Conference-ACF/VCA, Curtin University of Technology, Malaysia, 2008.
- M. Komljenovic', Z. Bascarevic', V. Bradic', “*Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash Geopolymers*”, Journal of Hazardous Materials 181, 2010, pp. 35-42.
- G. S. Ryu, Y. B. Lee, K. T. Koh, Y. S. Chung, “*The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators*”, Construction and Building Materials 47, 2013, pp. 409-418.
- M. S. Badar, K. Kupwade-Patil, S. A. Bernal, J. L. Provis, E. N. Allouche, “*Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes*”, Construction and Building Materials 61, 2014, pp. 79-89.
- H. Xu, J. S. J. Van Deventer, “*Geopolymerisation of multiple minerals*”. Minerals Engineering 15, 2002, pp. 1131-1139.

- G. Kakali, T. Perraki, S. Tsivilis, E. Badogiannis, "*Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity*". Applied Clay Science 20, Fascicoli 1-2, 2001, pp. 73-80.
- Van Riessen, W. Rickard, J. Sanjayan, "*Thermal properties of geopolymers*", Structures, Processing, Properties and Industrial Applications, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2009, pp. 315-342.
- Siti Fatimah Azzahran Abdullah, Liew Yun-Ming, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, Heah Cheng-Yong, Khairunnisa Zulkifly, "*Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Lightweight Foamed Geopolymer Concretes*", Materials Science and Engineering 551, 2019.
- H. Xu, J. S. J. Van Deventer, "*The geopolymerisation of alumino-silicate minerals*", International Journal of Mineral Processing 59, 2000, pp. 247-266.
- J. L. Bell, P. E. Driemeyer, W. M. Kriven, "*Formation of ceramics from metakaolin-based geopolymers. Part II: K-based geopolymer*", Journal of the American Ceramic Society 92, 2009, pp. 607-615.
- X. Yao, Z. Zhang, H. Zhu, Y. Chen, "*Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry*", Thermochimica Acta 493, 2009, pp. 49-54.
- H. Wang, Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, "*Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction*", Construction and Building Materials 56, 2014, pp. 113–127.
- Y. P. Asmara, J. P. Siregar, C. Tezara, Wan Nurlisa, Jamiluddin Jaafar, "*Long Term Corrosion Experiment of Steel Rebar in Fly Ash-Based Geopolymer Concrete in NaCl Solution*", International Journal of Corrosion, 2016, pp. 1-5.

Norme di riferimento

- **UNI EN 197-1:2011** Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni.
- **UNI EN 459-1:2015** Definizioni, specifiche e criteri di conformità delle calce da costruzione.
- **UNI EN 1008:2003** Acqua d'impasto per il calcestruzzo. Specifiche di campionamento, di prova e di valutazione dell'idoneità dell'acqua, incluse le acque di recupero dei processi dell'industria del calcestruzzo, come acqua d'impasto del calcestruzzo.
- **UNI EN 1504-3:2006** Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione strutturale e non strutturale delle opere in calcestruzzo.
- **UNI EN 1015-1:2007** Metodi di prova per malte per opere murarie. Determinazione della distribuzione granulometrica (mediante stacciatura).
- **UNI EN 1015-3:2007** Metodi di prova per malte per opere murarie. Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse).
- **UNI EN 1015-4:2000** Metodi di prova per malte per opere murarie. Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante penetrazione della sonda).
- **UNI EN 1015-6:2007** Metodi di prova per malte per opere murarie. Determinazione della massa volumica apparente della malta fresca.
- **UNI EN 1015-9:2007** Metodi di prova per malte per opere murarie. Determinazione del tempo di lavorabilità e del tempo di correzione della malta fresca.
- **UNI EN 1015-11:2007** Metodi di prova per malte per opere murarie. Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita.

- **UNI EN 1015-12:2007** Metodi di prova per malte per opere murarie. Determinazione dell'aderenza al supporto di malte da intonaco esterno ed interno.
- **UNI EN 1015-19:2008** Metodi di prova per malte per opere murarie. Determinazione della permeabilità al vapore d'acqua delle malte da intonaco indurite.
- **UNI EN 1015-21:2004** Metodi di prova per malte per opere murarie. Determinazione della compatibilità delle malte monostrato per esterni con il supporto.
- **UNI EN 1542:2000** Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo. Metodi di prova e misurazione dell'aderenza per trazione diretta.
- **UNI EN 12504-4:2005** Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.
- **UNI EN 14630:2007** Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo. Metodi di prova e determinazione della profondità di carbonatazione di un calcestruzzo indurito con il metodo della fenolftaleina.