



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA EDILE

Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed
Urbanistica

STUDIO DELL'EFFICACIA DI UN PRODOTTO INNOVATIVO
MULTIFUNZIONE PER IL MIGLIORAMENTO DELLA
DURABILITÀ DEL CALCESTRUZZO ARMATO

Study of the efficacy of an innovative multifunctional product for
improving the durability of reinforced concrete

Relatrice:

Prof. Valeria Corinaldesi

Correlatore:

Prof. Tiziano Bellezze

Correlatore:

Ing. Jacopo Donnini

Tesista:

Elisa Blasi

Sommario

Indice delle figure	4
Indice delle tabelle	6
Introduzione	I
Cause di degrado del calcestruzzo armato	V
A. Corrosione delle armature metalliche.....	V
B. Reazione alcali-aggregato	VII
1. Prodotto	1
1.1 Composizione del prodotto	2
1.2 Caratteristiche specifiche	4
1.3 Applicazione	4
2. Attività sperimentale	5
2.1 Studio degli effetti del prodotto innovativo come inibitore di corrosione	5
2.1.1 Materiali	5
2.1.2 Mix Design.....	6
2.1.3 Preparazione dei provini.....	7
2.1.4 Acquisizione dei dati.....	9
2.1.5 Prelievo polveri	13
2.1.6 Risultati	21
2.2 Mitigazione/annullamento della reazione alcali-aggregato.....	22
2.2.1 Mix design.....	22
2.2.2 Utilizzo del vetro.....	24
2.2.3 Preparazione dei provini.....	25
2.2.4 Influenza del vetro nelle miscele.....	26
2.2.5 Efficacia del prodotto	35
2.2.6 Risultati	41
Conclusioni	42
Bibliografia	43
Ringraziamenti	44

Indice delle figure

- Fig. I - Rappresentazione ternaria del degrado di strutture in c.a.
- Fig. II - Reazione di idratazione delle particelle di cemento
- Fig. III - Processo di corrosione nei metalli in presenza di umidità
- Fig. IV - Map Cracking generata dalla reazione alcali-silice
- Fig. V – Fenomeno di pop-out di conetti di calcestruzzo a ridosso di aggregati reattivi
- Fig. 1.1 – Compound innovativo multifunzione usato nella sperimentazione
- Fig. 1.2 – Stretching dei legami atomici
- Fig. 1.3 – Bending dei legami atomici
- Fig. 1.4 – Spettro di assorbimento infrarosso del compound multifunzione
- Fig. 2.1 – Modello Feldman-Sereda di un poro capillare
- Fig. 2.2 – Vista schematica dei provini cilindrici usati per le misurazioni elettrochimiche
- Fig. 2.3 – Barre di armatura e provette fissate al coperchio forato utilizzato durante il getto della miscela
- Fig. 2.4 – Provini cilindrici armati immersi nella soluzione salina 3,5% durante la fase umida
- Fig. 2.5 – Elettrodo al calomelano saturo
- Fig. 2.6 – Voltmetro utilizzato per rilevare il potenziale delle barre di armatura nei cicli
- Fig. 2.7 – Diagramma dei potenziali di corrosione dei cinque provini cilindrici sperimentali
- Fig. 2.8 – Misura ed acquisizione dei dati del potenziale di corrosione durante la fase umida
- Fig. 2.9 - Misura ed acquisizione dei dati del potenziale di corrosione durante la fase asciutta
- Fig. 2.10 – Trapano a colonna per il prelievo delle polveri per l'analisi del quantitativo di cloruri
- Fig. 2.11 – Provino cubico sottoposto al primo prelievo di polveri
- Fig. 2.12 – Macchinario usato per la miscelazione
- Fig. 2.13 – Grafico relativo alla concentrazione dei cloruri alle diverse profondità di prelievo al terzo ciclo di bagno-asciuga

Fig. 2.14 – Grafico relativo alla concentrazione dei cloruri alle diverse profondità di prelievo al sesto ciclo di bagno-asciuga

Fig. 2.15 – Grafico relativo alla concentrazione dei cloruri alle diverse profondità di prelievo al dodicesimo ciclo di bagno-asciuga

Fig. 2.16 – Concentrazione dei cloruri del provino di riferimento ai vari prelievi

Fig. 2.17 – Concentrazione dei cloruri del provino spennellato con il compound (Covered) ai vari prelievi

Fig. 2.18 – Concentrazione dei cloruri del provino con l'1% del compound in massa ai vari prelievi

Fig. 2.19 – Concentrazione dei cloruri del provino con l'3% del compound in massa ai vari prelievi

Fig. 2.20 – Concentrazione dei cloruri del provino con l'5% del compound in massa ai vari prelievi

Fig. 2.21 - Vetro nelle due granulometrie di utilizzo

Fig. 2.22 – Barattoli di riciclo prima della frantumazione

Fig. 2.23 – Frazioni di vetro ricavate dalla setacciatura manuale

Fig. 2.24 – Perni inglobati nella malta

Fig. 2.25 – Cassero preparato per il getto

Fig. 2.26 – Tavola vibrante usata per la compattazione degli impasti

Fig. 2.27 – Forno utilizzato per la sperimentazione

Fig. 2.28 – Provini immersi nella soluzione di NaOH

Fig. 2.29 – Contenitore chiuso posizionato in forno

Fig. 2.30 – Calibratura del micrometro

Fig. 2.31 – Lettura comparativa dei provini

Fig. 2.32 – Grafico inerente alle letture dei provini di riferimento

Fig. 2.33 – Grafico inerente alle letture dei provini con vetro grosso

Fig. 2.34 – Grafico inerente alle letture dei provini con vetro fine

Fig. 2.35 – Grafico dell'andamento dei provini messi a confronto durante la prova

Fig. 2.36 – Provini a 49 giorni dell'analisi della reazione alcali-aggregato

Fig. 2.37 - Provini della miscela “Covered” spennellati con il compound

Fig. 2.38 - Grafico inerente alle letture dei provini con vetro grossolano e spennellati con il compound

Fig. 2.39 - Grafico inerente alle letture dei provini con vetro grossolano e l'1% di compound in massa

Fig. 2.40 - Grafico inerente alle letture dei provini con vetro grossolano e l'3% di compound in massa

Fig. 2.41 - Grafico inerente alle letture dei provini con vetro grossolano e l'5% di compound in massa

Fig. 2.42 – Grafico dell'andamento dei provini messi a confronto durante la prova

Indice delle tabelle

Tab. 2.1 – Mix design delle cinque miscele

Tab. 2.2 – Frazione in peso di cemento

Tab. 2.3 – Concentrazioni di cloruri al terzo ciclo di bagno-asciuga

Tab. 2.4 – Concentrazioni di cloruri al sesto ciclo di bagno-asciuga

Tab. 2.5 – Concentrazioni di cloruri al dodicesimo ciclo di bagno-asciuga

Tab. 2.6 – Mix design delle tre miscele per lo studio della reazione alcali-aggregato

Tab. 2.7 – Mix design delle cinque miscele per lo studio della mitigazione della reazione alcali-aggregato da parte del compound innovativo multifunzione

Tab. 2.8 – Letture con il micrometro della miscela di riferimento durante la prova normata

Tab. 2.9 – Letture con il micrometro della miscela con vero grosso durante la prova normata

Tab. 2.10 – Letture con il micrometro della miscela con vetro fine durante la prova normata

Tab. 2.11 - Letture con il micrometro della miscela con vero grosso e il provino spennellato di compound innovativo durante la prova normata

Tab. 2.12 - Letture con il micrometro della miscela con vero grosso e l'1% di compound innovativo in massa durante la prova normata

Tab. 2.13 - Letture con il micrometro della miscela con vero grosso e l'3% di compound innovativo in massa durante la prova normata

Tab. 2.14 - Letture con il micrometro della miscela con vero grosso e l'5% di compound innovativo in massa durante la prova normata.

Introduzione

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di indagare in merito alle problematiche inerenti al degrado delle costruzioni in calcestruzzo armato, appartenenti al patrimonio edilizio moderno, e di valutare le caratteristiche e le capacità di un compound innovativo multifunzione, per prevenire alcune delle cause di deterioramento delle strutture nel medesimo materiale costruttivo.

Per patrimonio edilizio moderno si intende quella parte del costruito risalente alla seconda metà del Novecento, contraddistinto da estrema ricerca e sperimentazione dei materiali, di tecniche e di forme per seguire le esigenze dettate dai cambiamenti tecnologici, sociali e culturali del periodo.

L'utilizzo di nuovi materiali senza un'adeguata esperienza nella posa in opera e con una ridotta conoscenza delle caratteristiche riguardo al degrado degli stessi, hanno portato il patrimonio risalente a quel tempo ad una obsolescenza costruttiva.

Infatti, fino alla fine degli anni '70 si pensava che le strutture in calcestruzzo armato fossero durevoli anche se costruite senza particolare cura ed esposte ad ambienti aggressivi.

All'aumentare dei casi di degrado negli ultimi tempi e alla necessità di anticipare interventi di manutenzione e ripristino straordinari, è nata una nuova sensibilità riguardo il deterioramento delle opere in calcestruzzo armato e della sua prevenzione.

Infatti, soltanto negli anni '80, attraverso il **D.M. 26 marzo 1980** (D.M. 26 marzo 1980, 1980), si inizia ad originare il concetto di durabilità, senza però nessuna prescrizione che indicasse al progettista il miglior modo di creare una miscela durevole nel tempo.

In seguito all'entrata in vigore del **D.M. del gennaio 1996** (D.M. 9 gennaio 1996, 1996) è stato fornito un riferimento normativo, le **UNI 9858** (UNI 9858, 1991) poi sostituite dalle **UNI EN 206** (UNI EN 206, 2016) e **UNI 11104** (UNI 11104, 2016), che assegna dei criteri per valutare i rischi di degrado del calcestruzzo armato, attraverso la definizione delle classi di esposizione ambientale, e le misure preventive per evitarli attraverso vincoli compositivi nel calcestruzzo.

Si va a definire, dunque, il concetto di **durabilità** intesa come la **capacità della struttura di durare nel tempo**, proprietà essenziale affinché i livelli di sicurezza vengano mantenuti durante tutta la vita dell'opera.

Questo concetto viene trattato attualmente in maniera esaustiva **dal D.M. 17.01.2018 – Norme Tecniche per le costruzioni** (Decreto 17 gennaio 2018, 2018), aggiornamento del precedente **D.M. 14.01.2018**, al paragrafo 2.1 con la definizione *“durabilità: capacità della costruzione di mantenere, nell'arco della vita nominale di progetto, i livelli prestazionali per i quali è stata progettata, tenuto conto delle caratteristiche ambientali in cui si trova e del livello previsto di manutenzione”*.

Per la tutela della durabilità delle costruzioni in calcestruzzo armato si parte, dunque, dall'individuazione del livello di aggressività del luogo in cui la struttura sarà inserita, scelto tra le classi di esposizione ambientale fornite e descritte dalle normative tra cui:

1. X0 – Assenza di rischio o attacco di corrosione
2. XC – Corrosione indotta da carbonatazione
3. XD - Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare
4. XS - Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare
5. XF - Attacco dei cicli di gelo/disgelo con o senza disgelanti
6. XA - Attacco chimico

In seguito alla determinazione della classe di esposizione ambientale, anche attraverso il supporto di analisi specifiche del sito scelto, si vanno a definire le prescrizioni specifiche relative al conglomerato cementizio riguardo:

- il massimo rapporto acqua/cemento
- il minimo contenuto di cemento
- la minima classe di resistenza

Dalle prescrizioni si stabiliscono infine i rapporti tra gli ingredienti dell'impasto ed i vari quantitativi degli stessi per la realizzazione di un mix design di calcestruzzo durevole nel tempo.

La durabilità delle strutture viene influenzata dalla coesistenza di tre fattori: ambiente umido, porosità interconnessa e presenza di agenti aggressivi.



Fig. I – Rappresentazione ternaria del degrado di strutture in c.a.

Per poter ridurre e rallentare il processo di degrado delle strutture in calcestruzzo armato, però, è possibile agire soltanto su uno dei tre fattori, ovvero la porosità della matrice cementizia in quanto deve essere progettata in base all'umidità e all'aggressività dell'ambiente, in modo da limitare la penetrazione degli agenti esterni.

La pasta cementizia, formata durante la reazione di idratazione del cemento, è un mezzo poroso e contiene dei pori interconnessi di diverse dimensioni. La classificazione dei pori del calcestruzzo è complessa, ma possono essere suddivisi in base alle dimensioni in tre tipologie: pori interstiziali, pori capillari e vuoti.

I pori interstiziali, originati all'interno delle fibre di C-S-H, non vanno ad influire sulla durabilità del calcestruzzo essendo di dimensioni troppo ridotte per lasciar passare le specie aggressive.

I pori capillari sono dei vuoti che si formano durante l'idratazione del cemento e si originano dall'intreccio delle fibre di C-S-H. Hanno dimensioni comprese tra i 10 e 50 nm se il cemento risulta ben idratato grazie un rapporto acqua/cemento basso, ma possono arrivare alle dimensioni di 3-5 µm se il calcestruzzo è stato progettato con un rapporto acqua/cemento alto. Maggiore sarà il contenuto dell'acqua all'interno dell'impasto e maggiore sarà la distanza tra i grani di cemento, dunque, le fibre che si andranno a generare dalla reazione di idratazione del cemento saranno meno intrecciate tra loro lasciando vuoti capillari di dimensioni maggiori.

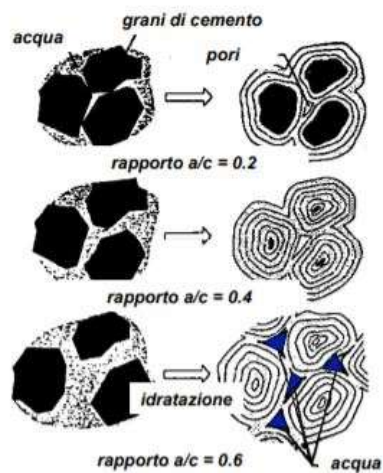


Fig. II – Reazione di idratazione delle particelle di cemento

I vuoti, invece, sono il risultato dell'aria intrappolata, durante la fase di miscelazione degli ingredienti, e non rimossa attraverso la vibrazione del calcestruzzo fresco.

Sia i pori capillari che l'aria intrappolata influenzano la durabilità del calcestruzzo e la protezione delle barre, poiché determinano la resistenza alla penetrazione degli agenti aggressivi.

Il fattore che influenza maggiormente la porosità capillare è il rapporto a/c, la stagionatura e la tipologia di cemento utilizzato nell'impasto.

Dunque, al fine di proteggere il calcestruzzo armato dalla perdita prestazionale nel tempo, è necessario ridurre il rapporto acqua/cemento con cui si progetta il mix design della miscela ed aggiungere degli additivi super fluidificanti per lavorare con impasti fluidi e auto-compattanti che non dipendono dalla posa in opera.

Cause di degrado del calcestruzzo armato

Le cause di degrado sono molteplici e di diversa natura, ma possono essere raggruppate in tre principali categorie:

- Cause chimiche
- Cause fisiche
- Cause strutturali/meccaniche.

In riferimento alle **cause** di natura **chimica** di degrado del calcestruzzo, si possono considerare tre fenomeni molto frequenti come la corrosione delle armature metalliche, la carbonatazione della matrice cementizia e la reazione alcali-silice che coinvolge gli aggregati.

Tra le **cause fisiche** si possono individuare gli effetti dell'inquinamento atmosferico, come il dilavamento delle superfici da parte delle piogge acide, e gli effetti dei cicli del gelo e disgelo, provocati dall'acqua presente nelle porosità della matrice cementizia che espandendosi per l'abbassamento della temperatura, provoca la fessurazione e il danneggiamento del copriferro, esponendo a rischio le barre di armatura.

Sul decadimento delle proprietà del calcestruzzo armato possono incidere anche le **cause di tipo strutturale e meccaniche** come gli urti, gli incendi e le sollecitazioni statiche e/o dinamiche in esercizio che provocano microfessurazioni alla matrice e danneggiamento delle armature.

In particolare, sono state trattate due cause di degrado del calcestruzzo armato corrispondenti alla categoria di natura chimica:

- A. Corrosione delle armature metalliche*
- B. Reazione alcali-aggregato*

A. Corrosione delle armature metalliche

Il degrado e la corrosione delle barre sono fenomeni molto connessi.

Gli ammaloramenti, indipendentemente dalle cause che li hanno prodotti, hanno spesso un legame con il processo di corrosione dell'armatura, come ad esempio la carbonatazione della matrice cementizia che, a causa della riduzione del pH, porta il rinforzo metallico a perdere il film protettivo passivante o i cicli di gelo e disgelo che tramite l'espansione del ghiaccio e la formazione di fessure, espone l'armatura all'ambiente esterno.

Il fenomeno della corrosione consiste in un progressivo consumo dell'acciaio a causa della formazione di un processo di natura elettrochimica per formazione di zone anodiche e catodiche in ambiente umido, che provoca una riduzione della sezione resistente delle barre stesse. Gli ossidi che si producono dal processo di corrosione dell'acciaio sono molto più voluminosi dell'acciaio che li genera, pertanto, questa "espansione" conduce alla fessurazione del copriferro, lasciando la barra senza protezione dagli agenti aggressivi. La fessurazione del copriferro continua fino alla sua completa rottura, lo *spalling*.

Avvenuto il processo di *spalling*, viene a determinarsi una riduzione della sezione resistente di calcestruzzo, che porta ad una riduzione prestazionale dell'elemento, provocando un cambiamento a livello globale sul comportamento della struttura.

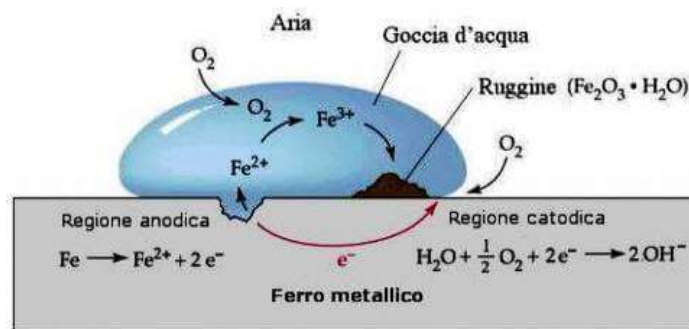


Fig. III – Processo di corrosione nei metalli in presenza di umidità

In presenza di una matrice cementizia porosa posta in ambiente aggressivo, quindi, gli agenti esterni penetrano in profondità e vanno ad innescare il processo di corrosione. Le sostanze aggressive più pericolose che inducono il processo sono sicuramente la CO₂ ed i cloruri Cl⁻.

In particolare, si va a trattare l'influenza dei cloruri sulle strutture in calcestruzzo armato, in quanto generano un processo di corrosione rapida e localizzata, a differenza del fenomeno diffuso indotto dalla CO₂. La reazione provocata dai cloruri, chiamata *pitting*, consiste nella rottura locale del film protettivo della barra d'armatura inglobata nel calcestruzzo alcalino. L'area non più protetta dal film passivante si comporta come un anodo, anche detta zona attiva, e la restante parte della barra ancora passiva, con l'effetto dell'umidità e dell'ossigeno si comporta da catodo. Si genera, quindi, un flusso di elettroni dalla zona anodica a quella catodica circostante andando a richiamare altri cloruri nell'area di carica positiva. I cloruri essendo ioni di carica negativa tendono ad abbassare l'alcalinità della pasta cementizia andando a indebolire il film passivante della barra di rinforzo. La corrosione inizia quando si supera, in maniera distribuita sulla superficie dell'armatura, un certo contenuto critico di cloruri.

La concentrazione dei cloruri necessaria all'innesco del processo può variare in base alla tipologia di sito: se si considerano strutture immerse in acqua è necessario un maggiore quantitativo di cloruri per far iniziare il processo di corrosione a causa della difficoltà di ingresso dell'ossigeno che va ad alimentare la reazione, al contrario, per le strutture esposte all'aria sono sufficienti bassi livelli di cloruri per innescare il fenomeno.

B. Reazione alcali-aggregato

La reazione alcali-silice ASR è un fenomeno complesso che si innesca in presenza di aggregati potenzialmente reattivi costituiti da una parte di silice amorfa o scarsamente cristallina.

La reazione alcali-aggregato richiede la presenza dello ione ossidrile, responsabile della distruzione dei legami atomici silicei, degli alcali e dell'acqua.

L'inerte siliceo, a contatto con gli alcali provenienti dall'interno dal cemento dell'impasto e/o dall'esterno, come ad esempio dal cemento presente nello spolvero o dai sali disgelanti, reagisce dando luogo a un gel di silicati alcalini che lentamente, a contatto con l'acqua, si va ad espandere provocando trazioni interne localizzate e fessurazioni nella matrice cementizia ormai indurita.

Si possono verificare due tipologie di discontinuità della superficie di calcestruzzo: la prima si verifica in elementi poco soggetti a trazione come le fondazioni di una struttura e consiste nella fessurazione a "*map cracking*" con crepe distribuite casualmente da cui può fuoriuscire il gel biancastro; la seconda consiste nel fenomeno di *pop-out* ovvero nell'espulsione di piccoli conetti di calcestruzzo.

Lo sviluppo della reazione alcali-aggregato può essere molto lento e gli effetti possono manifestarsi anche dopo lunghi periodi di tempo.

La riparazione del calcestruzzo che ha subito il fenomeno ASR è complicata ed alcune tecniche di ripristino sono ancora in fase di sviluppo. È possibile evitare la ricomparsa degli effetti della reazione ASR utilizzando un idrofobizzante per evitare la permeazione di acqua e/o utilizzare nell'area colpita un nuovo impasto a base di cementi pozzolanici.

L'entità della reazione dipende dalla reattività dell'aggregato, quindi, dalla quantità di silice contenuta al suo interno e dal quantitativo di alcali provenienti dall'interno e/o dall'esterno dell'impasto di calcestruzzo.



Fig. IV - Map Cracking generata dalla reazione alcali-silice



Fig. V – Fenomeno di pop-out di conetti di calcestruzzo a ridosso di aggregati reattivi

È stata valutata l'efficacia di un prodotto innovativo atto a mitigare le attività di invecchiamento delle strutture in calcestruzzo armato.

1. Prodotto

Il prodotto preso in esame è un formulato liquido sperimentale ad effetto combinato e pronto all'uso. Il compound innovativo multifunzione risulta di colore bianco latte con bassa viscosità ed è basato su una tecnologia che combina meccanismi di protezione organica e inorganica per ottenere la massima efficacia e protezione anche in presenza di ambienti molto aggressivi e soggetti alla corrosione.



Fig.1.1 – Compound innovativo multifunzione usato nella sperimentazione

1.1 Composizione del prodotto

Il compound liquido multifunzione è stato caratterizzato attraverso la spettroscopia infrarossa FTIR che consiste in un metodo di analisi non distruttiva per l'identificazione dei materiali tramite lo studio delle vibrazioni dei legami chimici tra le molecole. Durante la spettroscopia IR, le molecole vengono irradiate a diversa frequenza. L'energia che viene ceduta dalla radiazione impattante amplifica le naturali oscillazioni delle distanze interatomiche e degli angoli di legame all'interno delle molecole. Sono due i modi fondamentali con cui la molecola può vibrare:

- Stiramento o *stretching*
- Piegamento o *bending*

Lo *stretching* consiste in un movimento ritmico lungo l'asse di legame con conseguente aumento e diminuzione della distanza interatomica.

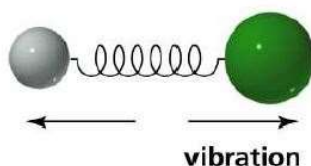


Fig. 1.2 – *Stretching dei legami atomici*

Il *bending*, invece, è dovuto ad una variazione dell'angolo di legame nel piano, *scissoring* e *rocking*, o fuori dal piano, *wagging* e *twisting*.

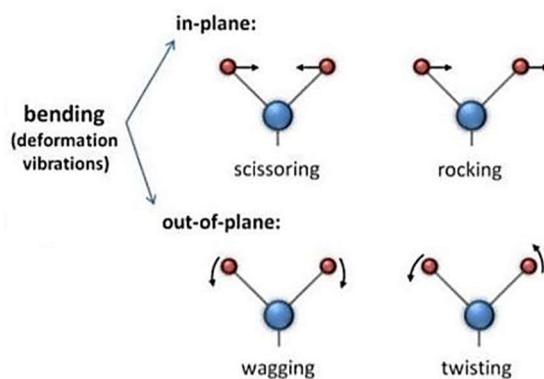


Fig. 1.3 – *Bending dei legami atomici*

Dalla caratterizzazione si va a ricavare uno spettro infrarosso avente in ascissa una scala di frequenze espressa in numero d'onda su cm^{-1} e in ordinata la percentuale di radiazione trasmessa, detta trasmittanza.

Il prodotto, prima di essere caratterizzato, è stato fatto essiccare sotto cappa per poter rimuovere l'acqua in eccesso ed ottenere una buona leggibilità dello spettro infrarosso finale.

È stato ricavato, dunque, uno spettro di assorbimento infrarosso relativo al prodotto studiato.

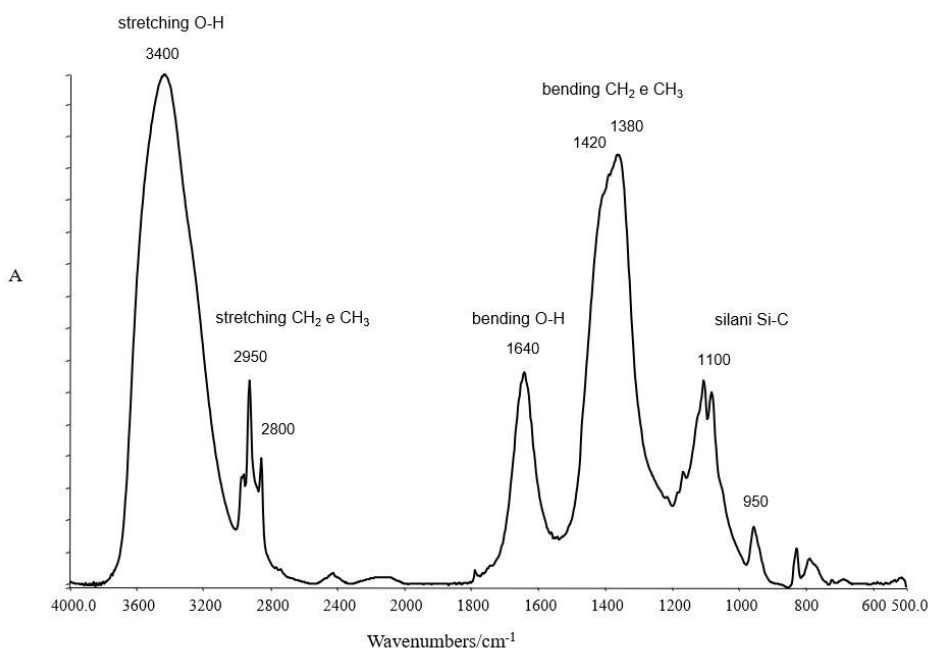


Fig. 1.4 – Spettro di assorbimento infrarosso del compound multifunzione

Come è possibile notare dallo spettro di assorbimento, il formulato liquido risulta essere costituito prevalentemente da acqua che viene individuata alla banda 1640 numero d'onda/ cm^{-1} come bending e ritrovata come stretching a 3400 numero d'onda/ cm^{-1} .

Dallo spettro si può notare la presenza di un picco di bending nella banda tra 1350 e 1450 numero d'onda/ cm^{-1} tipico dei legami CH_2 e CH_3 , che viene confermato dal picco di stretching tra 2800 e 3000 numero d'onda/ cm^{-1} . Infine, è stata rilevata la presenza di silani Si-C grazie ai picchi di assorbimenti nella banda tra 950 e 1200 numero d'onda/ cm^{-1} .

1.2 Caratteristiche specifiche

Il formulato liquido viene definito innovativo poiché permette, con un unico prodotto, di esplicare contemporaneamente più azioni:

- Neutralizzazione della reazione alcali-aggregato (ASR).
- Protezione contro la corrosione da cloruri nelle armature.
- Incrementare la durabilità e la vita utile delle strutture.
- Protezione in caso di contatto con sali disgelanti e ambienti marini.
- Azione protettiva idrofobizzante.

Inoltre, risulta essere di facile utilizzo grazie alla formula liquida ad alta capacità migratoria che permette una buona diffusione con reattività catodica e anodica fino ad un livello nanocapillare.

1.3 Applicazione

L'applicazione risulta semplice, in quanto il compound innovativo multifunzione risulta essere pronto all'uso e non richiede diluizione prima dell'utilizzo.

Può essere applicato con due diverse modalità in base alla tipologia di struttura trattata:

Aged and New Concrete:

Spennellato sulla superficie del calcestruzzo a strati multipli, fresco su fresco, verificando che la prima mano si sia assorbita
Applicato a spruzzo a bassa pressione, a pennello o a rullo

Only New Concrete:

Introdotta in percentuale nel mix design dell'impasto cementizio

Durante l'utilizzo del prodotto liquido, le temperature esterne devono mantenersi tra i + 5 °C e i + 35 °C.

2. Attività sperimentale

L'attività sperimentale è stata suddivisa in due parti in modo tale da valutare le capacità del compound innovativo multifunzione riguardo le due cause di degrado trattate:

- Capacità di inibizione della corrosione dei ferri di armatura
- Capacità di mitigazione/annullamento della reazione alcali-aggregato

2.1 Studio degli effetti del prodotto innovativo come inibitore di corrosione

Per lo studio della caratteristica del compound multifunzione è stato preso in considerazione l'articolo **“Corrosion behaviour of bare and galvanized steel in geopolymer and Ordinary Portland Cement based mortars with the same strength class exposed to chlorides”** (F. Tittarelli, 2018) scritto sulla rivista **Corrosion Science**, per poter replicare la metodologia di analisi ed acquisizioni dati.

2.1.1 *Materiali*

Per la sperimentazione è stato adoperato un cemento di tipo 42,5R, cemento portland al calcare di categoria CEM II/A-LL avente una resistenza a compressione iniziale a 2 giorni ≥ 20 MPa.

Il cemento scelto è composto per un 80-94% da clinker che deriva dalla macinazione di una miscela di calcare, argilla e sabbia che viene sottoposta a cottura ad alta temperatura e che costituisce la base di gran parte dei cementi in commercio.

Per quanto riguarda l'inerte, è stata utilizzata la sabbia del Po con granulometria media con diametro compreso tra 0,1 cm e 1,1 cm, che restituisce una buona lavorabilità alla malta.

L'aggregato utilizzato è composto dal 75,62% di SiO_2 .

2.1.2 Mix Design

È stata progettata la miscela considerando una classe di lavorabilità pari a S4 con rapporto a/c alto pari a 0,65 in modo da permettere la penetrazione dei cloruri contenuti nella soluzione, attraverso le porosità della matrice cementizia. La struttura dei pori gioca un importante ruolo sul movimento degli ioni dall'ambiente esterno alla superficie delle barre di acciaio.

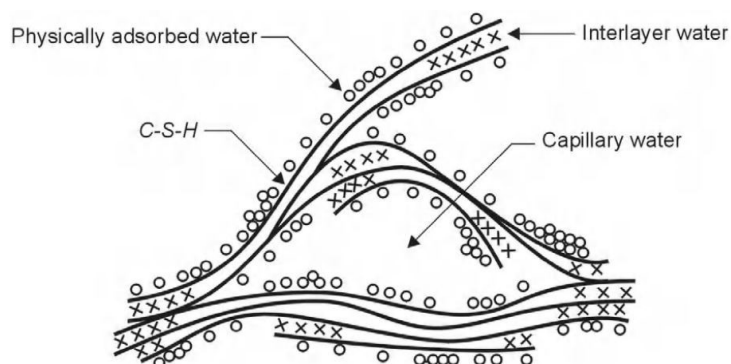


Fig.2.1 – Modello Feldman-Sereda di un poro capillare

Il compound innovativo multifunzione è stato aggiunto all'impasto in sostituzione dell'acqua in modo da ottenere cinque miscele con le medesime caratteristiche di lavorabilità: partendo dalla miscela di riferimento è stata ridotta la quantità d'acqua in proporzione e sostituita all'1%, 3% e 5% del formulato liquido rispetto al peso del cemento. Oltre alle miscele con il formulato liquido aggiunto in proporzione all'interno dell'impasto, è stata impiegata un'ulteriore miscela di riferimento per lo studio delle caratteristiche del prodotto applicato sulla superficie.

Sono state ricavate le seguenti quantità dei componenti delle malte impiegate nella creazione dei provini:

Provino	Tipo di miscela	a/c	Classe lavorabilità	Innovative compound	% i.c. in massa	Acqua [g/l]	Cemento [g/l]	Sabbia [g/l]
1	Miscela di riferimento	0,65	S4	NO	0%	250	385	1465
2	Covered concrete			SI	0%	250	385	1465
3	Innovative compound in massa 1%			SI	1%	248	385	1465
4	Innovative compound in massa 3%			SI	3%	243	385	1465
5	Innovative compound in massa 5%			SI	5%	238	385	1465

Tab. 2.1 – Mix design delle cinque miscele

2.1.3 Preparazione dei provini

Per ogni miscela è stato realizzato un provino cilindrico con diametro 115 mm ed altezza 125 mm con l'ausilio di un cassero in plastica ed un coperchio forato per l'alloggiamento delle barre d'acciaio. Tramite due provette fissate al coperchio, sono state create due cavità cilindriche atte al posizionamento degli elettrodi a calomelano saturo (SCE) durante le fasi di misurazione. La vista schematica del provino è mostrata nell'immagine sottostante.

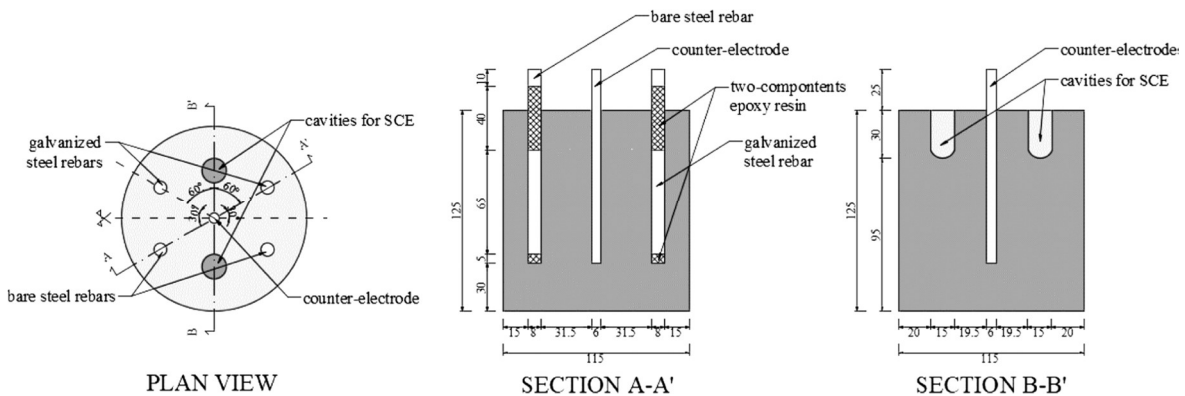


Fig. 2.2 – Vista schematica dei provini cilindrici usati per le misurazioni elettrochimiche

Per ogni provino sono state utilizzate quattro barre di armatura in acciaio al carbonio ($\varnothing=8\text{mm}$) con la funzione di elettrodi di lavoro, simmetricamente incorporate all'interno del cilindro di calcestruzzo in modo da realizzare un provino con un copriferro di 15 mm.

Le barre d'acciaio sono state resinate nella parte inferiore e fissate al coperchio in plastica con degli elastici per mantenerle in posizione durante il getto del calcestruzzo all'interno del cassero.



Fig. 2.3 – Barre di armatura e provette fissate al coperchio forato utilizzato durante il getto della miscela

Una volta scasserati i provini cilindrici sono stati resinati nella parte superiore ed inferiore per delimitare la superficie esposta ai successivi cicli in soluzione salina ed evitare che la soluzione penetrasse all'interno dei pozzetti.

Per comprendere meglio l'effetto della corrosione dell'acciaio tramite la penetrazione dei cloruri attraverso la porosità della matrice cementizia, per ogni miscela è stato realizzato un provino cubico con lato 100 mm, senza il rinforzo delle barre, che è stato sottoposto alle stesse condizioni di bagnato-asciutto della soluzione salina dei provini cilindrici rinforzati.

Tutti i provini sono stati fatti maturare in laboratorio in condizioni di temperatura di $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ ed umidità relativa pari a $\text{RH} = 70 \pm 5\%$ per una durata di 70 giorni prima di essere sottoposti ai cicli di bagno-asciuga in soluzione salina.

Terminata la stagionatura, entrambi i provini, cilindrico e cubico, relativi alla seconda miscela di riferimento, sono stati spennellati con il compound innovativo multifunzione sulla superficie applicando circa quattro strati di prodotto su ciascuno.

2.1.4 Acquisizione dei dati

Per l'analisi dell'efficienza del formulato liquido riguardo l'inibizione della corrosione delle barre di armatura ad opera dei cloruri, sono stati predisposti due recipienti in modo da contenere la soluzione di NaCl 3,5% e alla base dei contenitori sono stati fissati dei tubicini di supporto per far in modo che i provini non toccassero il fondo del recipiente.

I provini sono stati esposti a 12 cicli di bagno-asciuga di cui un giorno di bagnato in immersione nella soluzione salina e sei giorni di asciutto con esposizione all'aria.



Fig. 2.4 – Provini cilindrici armati immersi nella soluzione salina 3,5% durante la fase umida

Durante i cicli di esposizione alle condizioni bagnato-asciutto, è stata aggiunta al bisogno la soluzione di NaCl per mantenere costante il livello del fluido e per evitare la diluizione della soluzione.

Il potenziale di corrosione delle barre è stato acquisito in condizione asciutta prima di immergere i provini nella soluzione e in condizione umida prima di spostarli all'aria. Inoltre, è stata fatta una misura intermedia del potenziale di corrosione nel corso dell'asciugatura per ottenere una maggior precisione della tendenza della curva.

Per lo studio del potenziale delle barre immerse nel conglomerato cementizio è stato adoperato un Voltmetro ad alta impedenza a cui è stato collegato un elettrodo al calomelano saturo (SCE, +0.241 V vs SHE) come riferimento.

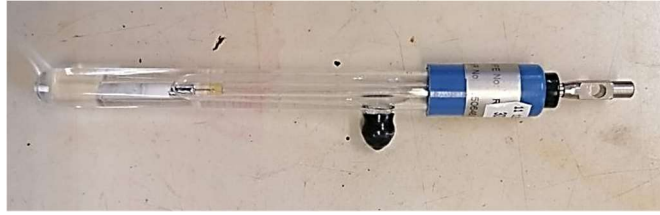


Fig. 2.5 – Elettrodo al calomelano saturo



Fig. 2.6 – Voltmetro utilizzato per rilevare il potenziale delle barre di armatura nei cicli

Il potenziale dell'elettrodo a calomelano dipende solo dall'attività dello ione cloruro e dalla temperatura: lavorando a temperatura costante è possibile rilevare l'attività dello ione cloruro nella soluzione interna all'elettrodo.

Durante la prova, l'elettrodo a calomelano è stato inserito nei pozzetti dopo averli riempiti precedentemente di idrossido di calcio saturo Ca(OH)_2 per permettere il contatto elettrolitico tra la barra presa in considerazione e l'elettrodo a calomelano stesso.

Dalle misure effettuate nei diciotto cicli è stato possibile ricavare il grafico seguente che riporta l'andamento della media dei potenziali di corrosione delle barre radiali di ogni provino in sperimentazione.

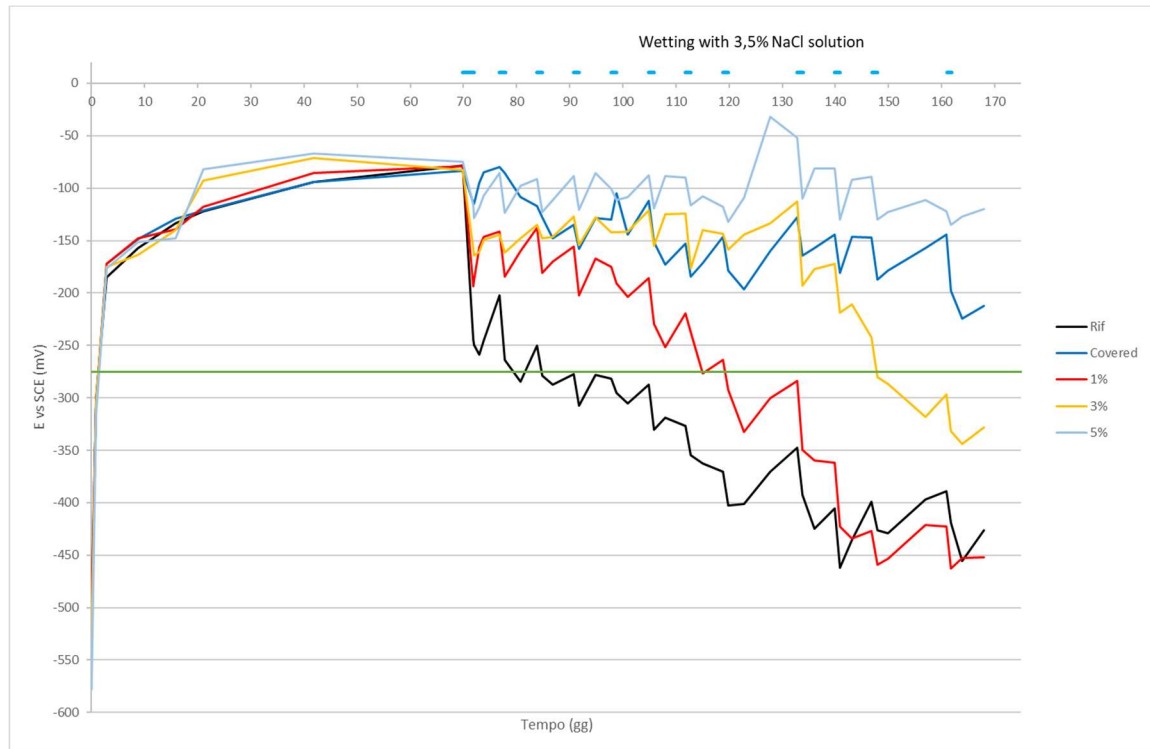
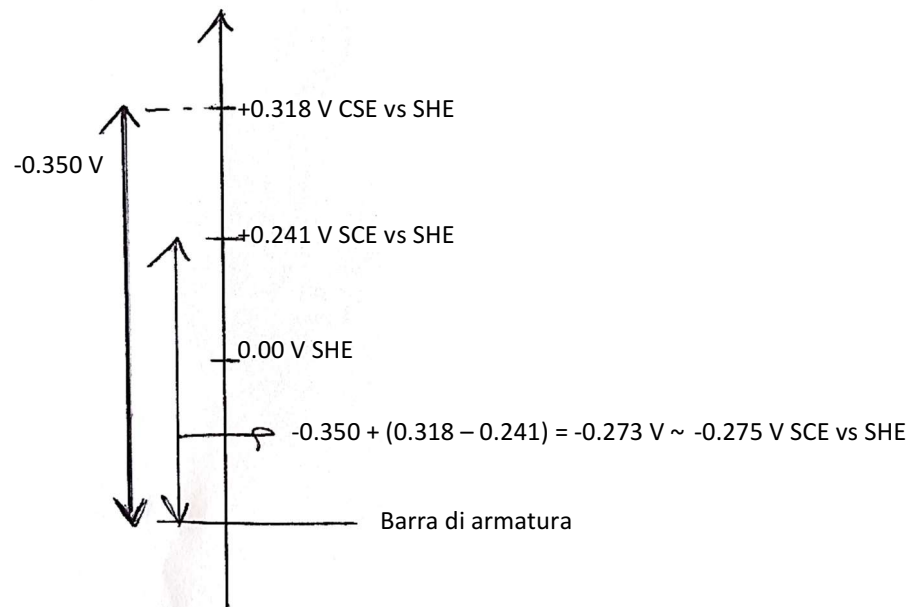


Fig. 2.7 – Diagramma dei potenziali di corrosione dei cinque provini cilindrici sperimentali

Consultando la normativa americana ASTM C876 “Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete” (ASTM C876, 2015) si definiscono i range relativi all’elettrodo di rame-rame (II) solfato per cui considerare attivo il processo di corrosione da parte dei cloruri su un’area specifica del metallo:

- Se il potenziale di un’area è maggiore di -0.20 V CSE vs SHE, c’è la probabilità del 90% dell’assenza di corrosione dell’area presa in considerazione nel momento della misurazione,
- Se il potenziale è compreso tra -0.20 e -0.35 V CSE vs SHE, la corrosione della zona considerata non è certa,
- Se il potenziale è inferiore a -0.35 V CSE vs SHE, c’è la probabilità del 90% della presenza di corrosione dell’area presa in considerazione.

Nella sperimentazione, è stato utilizzato un elettrodo a calomelano saturo che ha un valore di potenziale pari a + 0.241 V SCE vs SHE. È stato ricavato il valore di potenziale critico di probabilità di corrosione attraverso la proporzione:



Dunque, è stata definita la linea orizzontale verde di alta probabilità di corrosione al potenziale -0.275 V SCE arrotondando il valore critico ricavato dalla proporzione.



Fig.2.8 – Misura ed acquisizione dei dati del potenziale di corrosione durante la fase umida

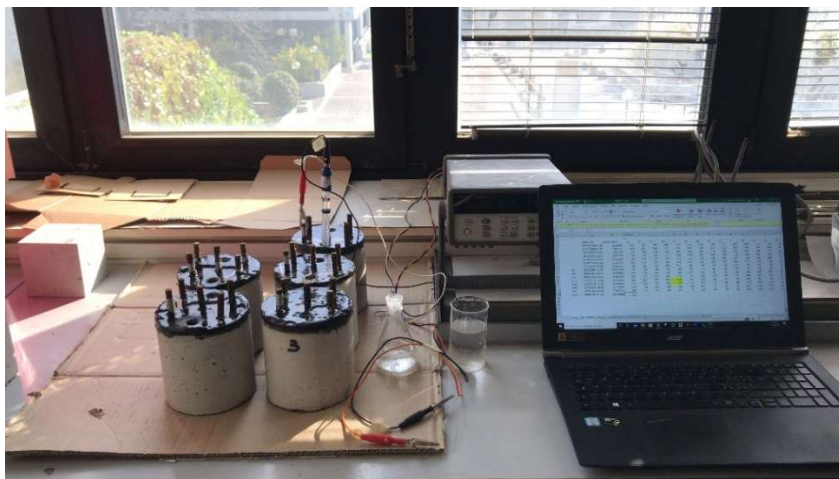


Fig. 2.9 - Misura ed acquisizione dei dati del potenziale di corrosione durante la fase asciutta

2.1.5 Prelievo polveri

Durante il periodo di sperimentazione, sono state prelevate le polveri della matrice cementizia dai provini cubici, che hanno subito gli stessi cicli di bagno-asciuga dei provini cilindrici armati sottoposti alla prova per l'acquisizione dei potenziali di corrosione.

Il prelievo delle polveri è avvenuto secondo la normativa **UNI 9944:1992** (UNI 9944, 1992), in cui al capitolo 2.3 spiega la procedura di estrazione.

È stato utilizzato un trapano a colonna con punta di 1,5 cm di diametro per prelevare la polvere della matrice cementizia dai provini analizzati.



Fig. 2.10 – Trapano a colonna per il prelievo delle polveri per l'analisi del quantitativo di cloruri



Fig. 2.11 – Provino cubico sottoposto al primo prelievo di polveri

La concentrazione libera dei cloruri nelle malte è stata definita ad una profondità 0-10 mm, 10-20mm e a 20-30 mm dopo tre, sei e dodici cicli di bagnatura ed asciugatura.

Per evitare la contaminazione delle polveri prelevate alle diverse profondità, è stata pulita la punta del trapano a colonna e il foro effettuato nel provino cubico attraverso un compressore ad aria, al termine di ogni prelievo.

Ogni campione di polvere (circa 5 gr ciascuno), una volta estratto, è stato diluito in 20 ml di acqua distillata con rapporto polvere/acqua di circa di 1:4. La soluzione ottenuta è stata miscelata per 24 ore per dissolvere i cloruri liberi dal campione solido.



Fig. 2.12 – Macchinario usato per la miscelazione

Una volta effettuata la miscelazione, le quindici soluzioni sono state filtrate e diluite in 100 ml di acqua distillata all'interno di un matraccio.

Le soluzioni limpide contenenti cloruri sono state analizzate con la tecnica della cromatografia ionica. La procedura si basa sulla separazione cromatografica degli anioni Cl⁻ mediante colonne a scambio anionico. La quantità degli anioni è stata poi ricavata da un rivelatore conduttimetrico.

È stata ricavata la frazione in peso del cemento sul totale per poter ricavare la concentrazione percentuale dei cloruri contenuti nelle campionature.

A/C	A (g/L)	Cem (g/L)	Sabbia (g/L)	g/L	Frazione in peso di cem
0,65	250	385	1465	2100	0,183

Tab. 2.2 – Frazione in peso di cemento

Le percentuali di cloruri ricavate:

Terzo ciclo

	Concentrazione	Quantità Cl ⁻ (gr)	Quantità polvere	Quantità cem (gr)	% Cl ⁻
cloruri RIF 0-10	94,081	0,009408	3,762	0,689718	1,364
cloruri RIF 10-20	45,542	0,004554	4,972	0,911478	0,500
cloruri RIF 20-30	3,686	0,000369	4,601	0,843498	0,044
cloruri COV 0-10	17,350	0,001735	3,178	0,582560	0,298
cloruri COV 10-20	6,877	0,000688	5,022	0,920718	0,075
cloruri COV 20-30	0,638	0,000064	4,896	0,897673	0,007
cloruri 1% 0-10	61,709	0,006171	3,398	0,622967	0,991
cloruri 1% 10-20	20,966	0,002097	4,970	0,911222	0,230
cloruri 1% 20-30	0,642	0,000064	5,902	1,081997	0,006
cloruri 3% 0-10	34,466	0,003447	3,448	0,632078	0,545
cloruri 3% 10-20	2,979	0,000298	4,568	0,837485	0,036
cloruri 3% 20-30	0,570	0,000057	5,107	0,936338	0,006
cloruri 5% 0-10	23,748	0,002375	3,516	0,644563	0,368
cloruri 5% 10-20	1,603	0,000160	4,495	0,824157	0,019
cloruri 5% 20-30	0,590	0,000059	4,955	0,908325	0,006

Tab. 2.3 – Concentrazioni di cloruri al terzo ciclo di bagno-asciuga

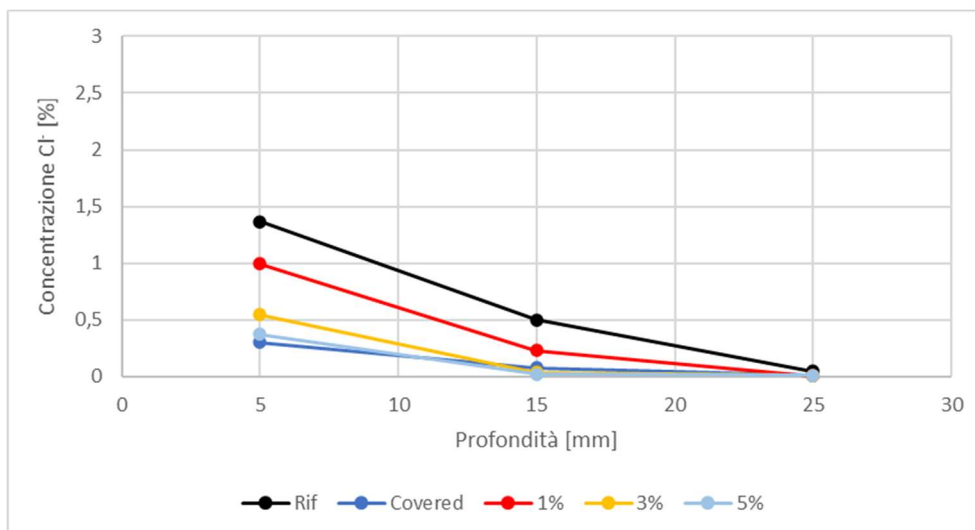


Fig. 2.13 – Grafico relativo alla concentrazione dei cloruri alle diverse profondità di prelievo al terzo ciclo di bagno-asciuga

Sesto ciclo

	Concentrazione	Quantità Cl⁻ (gr)	Quantità polvere	Quantità cem (gr)	% Cl⁻
cloruri RIF 0-10	137,000	0,013700	5,995	1,099014	1,247
cloruri RIF 10-20	41,810	0,004181	2,882	0,528392	0,791
cloruri RIF 20-30	15,840	0,001584	4,136	0,758261	0,209
cloruri COV 0-10	3,710	0,000371	5,581	1,023213	0,036
cloruri COV 10-20	0,680	0,000068	2,393	0,438656	0,015
cloruri COV 20-30	0,739	0,000074	4,393	0,805343	0,009
cloruri 1% 0-10	82,310	0,008231	4,795	0,879017	0,936
cloruri 1% 10-20	20,120	0,002012	2,926	0,536430	0,375
cloruri 1% 20-30	1,949	0,000195	4,665	0,855202	0,023
cloruri 3% 0-10	48,490	0,004849	5,532	1,014290	0,478
cloruri 3% 10-20	1,652	0,000165	2,961	0,542865	0,030
cloruri 3% 20-30	0,726	0,000073	4,580	0,839716	0,009
cloruri 5% 0-10	57,280	0,005728	6,036	1,106536	0,518
cloruri 5% 10-20	1,867	0,000187	2,498	0,457992	0,041
cloruri 5% 20-30	0,758	0,000076	4,761	0,872826	0,009

Tab. 2.4 – Concentrazioni di cloruri al sesto ciclo di bagno-asciuga

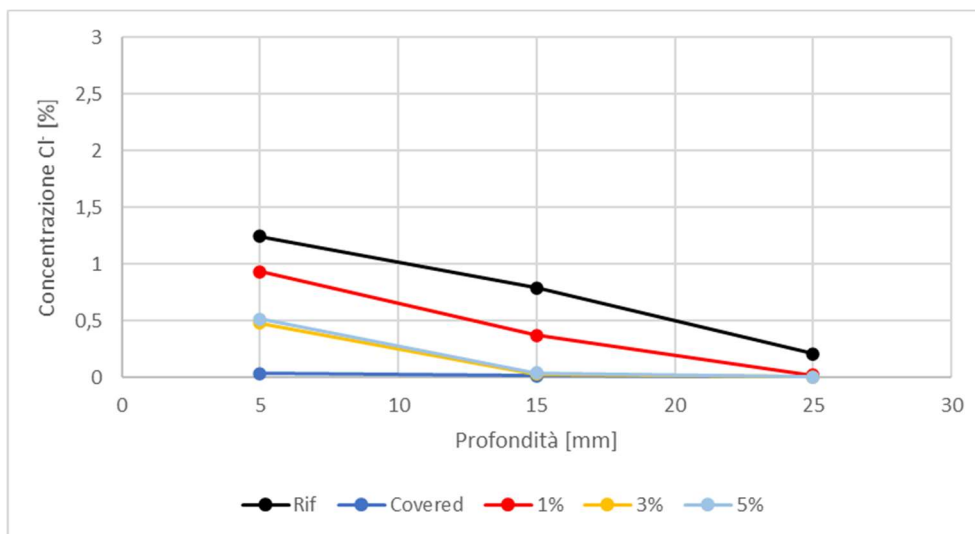


Fig. 2.14 – Grafico relativo alla concentrazione dei cloruri alle diverse profondità di prelievo al sesto ciclo di bagno-asciuga

Dodicesimo ciclo

	Concentrazione	Quantità Cl- (gr)	Quantità polvere	Quantità cem (gr)	% Cl-
cloruri RIF 0-10	142,100	0,014210	3,239	0,593896	2,393
cloruri RIF 10-20	197,900	0,019790	5,101	0,935134	2,116
cloruri RIF 20-30	46,430	0,004643	4,221	0,773815	0,600
cloruri COV 0-10	1,710	0,000171	2,613	0,479013	0,036
cloruri COV 10-20	0,751	0,000075	4,948	0,907143	0,008
cloruri COV 20-30	0,909	0,000091	4,339	0,795564	0,011
cloruri 1% 0-10	93,090	0,009309	2,691	0,493295	1,887
cloruri 1% 10-20	224,000	0,022400	5,649	1,035577	2,163
cloruri 1% 20-30	35,880	0,003588	4,270	0,782876	0,458
cloruri 3% 0-10	84,820	0,008482	2,944	0,539772	1,571
cloruri 3% 10-20	70,360	0,007036	5,111	0,937009	0,751
cloruri 3% 20-30	1,842	0,000184	4,956	0,908606	0,020
cloruri 5% 0-10	69,570	0,006957	2,975	0,545481	1,275
cloruri 5% 10-20	40,300	0,004030	5,539	1,015533	0,397
cloruri 5% 20-30	1,140	0,000114	4,375	0,802151	0,014

Tab. 2.5 – Concentrazioni di cloruri al dodicesimo ciclo di bagno-asciuga

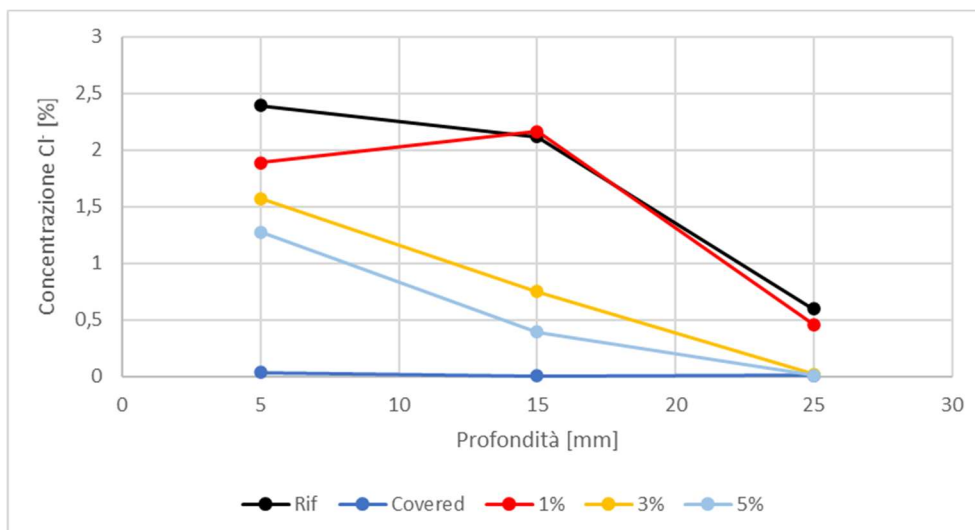


Fig. 2.15 – Grafico relativo alla concentrazione dei cloruri alle diverse profondità di prelievo al dodicesimo ciclo di bagno-asciuga

Dai dati ricavati è stato possibile creare dei grafici corrispondenti alle quantità dei cloruri liberi contenute nelle polveri dei provini analizzati, alle varie profondità di prelievo.

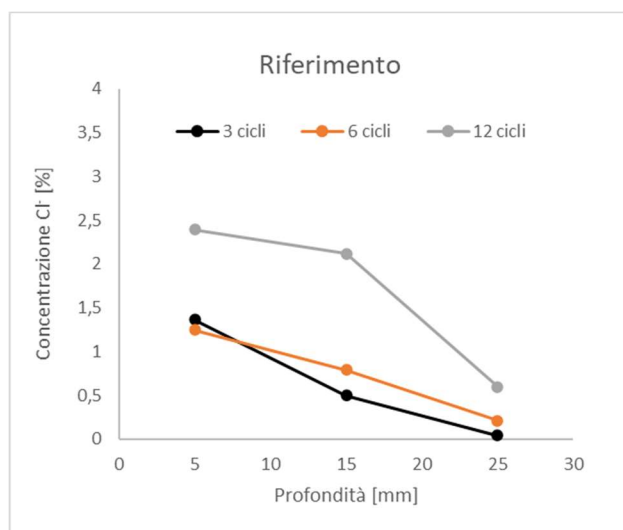


Fig. 2.16 – Concentrazione dei cloruri del provino di riferimento ai vari prelievi

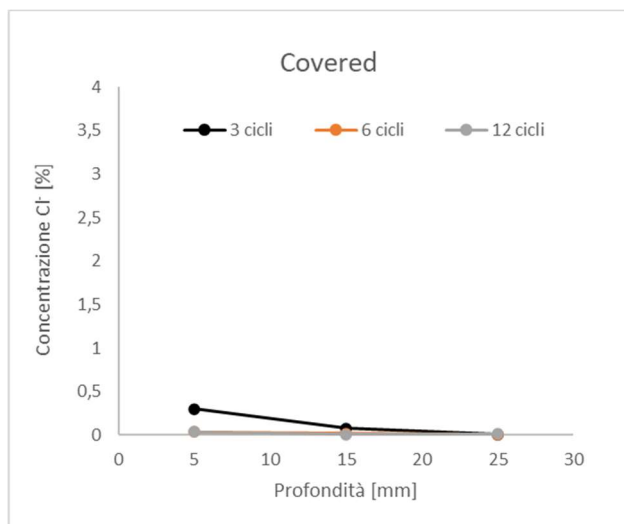


Fig. 2.17 – Concentrazione dei cloruri del provino spennellato con il compound (Covered) ai vari prelievi

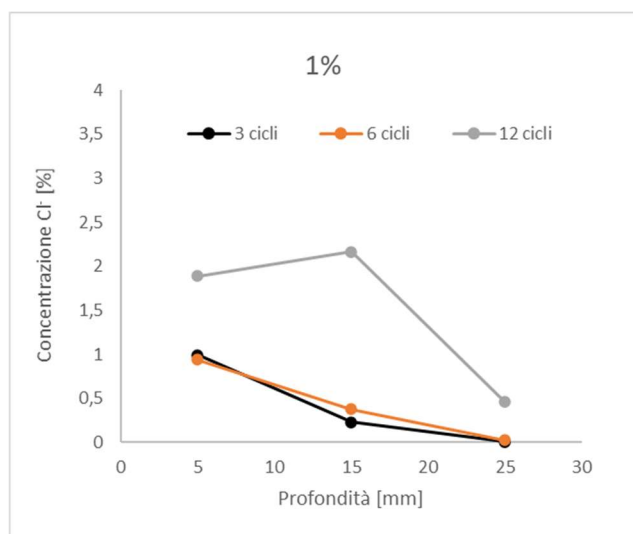


Fig. 2.18 – Concentrazione dei cloruri del provino con l'1% del compound in massa ai vari prelievi

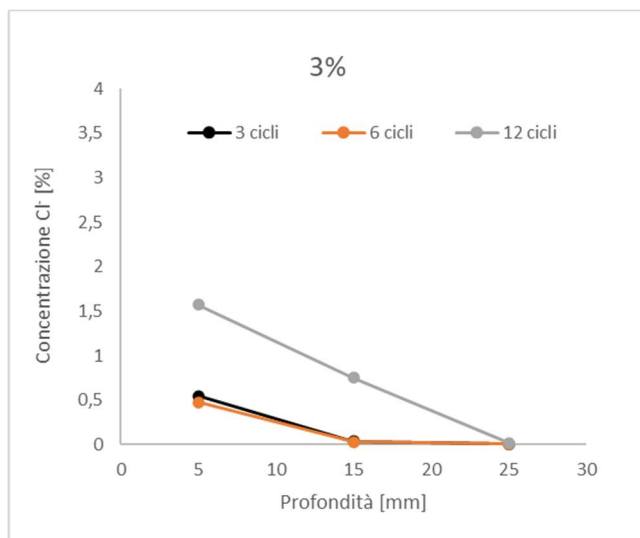


Fig. 2.19 – Concentrazione dei cloruri del provino con l'3% del compound in massa ai vari prelievi

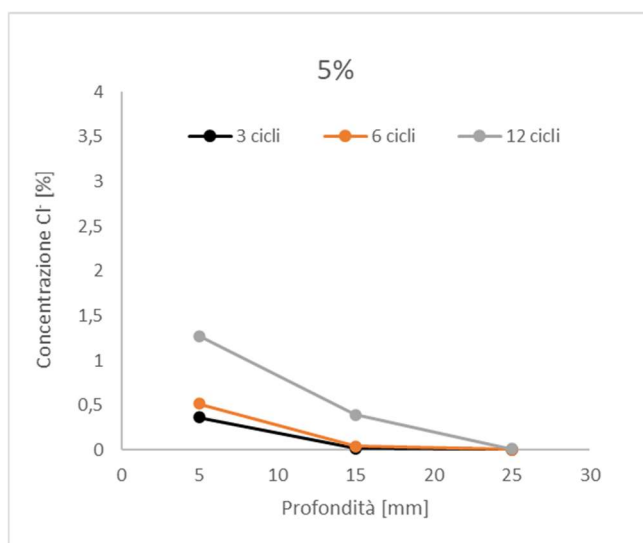


Fig. 2.20 – Concentrazione dei cloruri del provino con l'5% del compound in massa ai vari prelievi

2.1.6 Risultati

I risultati ottenuti dalla prima parte della sperimentazione, inerente alla capacità del compound innovativo di inibire la corrosione delle barre di armatura, dimostrano che i campioni contenenti il formulato liquido riescono a resistere maggiormente ai cloruri disciolti nella soluzione 3,5% di NaCl. In particolare, si è notata una crescita di protezione delle barre di rinforzo in proporzione all'aumento del dosaggio di compound aggiunto in massa.

Dalle misure effettuate, il provino con l'1% del prodotto liquido in massa sul peso del cemento ha raggiunto un potenziale medio delle armature inferiore a -0.275 V SCE all'ottavo ciclo di bagno-asciuga, arrivando ad una concentrazione di cloruri di circa 0,4% sulla superficie delle barre.

Il provino con l'aggiunta in massa del compound al 3% ha superato la linea critica di probabilità di corrosione dopo undici cicli di bagno-asciuga con una concentrazione dei cloruri a 15 mm di coprifermo pari a 0,65%. Arrivando ad aggiungere in massa il 5% del formulato liquido sperimentale si va ad ottenere un'ottima resistenza oltre i dodici cicli nelle condizioni di bagnato-asciutto.

Per quanto riguarda il provino spennellato con il compound innovativo, lo studio ha mostrato delle alte capacità di inibire la corrosione dell'acciaio, da parte del prodotto applicato sulla superficie del calcestruzzo. Il provino "Covered", infatti, grazie al film protettivo superficiale dato dal compound, riesce ad ottenere oltre i dodici cicli di bagno-asciuga un potenziale medio delle barre al di sopra della linea rappresentativa del valore critico probabilistico di corrosione per l'elettrodo a calomelano saturo. Dunque, nei provini "Covered" e "5%", il compound risulta avere una buona capacità di inibire la corrosione delle barre di armatura, pertanto, sono state messe a confronto le quantità di prodotto utilizzato su le due miscele differenti: i provini con il 5% del compound aggiunto in massa risultano contenere circa 19 gr/l, mentre i provini "Covered" risultano avere circa 8 gr/l sulla superficie. Andando a spennellare il prodotto sulla superficie, si va ad utilizzare il 42% in meno rispetto ad utilizzare il compound in massa, ottenendo prestazioni simili riguardo l'inibizione di corrosione dei rinforzi.

2.2 Mitigazione/annullamento della reazione alcali-aggregato

Per la valutazione della seconda caratteristica del compound liquido è stata presa in considerazione la normativa americana ASTM C1260-14 “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)” (ASTM C1260, 2014), per poter replicare la metodologia di prova e per avere un riferimento riguardo la reazione alcali-silice.

In primis è stata studiata l’influenza del vetro e della sua granulometria sull’espansione delle malte a base cementizia. Successivamente, sono stati ricavati dei nuovi provini utilizzando le miscele contenenti il vetro macinato grossolano con l’aggiunta in massa e/o sulla superficie del prodotto analizzato per testarne l’efficacia riguardo la mitigazione della reazione alcali-aggregato.

2.2.1 Mix design

Attraverso le indicazioni della normativa americana sopra citata, è stata considerata una classe di lavorabilità pari a S4 ed un rapporto acqua/cemento pari a 0.47.

In particolare, viene specificato che in presenza di aggregati con densità relativa superiore a 2.45, la proporzione relativa al quantitativo di materiali secchi da utilizzare è di “1 parte di cemento a 2.25 parti di aggregato”.

Per la prima parte della sperimentazione riguardo la reazione alcali-aggregato, sono state progettate tre tipologie di miscela: una miscela di riferimento, una seconda miscela con l’aggiunta di vetro triturato di pezzatura grossolana in sostituzione al 70% della sabbia ed una terza miscela con vetro triturato in polvere sottile sostituito al 70% di sabbia.

Sono stati ottenuti tre impasti con le seguenti proporzioni:

Tipo di miscela	a/c	Classe lavorabilità	Innovative compound	% i.c. in massa	% Vetro	Pezzatura Vetro [μ m]	Acqua [g/l]	Cemento [g/l]	Sabbia [g/l]	Vetro [g/l]
Miscela di riferimento	0,47	S4	NO	0%	0%	0	250	532	1197	0
Rif + Vetro grosso			NO	0%	70%	300-4000	250	532	359,10	837,90
Rif + Vetro fine			NO	0%	70%	> 300	250	532	359,10	837,90

Tab. 2.6 – Mix design delle tre miscele per lo studio della reazione alcali-aggregato

Per la seconda parte della sperimentazione riguardante lo studio delle capacità del compound innovativo di mitigare la reazione alcali-aggregato è stata utilizzata come base di riferimento la miscela con il vetro grossolano in sostituzione al 70% della sabbia.

È stato poi aggiunto il formulato liquido analizzato in proporzioni variabili andando a ricavare le seguenti miscele:

Tipo di miscela	a/c	Classe lavorabilità	Innovative compound	% i.c. in massa	% Vetro	Pezatura Vetro [μm]	Acqua [g/l]	Cemento [g/l]	Sabbia [g/l]	Vetro [g/l]
Rif + Vetro grosso	0,47	S4	NO	0%	70%	300-4000	250	532	359,10	837,90
Covered concrete + Vetro grosso			SI	0%	70%	300-4000	250	532	359,10	837,90
I.c. in massa 1% + Vetro grosso			SI	1%	70%	300-4000	244,68	532	359,10	837,90
I.c. in massa 3% + Vetro grosso			SI	3%	70%	300-4000	234,04	532	359,10	837,90
I.c. in massa 5% + Vetro grosso			SI	5%	70%	300-4000	223,4	532	359,10	837,90

Tab. 2.7 – Mix design delle cinque miscele per lo studio della mitigazione della reazione alcali-aggregato da parte del compound innovativo multifunzione



Fig. 2.21 - Vetro nelle due granulometrie di utilizzo

2.2.2 Utilizzo del vetro

Per l'utilizzo del vetro riciclato, è stato preso di riferimento l'articolo **“Reuse of recycled glass in mortar manufacturing”** (V. Corinaldesi, 2016) della rivista **“European Journal of Environmental and Civil Engineering”** in cui viene trattata la problematica di riutilizzo del vetro di riciclo all'interno di malte o calcestruzzi a causa del rischio della reazione alcali-aggregato ASR. Infatti, durante il periodo di stagionatura, la struttura del vetro silicato amorfo, a contatto con gli alcali provenienti dal cemento, si dissolve nella soluzione alcalina nei pori del calcestruzzo e forma un gel che in presenza di acqua rigonfia e crea delle cricche e fessurazioni nella matrice stessa. Il vetro impiegato per la preparazione della miscela è vetro trasparente riciclato, proveniente da bottiglie e barattoli accuratamente lavati e asciugati prima dell'utilizzo.



Fig. 2.22 – Barattoli di riciclo prima della frantumazione

Prima di tutto, le bottiglie e i barattoli sono stati frantumati fino ad ottenere frammenti quanto più piccoli possibile. È stata poi separata la frazione fine da quella più grossolana attraverso un setaccio andando, dunque, a ricavare due granulometrie di vetro differenti: la frazione fine al di sotto di 300 μm e la frazione grossolana $> 300 \mu\text{m}$ e $> 4000 \mu\text{m}$.



Fig. 2.23 – Frazioni di vetro ricavate dalla setacciatura manuale

2.2.3 Preparazione dei provini

Per la preparazione dei provini è stata presa in considerazione la normativa americana **ASTM C490/C490M “Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete”** (ASTM C490/C490M, 2017) per determinare la variazione di lunghezza dei provini durante la prova e quindi per verificare l’efficienza del compound innovativo multifunzione nella mitigazione dell’espansione dovuta alla reazione alcali-silice.

Sono stati utilizzati dei casseri forati alle estremità sul quale poter fissare, mediante delle viti, dei perni per effettuare la misura attraverso il micrometro. I perni, in seguito, sono stati inglobati attraverso i getti all’interno delle miscele a base cementizia.



Fig. 2.24 – Perni inglobati nella malta



Fig. 2.25 – Cassero preparato per il getto

Per ogni miscela sono stati realizzati tre provini delle dimensioni di 40x40x160 mm.

Per la parte della sperimentazione inerente all'influenza del vetro nelle malte sono stati creati nove provini in totale. Per la parte relativa allo studio dell'efficacia del compound innovativo, invece, sono stati formati dodici provini a cui è stato aggiunto il formulato liquido in diverse percentuali in massa e spennellato sulla superficie.

2.2.4 Influenza del vetro nelle miscele

Lo studio dell'influenza del vetro e della sua granulometria sull'espansione delle malte è avvenuto mediante il metodo descritto nella normativa americana **ASTM C1260-14 “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)”** (ASTM C1260, 2014) mediante le tre miscele sopra citate.

Sono stati realizzati nove provini nei casseri specifici, attraverso il getto delle miscele ed una breve compattazione utilizzando la tavola vibrante per rimuovere l'aria intrappolata durante la miscelazione degli ingredienti. Successivamente, gli stampi sono stati coperti con la pellicola trasparente e conservati a temperatura ambiente.



Fig. 2.26 – Tavola vibrante usata per la compattazione degli impasti

Passate 24 ore i provini sono stati scasserati e posizionati in un contenitore con all'interno sufficiente acqua da immergerli totalmente. Il recipiente è stato posto in forno ad una temperatura di $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ per altre 24 ore in modo da velocizzare la stagionatura senza provocare il ritiro igrometrico dei provini.



Fig. 2.27 – Forno utilizzato per la sperimentazione

È stata eseguita la “**Zero Reading**” di tutti i provini prestando attenzione a tirarne fuori dall'acqua uno alla volta per mantenere invariate le condizioni di misura dei campioni analizzati.

I provini sono stati successivamente immersi in una soluzione di NaOH 1N in un contenitore chiuso e posizionati nel forno alla temperatura di $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.



Fig. 2.28 – Provini immersi nella soluzione di NaOH



Fig. 2.29 – Contenitore chiuso posizionato in forno

Sono state effettuate delle successive letture comparative periodiche dei provini attraverso il micrometro. Ad ogni lettura comparativa svolta, è stato calibrato lo strumento attraverso il calibro di acciaio di 160 mm di dimensione, per migliorare l'accuratezza dei dati rilevati.



Fig. 2.30 – Calibratura del micrometro



Fig. 2.31 – Lettura comparativa dei provini

Sono riportate di seguito i risultati delle letture comparative con cui sono stati costruiti i grafici di ritiro/espansione relativa alla reazione alcali-aggregato.

MISCELA 1 RIFERIMENTO																	
Tempo	Giorni	A	Calibro	Diff	Espan/Rit [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Espan/Rit [%]	B	Calibro	Diff	Espan/Rit [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Espan/Rit [%]	C	Calibro	Diff	Espan/Rit [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Espan/Rit [%]	MEDIA
0	12-mag	3,140	5,050	1,910	0,000	0,000	3,355	5,050	1,695	0,000	0,000	3,380	5,050	1,670	0,000	0,000	0,000
1	13-mag	3,115	5,050	1,935	0,000	-0,016	3,330	5,050	1,720	0,000	-0,016	3,400	5,050	1,650	0,000	0,013	-0,006
2	14-mag	3,155	5,050	1,895	0,000	0,009	3,365	5,050	1,685	0,000	0,006	3,620	5,050	1,430	0,002	0,150	0,055
7	19-mag	3,160	5,030	1,870	0,000	0,025	3,380	5,030	1,650	0,000	0,028	3,355	5,030	1,675	0,000	-0,003	0,017
14	26-mag	3,400	5,050	1,650	0,002	0,163	3,905	5,490	1,585	0,001	0,069	3,855	5,490	1,635	0,000	0,022	0,084
22	03-giu	3,755	5,490	1,735	0,001	0,109	3,970	5,490	1,520	0,001	0,109	3,915	5,490	1,575	0,001	0,059	0,093
30	11-giu	3,780	5,500	1,720	0,001	0,119	4,000	5,500	1,500	0,001	0,122	3,945	5,480	1,535	0,001	0,084	0,108
36	17-giu	3,830	5,480	1,650	0,002	0,163	4,045	5,480	1,435	0,002	0,163	3,995	5,470	1,475	0,001	0,122	0,149
43	24-giu	3,870	5,495	1,625	0,002	0,178	4,100	5,490	1,390	0,002	0,191	4,030	5,490	1,460	0,001	0,131	0,167
49	30-giu	3,920	5,490	1,570	0,002	0,213	4,150	5,490	1,340	0,002	0,222	4,080	5,490	1,410	0,002	0,163	0,199

Tab. 2.8 – Letture con il micrometro della miscela di riferimento durante la prova normata



Fig. 2.30 – Grafico inerente alle letture dei provini di riferimento

MISCELA 2 VETRO GROSSO > 300µm																	
Tempo	Giorni	A	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	B	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	C	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	MEDIA
0	12-mag	3,100	5,050	1,950	0,000	0,000	3,415	5,050	1,635	0,000	0,000	3,150	5,050	1,900	0,000	0,000	0
1	13-mag	3,125	5,050	1,925	0,000	0,016	3,450	5,050	1,600	0,000	0,022	3,175	5,050	1,875	0,000	0,016	0,018
2	14-mag	3,095	5,030	1,935	0,000	0,009	3,430	5,030	1,600	0,000	0,022	3,155	5,030	1,875	0,000	0,016	0,016
7	19-mag	3,125	5,030	1,905	0,000	0,028	3,460	5,030	1,570	0,000	0,041	3,145	5,030	1,885	0,000	0,009	0,026
14	26-mag	3,600	5,490	1,890	0,000	0,037	3,905	5,485	1,580	0,000	0,034	3,610	5,485	1,875	0,000	0,016	0,029
22	03-giu	3,660	5,480	1,820	0,001	0,081	4,000	5,480	1,480	0,001	0,097	3,690	5,480	1,790	0,001	0,069	0,082
30	11-giu	3,815	5,480	1,665	0,002	0,178	4,170	5,480	1,310	0,002	0,203	3,875	5,480	1,605	0,002	0,184	0,189
36	17-giu	3,965	5,475	1,510	0,003	0,275	4,350	5,470	1,120	0,003	0,322	4,050	5,470	1,420	0,003	0,300	0,299
43	24-giu	4,125	5,480	1,355	0,004	0,372	4,535	5,490	0,955	0,004	0,425	4,230	5,490	1,260	0,004	0,400	0,399
49	30-giu	4,260	5,480	1,220	0,005	0,456	4,690	5,480	0,790	0,005	0,528	4,400	5,480	1,080	0,005	0,513	0,499

Tab. 2.9 – Letture con il micrometro della miscela con vetro grosso durante la prova normata

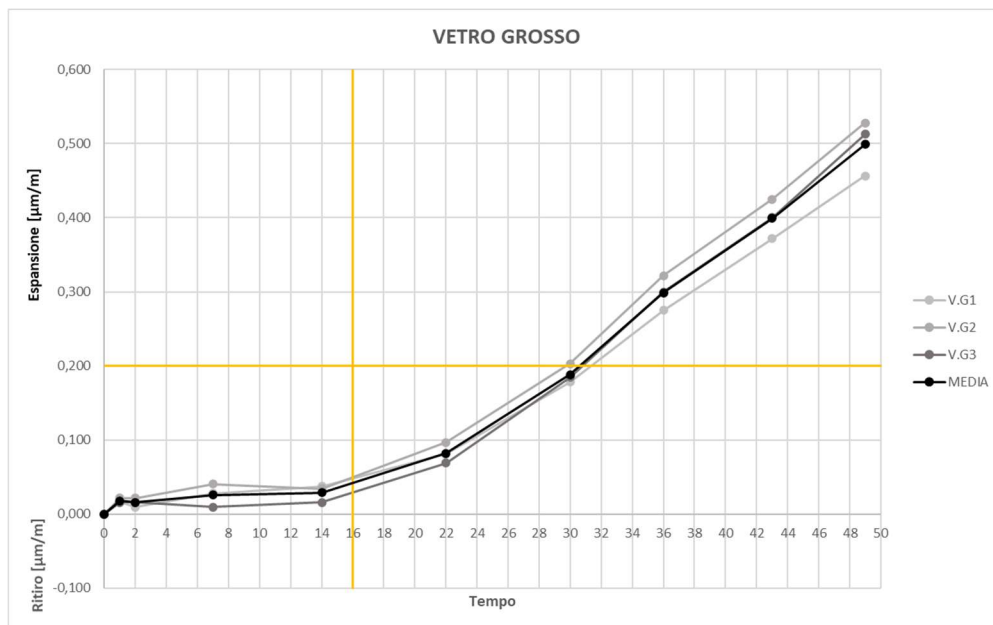


Fig. 2.31 – Grafico inerente alle letture dei provini con vetro grosso

MISCELA 3 VETRO FINE < 300µm																	
Tempo	Giorni	A	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	B	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	C	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	MEDIA
0	12-mag	2,855	5,050	2,195	0,000	0,000	3,340	5,040	1,700	0,000	0,000	3,235	5,040	1,805	0,000	0,000	0
1	13-mag	2,880	5,050	2,170	0,000	0,016	3,360	5,050	1,690	0,000	0,006	3,310	5,050	1,740	0,000	0,041	0,021
2	14-mag	2,845	5,030	2,185	0,000	0,006	3,320	5,030	1,710	0,000	-0,006	3,215	5,030	1,815	0,000	-0,006	-0,002
7	19-mag	2,890	5,030	2,140	0,000	0,034	3,355	5,030	1,675	0,000	0,016	3,250	5,030	1,780	0,000	0,016	0,022
14	26-mag	3,330	5,485	2,155	0,000	0,025	3,800	5,480	1,680	0,000	0,012	3,695	5,480	1,785	0,000	0,012	0,017
22	03-giu	3,345	5,480	2,135	0,000	0,037	3,815	5,480	1,665	0,000	0,022	3,710	5,480	1,770	0,000	0,022	0,027
30	11-giu	3,325	5,480	2,155	0,000	0,025	3,800	5,480	1,680	0,000	0,012	3,685	5,480	1,795	0,000	0,006	0,015
36	17-giu	3,325	5,470	2,145	0,000	0,031	3,795	5,470	1,675	0,000	0,016	3,680	5,470	1,790	0,000	0,009	0,019
43	24-giu	3,330	5,485	2,155	0,000	0,025	3,800	5,480	1,680	0,000	0,012	3,700	5,480	1,780	0,000	0,016	0,018
49	30-giu	3,355	5,480	2,125	0,000	0,044	3,825	5,480	1,655	0,000	0,028	3,710	5,480	1,770	0,000	0,022	0,031

Tab. 2.10 – Letture con il micrometro della miscela con vetro fine durante la prova normata

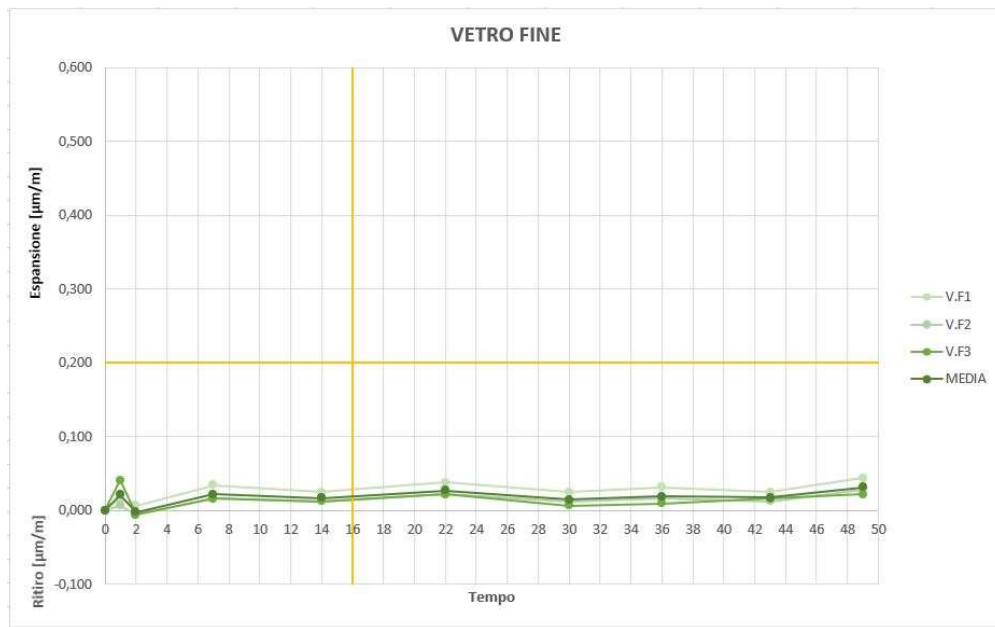


Fig. 2.32 – Grafico inerente alle letture dei provini con vetro fine

In seguito, sono state messe a confronto le medie dei tre provini ricavate per ogni miscela analizzata.

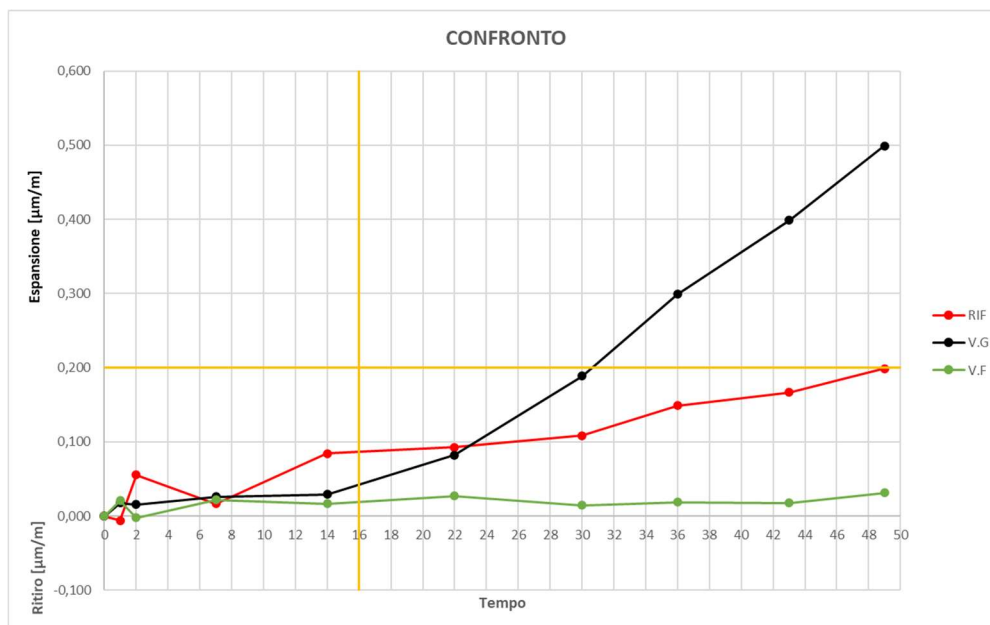


Fig. 2.33 – Grafico dell'andamento dei provini messi a confronto durante la prova

Si è, quindi, andato ad evidenziare il comportamento espansivo deleterio relativo alla miscela con il 70% di vetro grossolano in sostituzione alla sabbia del Po.

Nella normativa vengono indicate delle percentuali di espansione a cui far riferimento:

- Un'espansione minore del 0,10% a 16 giorni sta ad indicare un comportamento innocuo nella maggior parte dei casi riguardo la reazione alcali-silice;
- Un'espansione compresa tra 0,10% e 0,20% a 16 giorni potrebbe indicare un comportamento sia innocuo che deleterio sul campo di applicazione;
- Un'espansione maggiore del 0,20% a 16 giorni è indice di un comportamento potenzialmente deleterio.

Nei grafici sopra riportati, è stata delineata una retta verticale a 16 giorni per individuare la probabilità di espansione indotta dalla prova alcali-silice. La prova è stata comunque prolungata fino a 49 giorni per studiare in maniera più accurata l'influenza del vetro sulle malte.

I provini con l'aggiunta di vetro grossolano in sostituzione della sabbia del Po risultano superare il valore critico di probabilità di corrosione dato dalla normativa a circa 30 giorni dalla scasseratura. Terminato il periodo di sperimentazione, sulla superficie dei provini contenenti vetro grossolano si è potuto notare, a differenza dei provini di riferimento e quelli contenenti vetro fine, la presenza di un deposito biancastro a ridosso delle porosità comunicanti con l'esterno della matrice.



Fig. 2.34 – Provini a 49 giorni dell'analisi della reazione alcali-aggregato

2.2.5 Efficacia del prodotto

Dopo aver ottenuto la conferma sull'espansione significativa dei provini con il vetro grossolano, è stata studiata l'efficacia del compound multifunzione nella mitigazione della reazione espansiva dell'alcali-silice. Per testare l'efficacia del prodotto, si è fatto riferimento al metodo descritto nella normativa americana **ASTM C1260-14 “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)”** (ASTM C1260, 2014), come per la prima parte della sperimentazione riguardante la reazione alcali-aggregato.

Dopo aver creato le cinque miscele, sono stati effettuati i getti all'interno dei casseri specifici per la prova sperimentale. Dopo aver vibrato gli impasti attraverso la tavola a scosse, i casseri sono stati coperti con la pellicola trasparente e fatti stagionare per 24 ore. Trascorso il tempo previsto dalla normativa, dalla scasseratura sono stati ottenuti i seguenti provini:

- Tre provini con vetro grossolano sostituito al 70% della sabbia del Po senza prodotto
- Tre provini con vetro grossolano sostituito al 70% della sabbia del Po con il compound al 1% in massa
- Tre provini con vetro grossolano sostituito al 70% della sabbia del Po con il compound al 3% in massa
- Tre provini con vetro grossolano sostituito al 70% della sabbia del Po con il compound al 5% in massa

La miscela a cui non è stato aggiunto il compound innovativo in percentuale in massa è stata utilizzata per lo studio della capacità del prodotto spennellato sulla superficie, di mitigare la reazione alcali-aggregato. I tre provini sono stati spennellati sulla superficie con il compound innovativo, applicando circa quattro strati di prodotto.



Fig. 2.35 - Provini della miscela “Covered” spennellati con il compound

I provini per lo studio dell'efficacia del compound innovativo sono stati sottoposti agli stessi passaggi dei provini relativi alla prima parte sperimentale sull'alcali-silice. I provini sono stati sottoposti alla stagionatura rapida immersi in acqua e posti in forno alla temperatura di $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ per altre 24 ore.

È stata eseguita la “**Zero Reading**” di tutti i provini attraverso la metodologia sopra riportata, mantenendo invariate le condizioni di misura dei campioni analizzati.

I provini sono stati successivamente immersi in una soluzione di NaOH 1N in un contenitore chiuso e posizionati nel forno alla temperatura di $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Sono state effettuate, dunque, le letture comparative periodiche dei provini con cui sono stati costruiti dei grafici di ritiro/espansione relativa alla reazione alcali-aggregato.

COVERED MISCELA CON VETRO GROSSO > 300µm																	
Tempo	Giorni	A	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	B	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	C	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	MEDIA
0	13-lug	3,500	5,490	1,990	0,000	0,000	3,760	5,480	1,720	0,000	0,000	3,860	5,490	1,630	0,000	0,000	0,000
1	14-lug	3,580	5,500	1,920	0,000	0,044	3,800	5,490	1,690	0,000	0,019	3,845	5,485	1,640	0,000	-0,006	0,019
7	20-lug	3,570	5,500	1,930	0,000	0,038	3,835	5,500	1,665	0,000	0,034	3,880	5,500	1,620	0,000	0,006	0,026
15	28-lug	3,570	5,500	1,930	0,000	0,038	3,830	5,500	1,670	0,000	0,031	3,870	5,490	1,620	0,000	0,006	0,025
22	04-ago	3,590	5,510	1,920	0,000	0,044	3,845	5,505	1,660	0,000	0,038	3,885	5,500	1,615	0,000	0,009	0,030
42	24-ago	3,580	5,500	1,920	0,000	0,044	3,850	5,500	1,650	0,000	0,044	3,890	5,500	1,610	0,000	0,013	0,033
45	27-ago	3,595	5,500	1,905	0,001	0,053	3,850	5,500	1,650	0,000	0,044	3,910	5,500	1,590	0,000	0,025	0,041
49	31-ago	3,595	5,500	1,905	0,001	0,053	3,825	5,490	1,665	0,000	0,034	3,900	5,500	1,600	0,000	0,019	0,035

Tab. 2.11 – Letture con il micrometro della miscela con vetro grosso e il provino spennellato di compound innovativo durante la prova normata

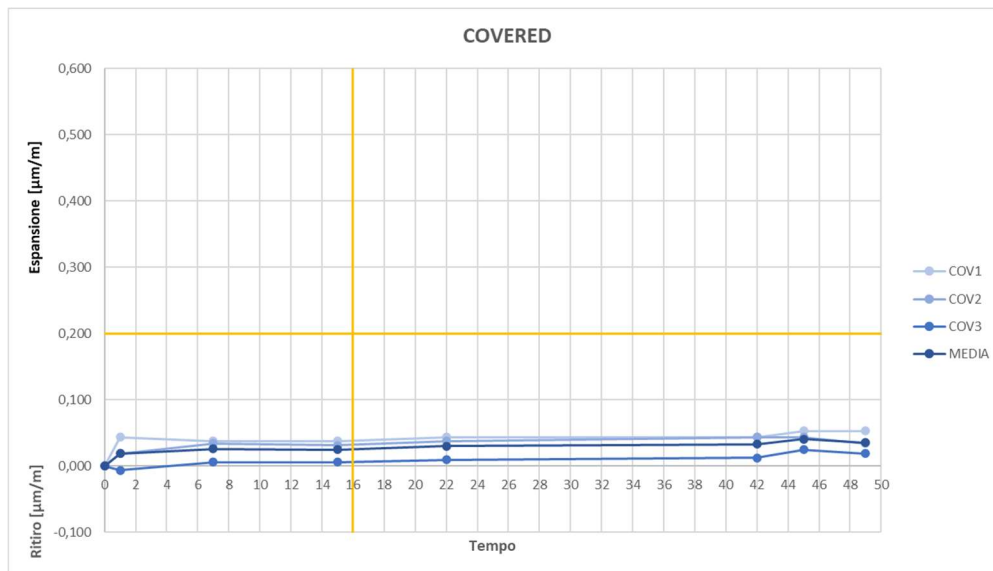


Fig. 2.35 – Grafico inerente alle letture dei provini con vetro grossolano e spennellati con il compound

PRODOTTO AL 1% MISCELA CON VETRO GROSSO > 300µm																	
Tempo	Giorni	A	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	B	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	C	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	MEDIA
0	13-lug	3,350	5,480	2,130	0,000	0,000	3,780	5,480	1,700	0,000	0,000	4,095	5,480	1,385	0,000	0,000	0,000
1	14-lug	3,400	5,515	2,115	0,000	0,009	3,800	5,515	1,715	0,000	-0,009	4,115	5,515	1,400	0,000	-0,009	-0,003
7	20-lug	3,445	5,500	2,055	0,000	0,047	3,850	5,500	1,650	0,000	0,031	4,160	5,500	1,340	0,000	0,028	0,035
15	28-lug	3,450	5,495	2,045	0,001	0,053	3,825	5,500	1,675	0,000	0,016	4,150	5,495	1,345	0,000	0,025	0,031
22	04-ago	3,440	5,500	2,060	0,000	0,044	3,840	5,500	1,660	0,000	0,025	4,155	5,505	1,350	0,000	0,022	0,030
42	24-ago	3,550	5,500	1,950	0,001	0,113	3,850	5,500	1,650	0,000	0,031	4,165	5,500	1,335	0,000	0,031	0,058
45	27-ago	3,560	5,500	1,940	0,001	0,119	3,860	5,500	1,640	0,000	0,038	4,180	5,500	1,320	0,000	0,041	0,066
49	31-ago	3,460	5,500	2,040	0,001	0,056	3,870	5,500	1,630	0,000	0,044	4,180	5,500	1,320	0,000	0,041	0,047

Tab. 2.12 - Letture con il micrometro della miscela con vero grosso e l'1% di compound innovativo in massa durante la prova normata

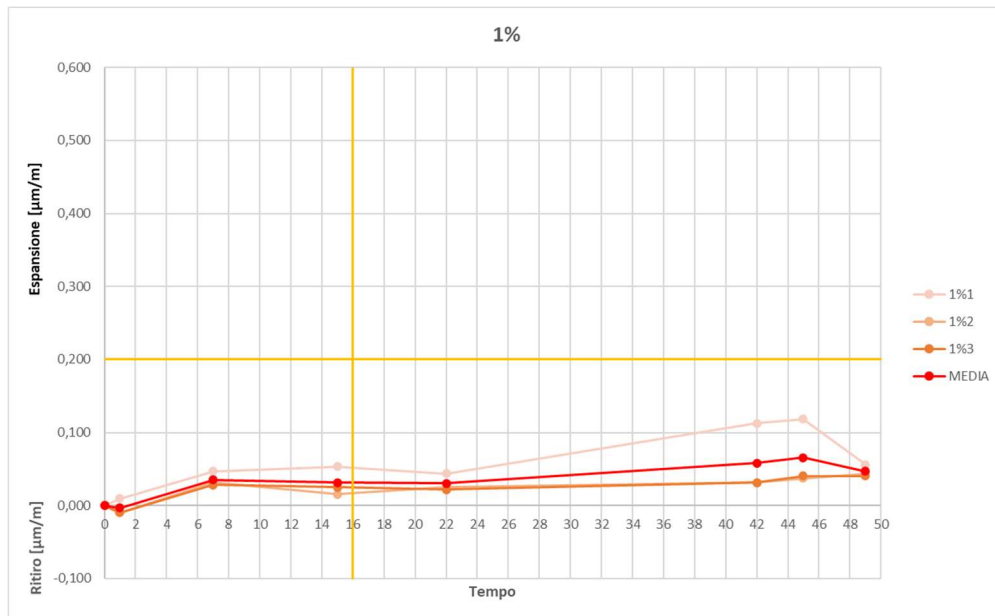


Fig. 2.36 - Grafico inerente alle letture dei provini con vetro grossolano e l'1% di compound in massa

PRODOTTO AL 3% MISCELA CON VETRO GROSSO > 300µm																	
Tempo	Giorni	A	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	B	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	C	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	MEDIA
0	20-lug	3,830	5,500	1,670	0,000	0,000	3,850	5,500	1,650	0,000	0,000	3,760	5,500	1,740	0,000	0,000	0,000
1	21-lug	3,850	5,490	1,640	0,000	0,019	3,905	5,490	1,585	0,000	0,041	3,800	5,490	1,690	0,000	0,031	0,030
8	28-lug	3,845	5,500	1,655	0,000	0,009	3,885	5,500	1,615	0,000	0,022	3,795	5,500	1,705	0,000	0,022	0,018
15	04-ago	3,855	5,500	1,645	0,000	0,016	3,895	5,510	1,615	0,000	0,022	3,815	5,505	1,690	0,000	0,031	0,023
35	24-ago	3,865	5,490	1,625	0,000	0,028	3,925	5,490	1,565	0,001	0,053	3,815	5,490	1,675	0,000	0,041	0,041
38	27-ago	3,925	5,500	1,575	0,001	0,059	3,920	5,500	1,580	0,000	0,044	3,840	5,500	1,660	0,001	0,050	0,051
45	03-set	3,890	5,500	1,610	0,000	0,038	3,920	5,500	1,580	0,000	0,044	3,850	5,500	1,650	0,001	0,056	0,046
49	07-set	3,895	5,500	1,605	0,000	0,041	3,910	5,500	1,590	0,000	0,038	3,850	5,500	1,650	0,001	0,056	0,045

Tab. 2.13 - Letture con il micrometro della miscela con vetro grosso e l'3% di compound innovativo in massa durante la prova normata

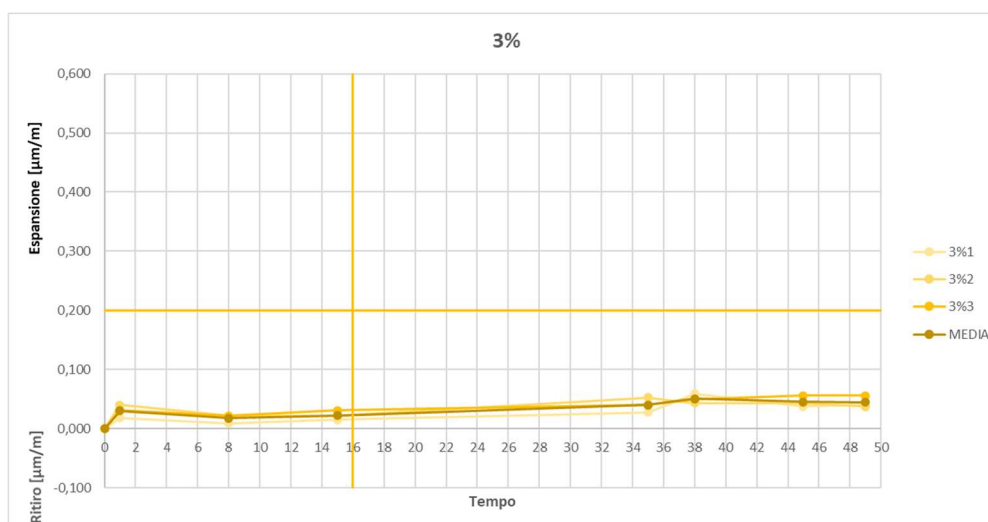


Fig. 2.37 - Grafico inerente alle letture dei provini con vetro grossolano e l'3% di compound in massa

PRODOTTO AL 5% MISCELA CON VETRO GROSSO > 300µm																	
Tempo	Giorni	A	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	B	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	C	Calibro	Diff	Espan/Rit [µm/m]	Espan/Rit [%]	MEDIA
0	20-lug	3,580	5,500	1,920	0,000	0,000	3,730	5,500	1,770	0,000	0,000	3,910	5,500	1,590	0,000	0,000	0,000
1	21-lug	3,610	5,490	1,880	0,000	0,025	3,760	5,490	1,730	0,000	0,025	3,940	5,490	1,550	0,000	0,025	0,025
8	28-lug	3,610	5,500	1,890	0,000	0,019	3,755	5,500	1,745	0,000	0,016	3,940	5,500	1,560	0,000	0,019	0,018
15	04-ago	3,630	5,510	1,880	0,000	0,025	3,945	5,505	1,560	0,001	0,131	3,910	5,500	1,590	0,000	0,000	0,052
35	24-ago	3,635	5,490	1,855	0,000	0,041	3,780	5,490	1,710	0,000	0,037	3,910	5,490	1,580	0,000	0,006	0,028
38	27-ago	3,660	5,500	1,840	0,001	0,050	3,800	5,500	1,700	0,000	0,044	3,910	5,500	1,590	0,000	0,000	0,031
45	03-set	3,650	5,510	1,860	0,000	0,038	3,800	5,510	1,710	0,000	0,038	3,905	5,510	1,605	0,000	-0,009	0,022
49	07-set	3,665	5,510	1,845	0,000	0,047	3,800	5,505	1,705	0,000	0,041	3,900	5,510	1,610	0,000	-0,013	0,025

Tab. 2.14 - Letture con il micrometro della miscela con vero grosso e l'5% di compound innovativo in massa durante la prova normata

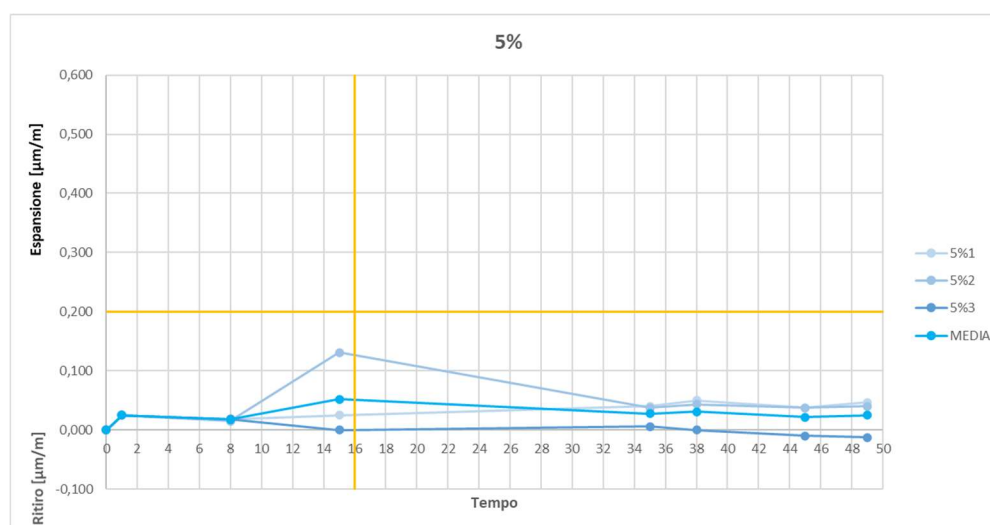


Fig. 2.38 - Grafico inerente alle letture dei provini con vetro grossolano e l'5% di compound in massa

I grafici sopra riportati sono stati confrontati tra loro attraverso le medie dei tre provini di ogni miscela. Inoltre, è stato preso come riferimento il grafico relativo alla miscela con il vetro grossolano sostituito al 70% della sabbia del Po.

Si riporta, dunque, il grafico per lo studio dell'efficienza del compound innovativo nella mitigazione della reazione alcali-aggregato.

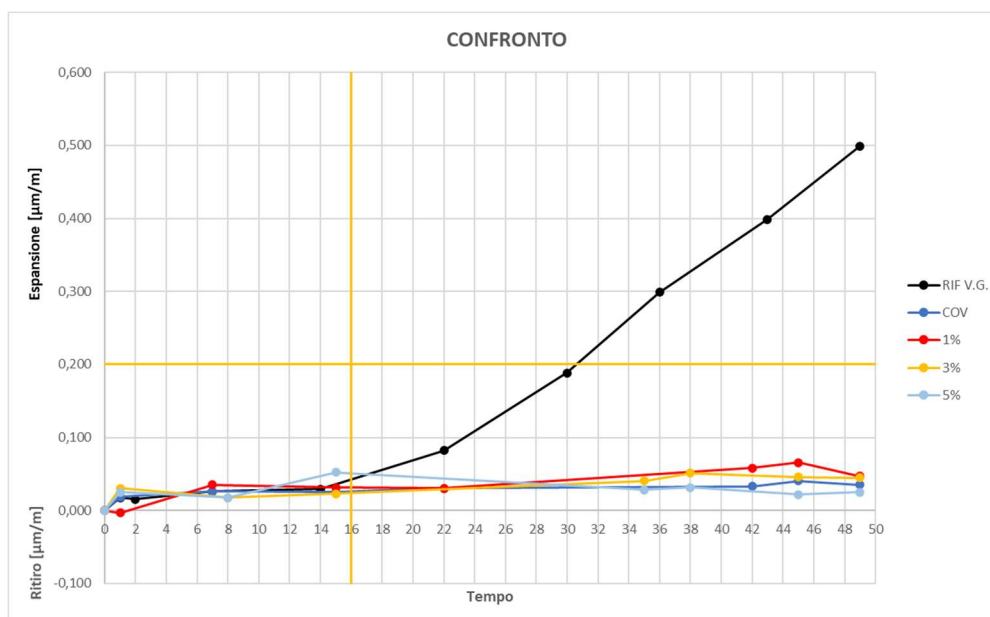


Fig. 2.39 – Grafico dell'andamento dei provini messi a confronto durante la prova

2.2.6 Risultati

I risultati ottenuti dalla seconda parte della sperimentazione, inerente alla capacità del compound innovativo di mitigare la reazione alcali-aggregato, dimostrano che i provini contenenti il prodotto liquido in massa alle varie concentrazioni e spennellato sulla superficie resistono allo stesso modo all'espansione provocata dalla reazione alcali-silice.

In particolare, si è notata una minima differenza tra i risultati in base al dosaggio del compound innovativo: i provini con vetro grossolano e con l'aggiunta del compound all'1% in massa, al termine della prova sperimentale, risultano ottenere un'espansione minima e poco maggiore rispetto agli altri provini. Segue la miscela con vetro grosso e il compound al 3% in massa. Infine, si hanno i provini con vetro grosso e il 5% in massa del formulato liquido ed i provini con il prodotto spennellato sulla superficie, che risultano avere un comportamento pressoché analogo.

Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di testare un prodotto innovativo multifunzione riguardo la capacità di inibire la corrosione delle barre di armatura e di mitigare la reazione alcali-aggregato.

La scheda tecnica del prodotto prevede l'applicazione in superficie in più strati, ma per avere un quadro generale più completo si è deciso di utilizzare il prodotto aggiunto in massa, in tre diversi dosaggi calcolati in percentuale rispetto al legante.

La prima parte della sperimentazione si è rivolta allo studio della capacità del compound innovativo di inibire la reazione di corrosione delle barre di armatura: i risultati dimostrano che il prodotto liquido, aggiunto in massa alle varie concentrazioni e spennellato sulla superficie dei provini in calcestruzzo, svolge un'azione di protezione riguardo l'innesco della corrosione da parte dei cloruri presenti nella soluzione 3,5% di NaCl utilizzata nelle fasi umide dello studio.

Il compound aggiunto in massa alle concentrazioni di 1% e 3% in massa sul quantitativo del cemento rallenta l'innesco della corrosione sulle armature, permettendo una protezione aggiuntiva delle barre di rispettivamente 4 e 7 cicli di esposizione alla soluzione salina, rispetto alle barre inglobate nella miscela di riferimento.

Nei provini con il compound in massa alla concentrazione di 5% e spennellato in quattro strati sulla superficie, le barre di armatura ottengono una resistenza all'innesco della corrosione confrontabile, arrivando ad una protezione dell'acciaio aggiuntiva di oltre i 9 cicli di bagno-asciuga, rispetto ai provini di riferimento. Pertanto, il compound innovativo applicato sulla superficie del calcestruzzo risulta avere un'efficacia paragonabile al prodotto aggiunto al 5% in massa nonostante l'utilizzo del 42% in meno di quantitativo del prodotto nei campioni spennellati.

La seconda parte della sperimentazione ha riguardato l'efficacia del prodotto di mitigare la reazione alcali-aggregato: i risultati dimostrano che i provini contenenti il prodotto liquido in massa alle varie concentrazioni e spennellato sulla superficie resistono all'espansione provocata dalla reazione alcali-silice. In ordine di espansione, con una minima differenza tra i risultati, si hanno i provini contenenti l'1% in massa di compound, a seguire i campioni con il prodotto in massa al 3%, i provini spennellati sulla superficie con il prodotto innovativo e i campioni contenenti il 5% in massa del formulato liquido.

Dall'osservazione e dalle analisi dei risultati ottenuti in entrambe le prove, si può affermare che il prodotto risponde correttamente ai requisiti di "inibizione della corrosione delle barre di armatura" e "mitigazione/annullamento della reazione alcali-aggregato".

Bibliografia

- ASTM C1260. (2014). Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).
- ASTM C490/C490M. (2017). Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete.
- ASTM C876. (2015). Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
- D.M. 26 marzo 1980. (1980, marzo 26). Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale, precompresso e per le strutture metalliche. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- D.M. 9 gennaio 1996. (1996, gennaio 9). Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- Decreto 17 gennaio 2018. (2018, gennaio 17). Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- F. Tittarelli, A. M. (2018). Corrosion behaviour of bare and galvanized steel in geopolymer and Ordinary Portland Cement based mortars with the same strength class exposed to chlorides. *Corrosion Science*.
- UNI 11104. (2016, luglio 14). Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- UNI 9858. (1991). Calcestruzzo. Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità.
- UNI 9944. (1992, febbraio 28). Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo.
- UNI EN 206. (2016, dicembre 1). Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- V. Corinaldesi, A. N. (2016). Reuse of recycled glass in mortar manufacturing. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.

Ringraziamenti