



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

**EFFETTO DELL'INGRESSO DEI CLORURI SULLE PROPRIETÀ DELLE
MISCELE ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED
CONCRETE**

**EFFECT OF CHLORIDE PENETRATION ON THE PROPERTIES OF ULTRA
HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE MIXTURES**

Relatore:

Prof. Valeria Corinaldesi

Tesi di laurea di:

Marianna Pistolesi

Anno Accademico 2020-2021

INDICE

| | |
|---|-----------|
| CAPITOLO 1 | 4 |
| Introduzione | 4 |
| 1.1 Motivazioni dello studio..... | 4 |
| 1.2 Obiettivi della tesi..... | 5 |
| CAPITOLO 2 | 7 |
| Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete | 7 |
| 2.1 Matrice cementizia | 7 |
| 2.2 Fibre..... | 9 |
| 2.3 Aggregati | 11 |
| 2.4 Additivi..... | 11 |
| 2.5 Fumo di silice | 13 |
| CAPITOLO 3 | 14 |
| Proprietà meccaniche e chimico-fisiche | 14 |
| 3.1 Comportamento meccanico | 14 |
| 3.2 Comportamento a compressione | 17 |
| 3.3 Comportamento ideale a trazione degli UHPFRC | 19 |
| 3.4 Durabilità del materiale | 20 |
| 3.4.1 Aggressione da cloruri..... | 21 |
| 3.4.2 Tempo di innesco della corrosione | 22 |
| 3.4.3 Modalità di penetrazione dei cloruri..... | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4.4 Assorbimento..... | 23 |
| 3.4.5 Permeazione | 23 |
| 3.5 Quadro normativo | 28 |
| CAPITOLO 4..... | 31 |
| Applicazioni sperimentali | 31 |
| 4.1 Generale..... | 31 |
| 4.2 Confezionamento dei provini | 31 |
| 4.2.1 Materiali utilizzati..... | 31 |
| 4.3 Mix design | 34 |
| 4.4 Fasi operative..... | 35 |
| 4.5 Classificazione dei provini | 37 |
| 4.6 Prove eseguite..... | 38 |
| 4.6.1 Prova a flessione..... | 38 |
| 4.6.2 Prova a compressione | 40 |
| 4.6.3 Prova colorimetrica per la determinazione della penetrabilità dello ione cloruro (UNI 7928) | 42 |
| 4.6.4 Analisi porosimetriche al mercurio | 44 |
| 4.6.5 Macroscopio ottico | 46 |
| CAPITOLO 5..... | 47 |
| Analisi dei risultati..... | 47 |
| 5.1 Risultati prova di flessione | 47 |
| 5.1.1 Provini 4x4x16 cm ³ | 47 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1.2 Discussione dei risultati..... | 58 |
| 5.2 Risultati prova di compressione 4x4x16 cm ³ | 59 |
| 5.2.1 Discussione dei risultati..... | 65 |
| 5.3 Risultati prova di compressione 10x10x10 cm ³ | 66 |
| 5.3.1 Discussione dei risultati..... | 68 |
| 5.4 Risultati prova colorimetrica per la determinazione della penetrabilità dello ione cloruro (UNI 7928)..... | 70 |
| 5.4.1 Discussione dei risultati..... | 76 |
| 5.5 Risultati analisi porosimetriche a mercurio | 77 |
| 5.5.1 Discussione dei risultati..... | 81 |
| 5.6 Risultati macroscopio ottico | 82 |
| 5.6.1 Discussione dei risultati..... | 84 |
| CAPITOLO 6..... | 85 |
| 6.1 Conclusioni..... | 85 |
| 6.2 Possibili lavori futuri | 86 |
| BIBLIOGRAFIA | 87 |

CAPITOLO 1

Introduzione

1.1 Motivazioni dello studio

Nel campo delle costruzioni, in questo momento, sono in atto delle grandi sfide a seguito delle numerose vicende che hanno visto come protagonista il crollo di strutture in calcestruzzo armato esistenti da molti anni ed anche di recente costruzione, basti pensare al ponte di Polcevera a Genova. Molte sono state le domande del tipo “ma perché queste strutture crollano?” oppure “perché gli edifici costruiti dai romani, soprattutto quelli in pietra, sono tutt’oggi in piedi e quelli in calcestruzzo crollano?”. Tali domande e molte altre hanno portato alla “perdita” di fiducia verso questo materiale, che per questo in molti casi viene sostituito o preferito a materiali come l’acciaio e il legno, perché considerati più durevoli e anche sostenibili.

Ma molti non sanno che tante possono essere le cause di questi crolli, come la qualità del materiale e quindi le mancate prove di accettazione da effettuare in corso d’opera; la mancata manutenzione richiesta nel corso della vita utile del materiale stesso e della struttura e l’applicazione di normative obsolete e non aggiornate, soprattutto al rischio sismico. Ad esempio, nel caso del ponte Morandi il problema è dovuto al fatto che negli anni ’60 si ignorava il concetto di durabilità delle opere in c.a. in relazione all’ambiente, oggi noto come “classe di esposizione”, infatti le cause del crollo si riconducono all’impiego di un mediocre calcestruzzo, molto poroso e facilmente penetrabile dagli agenti aggressivi ambientali; adozione di un copriferro di ridotto spessore che ha diminuito il tempo impiegato dagli agenti aggressivi di raggiungere i ferri di armatura e la presenza di un ambiente aggressivo per la vicinanza del mare e l’emissione di vapori aggressivi (CO₂ ed SO₂) ad alcune fabbriche vicine al ponte.

Quindi, con questa tesi si vuole “ridare” fiducia al calcestruzzo, un materiale protagonista della nostra storia passata e futura, analizzando tutti gli aspetti che lo caratterizzano in modo da poter far capire l’importanza che esso assume in fase di progettazione di un’opera civile, dalla scelta appropriata dei componenti alla progettazione del mix-design.

Inoltre, si vuole anche dimostrare che la ricerca tecnologica sui calcestruzzi così detti “innovativi” nasce e si sta evolvendo proprio per poter risolvere tutte quelle problematiche riscontrate con l’uso del calcestruzzo stesso nel tempo, ma soprattutto per garantire quella durabilità e sostenibilità ricercata negli altri materiali da costruzione. Infatti, la sfida di migliori prestazioni, dei ponti sempre più lunghi, degli edifici sempre più alti, delle strutture sempre più performanti, delle architetture sempre più futuriste ha fatto da motore per una ricerca senza sosta che ha portato a calcestruzzi al passo delle prestazioni richieste delle costruzioni del futuro.

Infine, uno sguardo è stato dato anche alla filiera produttiva, in cui si è osservato che da un lato, a causa di norme ambientali troppo restrittive, le materie prime (inerti) scarseggiano e dall’altro, anche se è presente la conoscenza dell’innovazione, la richiesta del “nuovo” materiale è ridotta e in alcuni casi è nulla. Questo in quanto, quello dell’edilizia, è un mercato ormai in crisi già da parecchi anni e che fatica a riprendersi, in cui tutt’oggi resiste la legge del “vince il prezzo più basso” senza dar importanza alla qualità del materiale.

1.2 Obiettivi della tesi

Questa tesi è focalizzata sullo studio della durabilità e sulla valutazione delle prestazioni meccaniche in ambiente salino sugli UHPFRC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete). Anche se non esistono precise definizioni tecniche in letteratura, il termine UHPFRC individua un materiale a matrice cementizia, con resistenza a compressione maggiore di 150 MPa contenente un certo quantitativo di fibre metalliche. L’aggiunta di tali fibre permette di migliorare il comportamento meccanico del composito, dando vita ad un nuovo materiale capace di lavorare non solo a compressione ma anche in piccola parte a trazione, ma soprattutto caratterizzato da una discreta duttilità ed una buona capacità plastica. Il comportamento meccanico di queste nuove miscele dovrebbe essere caratterizzato attentamente per sfruttare al meglio i vantaggi delle loro proprietà uniche nel campo del design strutturale, rendendo possibile la realizzazione di elementi strutturali più leggeri, durabili ed efficienti.

Il presente studio indaga sulla durabilità e sulla corrosione delle fibre metalliche all’interno della matrice cementizia e sulle prestazioni meccaniche in presenza di cloruri.

Sono stati eseguiti test di laboratorio, presso l'Università Politecnica delle Marche di Ancona, realizzando quarantotto provini in calcestruzzo di varie dimensioni, rinforzati con fibre. Abbiamo fatto una valutazione su provini immersi solo in acqua e in acqua e sale per verificare le eventuali differenze.

CAPITOLO 2

Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete

Dallo studio affrontato e dal confronto con la letteratura scientifica, è possibile definire gli UHPFRC come un materiale che presenta, rispetto ai calcestruzzi ordinari ed a quelli ad alta resistenza, proprietà decisamente superiori in termini di resistenza, durabilità e stabilità sul lungo periodo, derivati in gran parte dalle caratteristiche dei suoi principali componenti: la matrice cementizia e le fibre e dalla loro interazione. Tale miscela differisce in maniera sensibile da quella di un calcestruzzo convenzionale per la selezione degli aggregati, per l'alto contenuto di cemento e per il bassissimo rapporto a/c. Altre caratteristiche fondamentali degli UHPFRC oltre chiaramente all'introduzione nella miscela di fibre metalliche, sono: l'uso di additivi superfluidificanti per ottenere un grado di lavorabilità accettabile, l'utilizzo dei fumi di silice che grazie al loro ridotto diametro riescono a riempire i vuoti interstiziali presenti tra il cemento e gli aggregati così da ottenere una miscela estremamente compatta e densa.

2.1 Matrice cementizia

Esistono diversi tipi di cemento, differenti per composizione, proprietà di resistenza, durevolezza e destinazione d'uso. Dal punto di vista chimico, si tratta di una miscela di silicati e alluminati di calcio ottenuti dalla cottura di calcare, argilla e sabbia; il materiale risultante, finemente macinato, una volta miscelato con acqua si idrata e solidifica progressivamente. I cementi utilizzati per confezionare il conglomerato cementizio normale armato e precompresso devono essere conformi alla norma EN197-1 prospetto 1.

I cementi comuni sono divisi in cinque tipi principali:

- cemento Portland;
- cemento Portland composito;
- cemento d'altoforno.

Tabella 1 – Tabella tipi di cemento e composizione [EN 197-1]

Tabella 1.11 Prospetto 1 – Tipi di cemento e composizione. Percentuali in massa.

| Tipi principali | Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune) | | Composizione (percentuale in massa) ^{a)} | | | | | | | | | | Costituenti secondari | |
|--|--|--------------------------|---|--------------------|-----------------|------------|----------------------|----------------|-----------|------------------|---------|-------|-----------------------|-----|
| | | | Costituenti principali | | | | | | | | | | | |
| | | | Clinker | Loppa di altoforno | Fumi di silice | Pozzolana | | Ceneri volanti | | Scisto calcinato | Calcare | | | |
| | | | K | S | D ^{b)} | naturale P | naturale calcinata Q | silicea V | calcica W | T | L | LL | | |
| CEM I | Cemento Portland | CEM I | 95-100 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 0-5 |
| | Cemento Portland alla loppa | CEM II/A-S CEM II/B-S | 80-94 65-79 | 6-20 21-35 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 0-5 |
| CEM II | Cemento Portland ai fumi di silice | CEM II/A-D | 90-94 | – | 6-10 | – | – | – | – | – | – | – | – | 0-5 |
| | Cemento Portland alla pozzolana | CEM II/A-P | 80-94 | – | – | 6-20 | – | – | – | – | – | – | – | 0-5 |
| | | CEM II/B-P | 65-79 | – | – | 21-35 | – | – | – | – | – | – | – | 0-5 |
| | | CEM II/A-Q | 80-94 | – | – | – | 6-20 | – | – | – | – | – | – | 0-5 |
| | | CEM II/B-Q | 65-79 | – | – | – | 21-35 | – | – | – | – | – | – | 0-5 |
| | Cemento Portland alle ceneri volanti | CEM II/A-V | 80-94 | – | – | – | – | 6-20 | – | – | – | – | – | 0-5 |
| | | CEM II/B-V | 65-79 | – | – | – | – | 21-35 | – | – | – | – | – | 0-5 |
| | | CEM II/A-W | 80-94 | – | – | – | – | – | 6-20 | – | – | – | – | 0-5 |
| | | CEM II/B-W | 65-79 | – | – | – | – | – | 21-35 | – | – | – | – | 0-5 |
| | Cemento Portland allo scisto calcinato | CEM II/A-T | 80-94 | – | – | – | – | – | – | 6-20 | – | – | – | 0-5 |
| | | CEM II/B-T | 65-79 | – | – | – | – | – | – | 21-35 | – | – | – | 0-5 |
| | Cemento Portland al calcare | CEM II/A-L | 80-94 | – | – | – | – | – | – | – | 6-20 | – | – | 0-5 |
| | | CEM II/B-L | 65-79 | – | – | – | – | – | – | – | 21-35 | – | – | 0-5 |
| | | CEM II/A-LL | 80-94 | – | – | – | – | – | – | – | – | 6-20 | – | 0-5 |
| CEM II/B-LL | | 65-79 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 21-35 | 0-5 | |
| Cemento Portland composito ^{c)} | CEM II/A-M | 80-94 | 6-20 | | | | | | | | | | 0-5 | |
| | CEM II/B-M | 65-79 | 21-35 | | | | | | | | | | 0-5 | |
| CEM III | Cemento d'altoforno | CEM III/A | 35-64 | 36-65 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 0-5 |
| | | CEM III/B | 20-34 | 66-80 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 0-5 |
| | | CEM III/C | 5-19 | 81-95 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 0-5 |
| CEM IV | Cemento pozzolanico ^{c)} | CEM IV/A | 65-89 | – | 11-35 | | | | | – | – | – | 0-5 | |
| | | CEM IV/B | 45-64 | – | 36-55 | | | | | – | – | – | 0-5 | |
| CEM V | Cemento composito ^{c)} | CEM V/A | 40-64 | 18-30 | – | 18-30 | | | – | – | – | – | 0-5 | |
| | | CEM V/B | 20-38 | 31-50 | – | 31-50 | | | – | – | – | – | 0-5 | |

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.
b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%.
c) Nei cementi Portland compositi CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi compositi CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati nella denominazione del cemento (vedere esempio in B).

I cementi più idonei sono certamente quelli aventi una classe di resistenza a compressione in malta plastica di 52,5 Mpa. La scelta della corretta classe del cemento da impiegare nelle ricette deve essere considerata in funzioni di particolari specifiche o condizioni di getto, quali, ad esempio, la sezione dell'elemento strutturale, la tipologia di getto, mezzi di posa che saranno utilizzati. Insieme a tali esigenze che condizionano la scelta del legante e del mix design dei calcestruzzi ad alte prestazioni, si deve necessariamente ricordare che l'aumento del contenuto di cemento per il raggiungimento di bassi rapporti acqua/cemento, comporta un innalzamento della temperatura del calcestruzzo dovuto alla reazione di idratazione, esotermica, tra il cemento e l'acqua. L'aumento della temperatura del conglomerato cementizio, se non considerato nel momento dello studio della miscela, può provocare fenomeni di fessurazione di origine termica, compromettendo l'omogeneità e la monolicità del getto, con gravi ripercussioni sulla durabilità dei manufatti e con costosi interventi di riparazione.

Al fine di limitare questa problematica è consigliabile utilizzare un cemento a basso contenuto di celite (C3A). La celite o alluminato tricalcico, infatti, è uno dei costituenti mineralogici del cemento Portland ed è anche il composto caratterizzato dal maggior sviluppo di calore in assoluto.

2.2 Fibre

Esistono molti tipi di fibre, ognuno con caratteristiche e proprietà diverse.

In generale si può dire che la percentuale in volume di fibre nel conglomerato è relativamente bassa, e ciò permette di concludere che il modulo del composito non sia troppo differente da quello della matrice; l'allungamento a rottura invece è molto più elevato della deformazione a rottura della matrice.

Di seguito vengono elencate alcune importanti proprietà e parametri delle fibre:

geometria: le fibre vengono prodotte in diverse forme geometriche, tra le quali: prismatiche, irregolari, cilindriche, sagomate, multi-filamenti incollati;

diametro equivalente: per le fibre che non hanno sezione circolare o prismatica è utile determinare il “diametro equivalente”, cioè il diametro di una fibra cilindrica avente lo stesso peso per unità di lunghezza. Questo parametro è importante perché da esso dipende la rigidezza della fibra;

rapporto d'aspetto: è una misura della sottigliezza di una singola fibra. Consiste nel rapporto tra la lunghezza della fibra e il suo diametro equivalente. Anche questo parametro è direttamente legato alla rigidezza della fibra. L'efficacia del rinforzo fibroso è funzione del dosaggio e del rapporto d'aspetto. In merito al tenore di fibre questo deve essere tale da garantirne una presenza continua del fibrorinforzo all'interno della matrice cementizia.

Le varie norme prescrivono i seguenti dosaggi minimi:

istruzioni CNR-DT 204: percentuale volumetrica minima di fibre pari al 0,3%.

UNI 11039: dosaggio minimo di fibre di acciaio pari a 25 kg/m^3 (0,32% in volume).

Il parametro numerico correntemente impiegato per contraddistinguere una fibra è il rapporto d'aspetto definito come il rapporto tra la lunghezza della fibra e il suo diametro equivalente.

L'aderenza tra matrice cementizia e rinforzo fibroso, da cui dipende principalmente l'azione di cucitura delle fibre, è funzione del rapporto d'aspetto.

A parità di composizione e di dosaggio, l'efficacia delle fibre migliora al crescere del rapporto d'aspetto. Infatti, al crescere del rapporto d'aspetto cresce l'aderenza fra i due materiali e di conseguenza migliorano le prestazioni del rinforzo fibroso poiché le fibre

sollecitate a trazione tendono più difficilmente a sfilarsi. L'adesione alla matrice cementizia migliora anche in funzione della forma della fibra, tanto più è a contorno irregolare tanto più è efficace. A tal proposito le forme come le estremità piegate o uncinata, ondulate, ecc. consentono di massimizzare l'ancoraggio della fibra nella matrice.

L'azione di cucitura dipenderà anche dal numero di fibre che si disporranno a cavallo dei cigli fessurativi. Pertanto, riveste un ruolo importante nel comportamento del composito sia il dosaggio che la dispersione delle fibre nella matrice.

Ovviamente, maggiore il dosaggio, e più uniforme la dispersione, e più efficiente risulterà il rinforzo fibroso.

- resistenza: è la capacità di sopportare una determinata tensione;
- tenacità: è la quantità di energia dissipata per la creazione di una nuova superficie unitaria di frattura;
- concentrazione: è la percentuale in volume di fibre rispetto al volume totale del composito. È un valore importante che condiziona il processo di miscelazione tra fibre e matrice e il comportamento del materiale risultante.



Figura 2.2.1 – *Fibre in acciaio ottonate*

2.3 Aggregati

In base alle considerazioni già fatte, un calcestruzzo ad altissime prestazioni meccaniche presenta un meccanismo di frattura completamente differente rispetto ad un calcestruzzo ordinario dato che l'elemento debole della catena non è più la pasta cementizia bensì l'aggregato. A tal proposito, i materiali lapidei devono essere oggetto di particolari analisi, non solo in termini di curve granulometriche, ma anche di resistenza meccanica. Gli aggregati devono essere certamente conformi, con relativa certificazione CE, alla UNI EN 12620 (2013) e ai requisiti richiesti dalla UNI 8520-1 (2015) e UNI 8520-2 (2016), unitamente alla UNI 8520-22 (2017) per la verifica delle espansioni accelerate dei provini di calcestruzzo, dovute alla potenziale reattività tra gli alcali contenuti nel cemento e certe forme di silice reattive presenti negli aggregati.

È stato dimostrato (Kylyc et al., 2008) come varie tipologie di aggregato influenzino diversamente le caratteristiche meccaniche di un calcestruzzo ad altissime prestazioni. In particolare, confrontando più varietà di rocce (gabbro, basalto, quarzite, calcare, arenaria), si è visto che la resistenza a compressione del calcestruzzo cresce con il crescere di quella delle rocce e che gli aggregati con un alto valore di resistenza all'abrasione producono un calcestruzzo con alta resistenza all'abrasione. Dai test effettuati, la migliore resistenza a compressione è stata ottenuta per calcestruzzi realizzati con basalto, dato che la rottura avviene sia nella matrice cementizia sia nella roccia. I calcestruzzi realizzati con calcare ed arenaria presentano invece una resistenza equivalente a quella delle rocce per cui la rottura avviene nell'aggregato e non viene utilizzata al massimo la resistenza della pasta. Caso a parte per il calcestruzzo realizzato con la quarzite: data la superficie levigata, non vi è perfetta aderenza tra pasta ed aggregato e quindi la resistenza complessiva risulta essere inferiore sia alla resistenza dell'aggregato sia a quella della pasta.

2.4 Additivi

Il comportamento degli UHPC è funzione anche di altri parametri connessi alla natura degli aggregati presenti nella miscela: l'utilizzo combinato di aggregati di taglia differente migliora notevolmente le prestazioni di un UHPC rispetto all'uso di un solo componente (Park et al., 2008). Una delle combinazioni ottimali vede la presenza di 70% di polvere di quarzo dal diametro di 0,30-0,50 mm abbinata a 30% di sabbia dalle

dimensioni di 0,17-0,30 mm. Accanto all'uso di sabbie si è affiancato l'uso di polveri finissime (con dimensioni dei grani dell'ordine dei 13 μm) che fungono al pari dei SF (fumo di silice) nel ruolo di filler e allo stesso tempo non hanno reazioni chimiche con il cemento. I diametri ridotti degli aggregati permettono non solo una posa in opera più agevole, ma anche il raggiungimento di una ottima omogeneità del calcestruzzo all'interno dei getti, evitando eventuali fenomeni di "blocking" nei punti più critici nelle sezioni dell'elemento strutturale, dove l'attraversamento del conglomerato tra i ferri d'armatura potrebbe portare ad una segregazione del calcestruzzo.

È stato già detto che per lo sviluppo degli UHPC e più in generale degli RPC hanno giocato un ruolo determinante, dagli anni Settanta in poi, la nascita e l'utilizzo dei fluidificanti e superfluidificanti. Questi sono additivi in grado di mantenere basso il rapporto a/c ed alta la lavorabilità del composto senza intaccare la composizione granulometrica della miscela. Il loro impiego è stato necessario a seguito dell'aggiunta dei fumi di silice all'interno della miscela che vanno ad aumentare la richiesta d'acqua a causa delle dimensioni finissime e dell'elevata area superficiale.

I superfluidificanti sono polimeri idrosolubili, per lo più poli-naftalen-solfonati, poli-melammin-solfonati, poli-carbossilati o poli-acrilici. Il loro principale effetto è quello deflocculante nei confronti dei granuli di cemento dispersi nel mezzo acquoso. I superfluidificanti migliorano la dispersione delle particelle solide attraverso due diversi fenomeni: per repulsione elettrostatica o per allontanamento grazie alla presenza di rami laterali della molecola che costituiscono una sorta di ingombro sterico nella matrice cementizia.

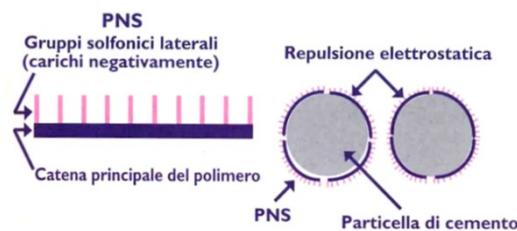


Figura 2.4.1 – Repulsione elettrostatica

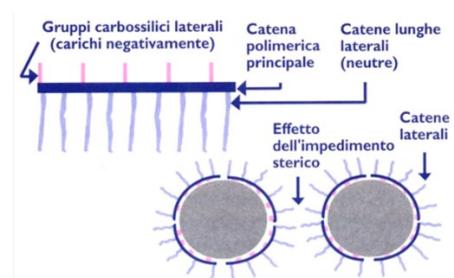


Figura 2.4.2 – Impedimento sterico

2.5 Fumo di silice

Molti dei vantaggi degli UHPC sono dovuti alla presenza nella matrice cementizia dei fumi di silice (Silica Fume, SF). Il fumo di silice si presenta come silice amorfa in forma di microsferiche più piccole di $0,1 \mu\text{m}$. Il ruolo che svolge nella matrice cementizia può essere sintetizzato secondo tre processi di tipo fisico-chimico (Siddique, 2011):

- riduzione della dimensione dei pori e densificazione della matrice: le microparticelle grazie alla loro struttura amorfa riempiono i vuoti interstiziali tra i granuli di cemento, aumentando la densità e migliorando l'aderenza dei vari componenti (filler effect);
- reazione con la calce libera, creando gel di C-S-H maggiormente resistente;
- miglioramento della zona di interfaccia tra pasta di cemento e aggregati.

Allo stesso tempo però, data l'elevata finezza del fumo di silice, ad esso corrisponde anche un'elevatissima area superficiale che tende a richiedere un aumento dell'acqua di impasto che è necessario compensare con un maggiore dosaggio di additivi superfluidificanti.



Figura 2.5.1 – *Fumo di silice*

CAPITOLO 3

Proprietà meccaniche e chimico-fisiche

3.1 Comportamento meccanico

La presenza di un certo numero di fibre in una matrice cementizia può favorire l'effetto di bridging, ovvero la trasmissione della tensione attraverso una fessura, nelle microfessure, provocando anche un aumento della resistenza massima del composito. Lo sviluppo e l'aumento di dimensioni delle fessure chiama in gioco l'ausilio di fibre più lunghe per poter ottenere il fenomeno di bridging, e questo può essere alla base dell'arresto della propagazione delle fessure nel materiale.

Come si vede dalla figura 3.1.1 combinando fibre di varie dimensioni nel conglomerato fibrorinforzato si può ottenere un aumento nella resistenza massima, oltre al raggiungimento di una tenacità post picco.

In generale si può affermare che la vicinanza tra le fibre in un FRC è ciò che è richiesto per garantire che l'avanzamento della propagazione della frattura venga bloccato o comunque fortemente rallentato. Ciò è legato alla probabilità che ulteriori somministrazioni di energia al materiale riescano ad essere assorbite oppure reindirizzate in altre zone. La matrice cementizia stessa fino ad un valore non troppo elevato dell'apertura della fessura continua a trasferire il carico.

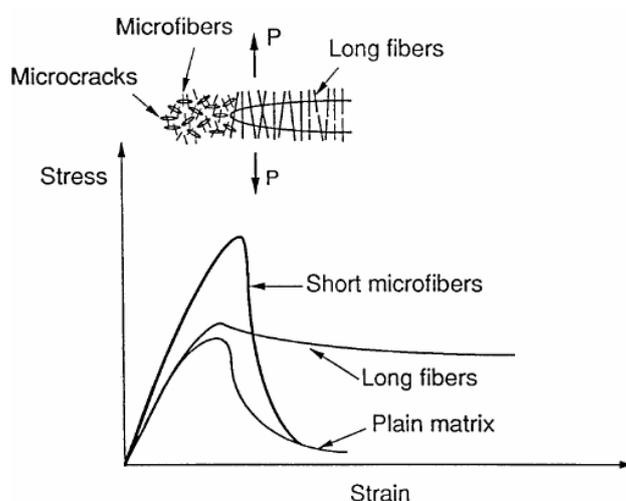


Figura 3.1.1 - *Differenti misure delle fibre e loro comportamento nel*

grafico sfozo-deformazione

Come già notato, l'efficienza delle fibre è direttamente collegata all'ancoraggio delle stesse con la matrice cementizia e la potenzialità di assorbire energia è correlata al numero di fibre presenti, alla loro superficie specifica e alla loro orientazione. La superficie specifica delle fibre invece è un parametro legato alla quantità di energia assorbita nel momento in cui una frattura incontra una fibra. Alla luce di questo la matrice, tipicamente fragile, può essere migliorata con l'aggiunta di fibre per assicurare una certa tenacità post fessurativa.

La figura successiva (fig. 3.1.2) mostra i modi nei quali le fibre entrano in gioco per assorbire energia e per controllare l'aumento della fessura. Sono rappresentati la rottura della fibra (fenomeno non frequente), il pull-out della fibra, il fenomeno di bridging, ovvero il passaggio della tensione da un lato all'altro della fessura, e infine il fenomeno del distacco tra fibra e matrice.

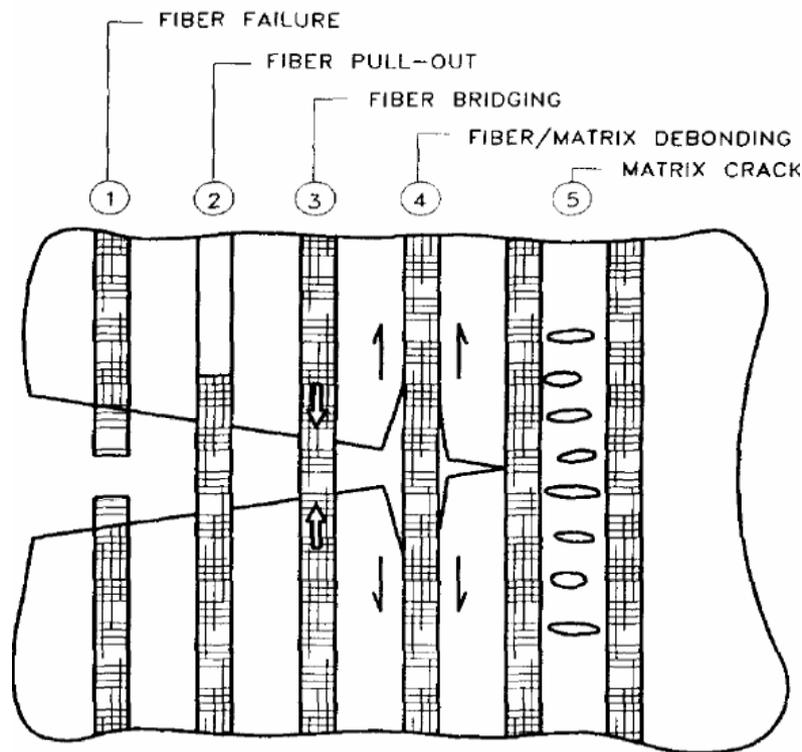


Figura 3.1.2 - Metodi di assorbimento di energia da parte delle fibre

Nella pratica però un calcestruzzo fibrato contiene fibre casualmente distribuite in due o tre dimensioni. Quindi molte delle fibre che intersecano una fessura possono

essere inclinate rispetto ad essa (fig. 3.1.3). Quindi, quando si considerano fenomeni quali bridging o pull-out, devono essere tenute presenti anche restrizioni geometriche che inducono una flessione locale della fibra.

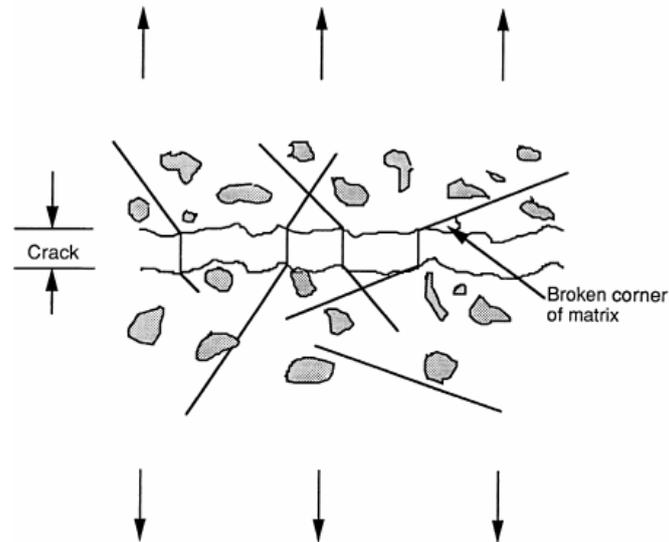


Figura 3.1.3 - *Inclinazione delle fibre rispetto alla fessura.*

Come si è detto, quando si forma una fessura nel materiale composito le fibre che la attraversano normalmente non si spezzano, ma continuano a resistere ulteriormente anche al progredire dell'apertura grazie al fenomeno di bridging. L'efficacia di questo fenomeno va ad influenzare i vari modi di rottura del materiale. Se le fibre si rompono o si estraggono durante la fase iniziale della formazione della prima fessura, o se dopo il suo sviluppo le fibre non riescono più a trasferire lo sforzo, allora la resistenza di prima fessurazione corrisponde alla resistenza ultima. In questo caso la deformazione successiva del materiale è influenzata dallo sviluppo di questa fessura. Questo comportamento è noto come "softening", o comportamento degradante (figura 3.1.4 a). Se, diversamente, le fibre sono in grado di sopportare ulteriore carico dopo la formazione della prima fessura allora si formeranno altre fratture. Questo fenomeno di fessurazione multipla permette al materiale di possedere un comportamento "hardening", detto anche incrudente (figura 3.1.4 b), con conseguente aumento notevole dell'energia assorbita e, quindi, della duttilità.

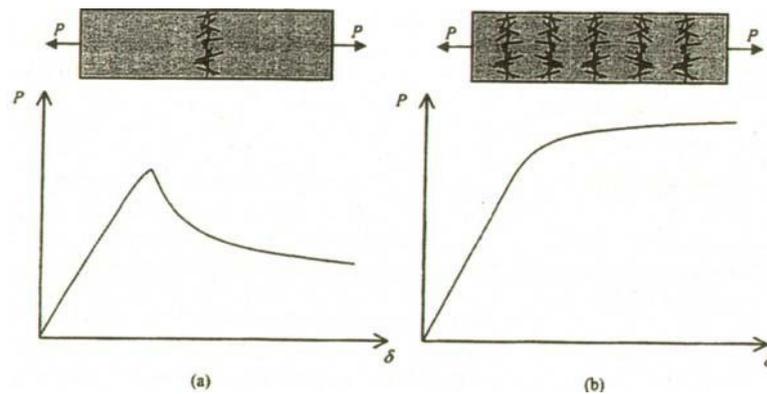


Figura 3.1.4 - Comportamento softening (a) e hardening (b)

3.2 Comportamento a compressione

Le prestazioni meccaniche a compressione di un UHPC discendono dal miglioramento della microstruttura della matrice cementizia ed è quindi opportuno a tal proposito analizzare dapprima il comportamento meccanico di un UHPC senza fibre che presenta già delle differenze notevoli rispetto ai calcestruzzi ordinari e a quelli ad alta resistenza. Infatti, un UHPC senza fibre è in grado di garantire una resistenza a compressione a 28 giorni pari o superiore ai 150 MPa, presentando un'elevata rigidità che è funzione di valori del modulo elastico prossimi talvolta ai 75 GPa contro i 30 di una pasta cementizia ordinaria.

Il legame sforzo deformazione dei calcestruzzi UHPC (Figura 3.2.1) in compressione uniaassiale si caratterizza per un comportamento che, al crescere della resistenza ultima, si presenta sempre più elasto-fragile.

In particolare:

- il legame si presenta sempre più elastico lineare, fino a circa l'80 % della tensione di rottura;

- il ramo post-picco è sempre meno pronunciato, fino ad annullarsi per resistenze molto alte

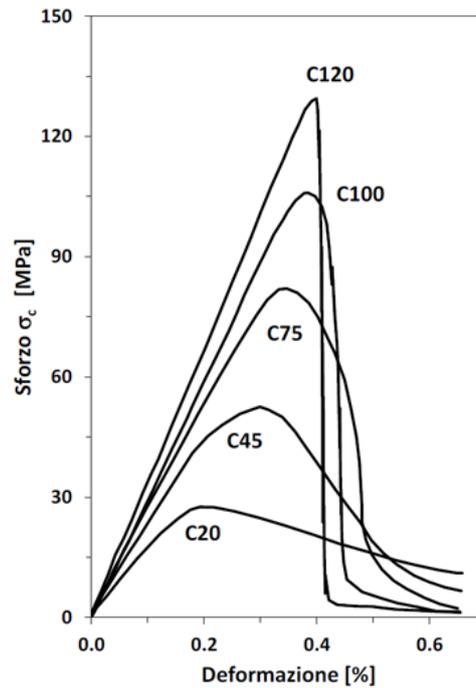


Figura 3.2.1 - *Legame sforzo deformazione in compressione uniassiale per diverse classi di calcestruzzo*

Rispetto ai calcestruzzi ordinari, la principale differenza risiede in un ritardo nel raggiungere la microfessurazione all'interfaccia tra pasta cementizia e aggregati che, per effetto del ridotto fenomeno di bleeding nei calcestruzzi UHPC rispetto ai calcestruzzi ordinari, è meno porosa e quindi più resistente. La fessurazione nei calcestruzzi ordinari, invece data la concentrazione di sforzi proprio all'interfaccia pasta-aggregato, dà luogo ad una microfessurazione più pronunciata che a sua volta si traduce in un importante ramo post-picco.

L'aggiunta di fibre non modifica sostanzialmente il ramo ascendente ma, aumenta la duttilità del materiale, riducendo il comportamento fragile, determina la comparsa di un ramo discendente post-picco, la cui inclinazione dipende da numerosi fattori (Fehling et al., 2004), tra i quali:

- il contenuto di fibre;
- il fattore di forma (geometria delle fibre);

- la lunghezza delle fibre in relazione alla dimensione massima dell'aggregato;
 - l'orientamento delle fibre.

In linea generale, i risultati di test sperimentali presenti in letteratura dimostrano che l'influenza delle fibre sul valore della resistenza a compressione è bassa. Lo stesso CNR 204/2006 afferma che nella pratica, il legame costitutivo del calcestruzzo fibrorinforzato ed in particolare la sua resistenza a compressione

3.3 Comportamento ideale a trazione degli UHPFRC

Da numerose evidenze sperimentali è stato dimostrato che la resistenza a trazione diretta per UHPC senza fibre presenta valori compresi tra 7-10 MPa e che la rottura è piuttosto fragile, non presentando un significativo ramo discendente (Fehling et al., 2004).

Le fibre vengono aggiunte alla matrice cementizia non tanto per migliorare la tensione di prima fessurazione quanto per migliorare il comportamento post-fessurativo del composito. Il CNR 204/2006 afferma che la resistenza a trazione uniassiale di prima fessurazione del conglomerato fibrorinforzato può essere assunta pari a quella della matrice. Tuttavia, l'aggiunta delle fibre, relazionata alla loro quantità, tipologia ed orientamento, aumenta sensibilmente i valori della resistenza a trazione (fino a 15 MPa).

In Figura 6 è riportata una curva ideale, sforzo-deformazione, di un UHPFRC additivato con un elevato contenuto di fibre, sottoposto a carico di trazione uniassiale. In base alla definizione riportata in letteratura (Naaman and Reinhardt, 2003), il materiale ha comportamento incrudente positivo (strain hardening) poiché la resistenza a trazione, σ_{pc} , è maggiore dello sforzo di prima fessurazione σ_{cc} .

L'approccio ideale (Figura 3.3.1) distingue il comportamento a trazione in tre differenti rami:

Parte 1: ramo elastico, esteso dall'origine fino al valore σ_{cc} , definito come un punto fittizio che divide il comportamento elastico lineare iniziale dal comportamento plastico successivo.

Parte 2: “ramo di hardening” che si estende dal valore σ_{cc} fino al valore di resistenza a trazione σ_{pc} . Tale tratto è caratterizzato dall'aumento dello sforzo σ all'aumentare della deformazione ε .

Parte 3: “ramo di softening” avente andamento discendente fino all'annullarsi dello

sforzamento σ , possono essere assimilati a quelli del materiale non rinforzato.

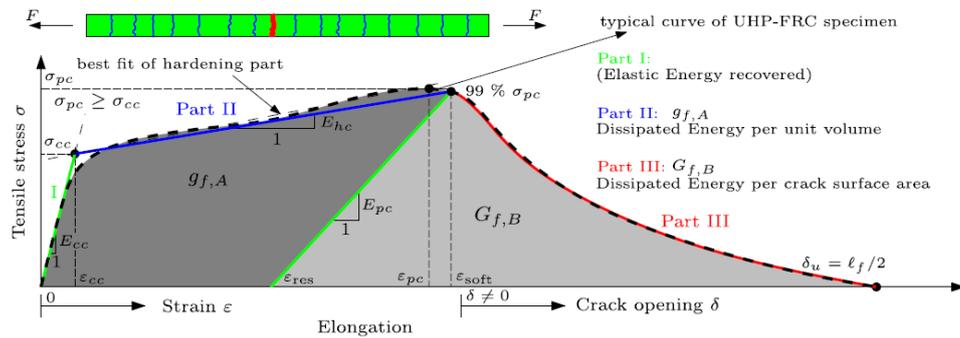


Figura 3.3.1 - Comportamento ideale, incrudente positivo di un UHPFRC sottoposto a carico di trazione (Wille and Naaman 2013)

Secondo il modello ideale, nella parte 2, si verifica la multi-fessurazione della matrice. Nonostante ciò, le fibre sono in grado di manifestare il proprio contributo (effetto bridging), conferendo al composito una resistenza post-fessurativa, praticamente assente nella matrice senza fibre. Nella parte 3 si assiste allo sviluppo di una macro-fessura localizzata fino a rottura del materiale. Così come per il comportamento a flessione, anche quello a trazione uni-assiale è fortemente influenzato dall'orientamento e dalla quantità di fibre contenute dalla matrice: più le fibre sono ortogonali alla direzione di propagazione della fessura, maggiore è la duttilità e la capacità portante ultima del materiale.

3.4 Durabilità del materiale

I calcestruzzi ad altissime prestazioni sono caratterizzati da una struttura interna altamente compatta, in cui la porosità del materiale è ottimizzata attraverso specifici accorgimenti del mix design, quali la scelta di un superfluidificante ad alta efficacia per ridurre il tenore di acqua, l'impiego di un elevato volume di finissimi, come filler calcarei e fumi di silice che riempiono i vuoti creati dalle particelle di clinker di dimensioni maggiori, e conferiscono un'ottima fluidità al conglomerato. La bassa porosità dei calcestruzzi UHPC è dunque un sinonimo di alte prestazioni, ovvero elevata resistenza a compressione, ma anche elevata durabilità, conseguenza diretta della scarsa permeabilità della struttura agli agenti aggressivi. Nonostante ciò, è opportuno ricordare che i primi utilizzi degli UHPC risalgono ai tardi anni Ottanta ed ai primi anni Novanta, il che

significa che non è passato tempo sufficiente per stimare la reale vita di esercizio delle strutture in calcestruzzo ad elevate prestazioni sotto condizioni esterne. Sicuramente l'esperienza fatta con i calcestruzzi ordinari ci informa che la durabilità del calcestruzzo è governata, in larga parte, dalla permeabilità del materiale, dunque possiamo affermare con sicurezza che l'UHPC è un materiale più duraturo.

Per quanto riguarda l'effetto dell'aggiunta di fibre nel calcestruzzo, come riporta il CNR 204/2006, allo stato attuale delle conoscenze non è ben noto l'effetto del rinforzo fibroso sui fenomeni diffusivi nel calcestruzzo, quali ad esempio penetrazione di ioni aggressivi o carbonatazione.

3.4.1 Aggressione da cloruri

L'aggressione da parte dei cloruri sul calcestruzzo può avvenire se questo rimane a contatto con ambienti in cui il contenuto è significativo, come l'acqua marina o i sali disgelanti, oppure se confezionato con materie prime inquinate. Il cloruro una volta penetrato nel calcestruzzo, se raggiunge i ferri d'armatura elimina il film passivante di ossido ferrico lasciandoli così esposti al processo di corrosione. La penetrazione ha inizio sulla superficie per poi proseguire all'interno del calcestruzzo; il tempo di penetrazione dipende da:

- Concentrazione di cloruri che entrano in contatto con la superficie del calcestruzzo;
- Permeabilità del calcestruzzo;
- Percentuale di umidità presente.

La corrosione avviene con la combinazione di due fattori, entrambi necessari. La presenza di cloruri, che depassivano i ferri e l'umidità unita all'ossigeno. Ad esempio, una struttura completamente immersa nell'acqua marina presenterà un contenuto di cloruri sicuramente molto alto, ma avendo le porosità totalmente sature di umidità, l'ossigeno non riuscirà a penetrare e di conseguenza la corrosione dei ferri non avverrà o sarà trascurabile. Considerando sempre una struttura realizzata nell'acqua di mare, la zona che sarà più interessata dal degrado dovuto ai cloruri è la splash-zone, cioè quella che a causa del moto ondoso o delle maree è periodicamente bagnata e asciutta. Per quanto riguarda i sali disgelanti, questi vengono stesi sul manto stradale nei periodi invernali, e grazie

all'acqua piovana penetrano nella struttura, creando corrosione e quindi degrado.

Una volta innescato il processo fessurativo la corrosione diventa più veloce in quanto trova vie di accesso più facili. La concentrazione di cloruri necessaria a promuovere la corrosione dei ferri è direttamente proporzionale al pH del calcestruzzo, più è alcalino più cloruro è necessario per innescare il processo.



Figura 3.4.1.1 - *Corrosione dei ferri nelle zone esposte agli spruzzi dell'acqua*

3.4.2 Tempo di innesco della corrosione

Per tempo di innesco della corrosione indotta da cloruri si intende il tempo necessario per superare la soglia critica dei cloruri all'interno del cemento, in particolare in corrispondenza della barra d'armatura. Questo tempo sarà funzione della concentrazione di cloruri sulla superficie esterna e all'interno della matrice cementizia, dallo spessore del copriferro e dalle proprietà del cemento.

3.4.3 Modalità di penetrazione dei cloruri

La penetrazione del cloruro nel calcestruzzo avviene o per diffusione o attraverso una combinazione di processi diffusivi-convettivi. La penetrazione è accompagnata dalla combinazione dei cloruri con i composti idratati del cemento. La diffusione è normalmente il meccanismo di trasporto principale per i cloruri, specialmente nel calcestruzzo saturo d'acqua. Questo spiega perché molti dei modelli sulla penetrazione dei cloruri focalizzano la loro attenzione sui meccanismi di diffusione per predire la distribuzione del cloruro nel copriferro del calcestruzzo. La complessità della

modellazione di altri meccanismi di trasporto è naturalmente la principale ragione per cui essi vengono trascurati. La penetrazione del cloruro mediante convezione è dovuta al movimento dell'acqua nel calcestruzzo. Il termine convezione è usato per indicare che il cloruro penetra con l'acqua che si muove. Alcuni meccanismi sono responsabili del trasporto del cloruro per convezione.

Questi includono:

- l'assorbimento;
- la permeazione;
- l'aspirazione;
- la combinazione del cloruro con la matrice cementizia.

3.4.4 Assorbimento

L'acqua può essere assorbita dai pori sulla superficie del calcestruzzo per effetto di forze capillari. Queste forze aumentano al diminuire delle dimensioni del poro e della viscosità del liquido.

La superficie del calcestruzzo non è idrorepellente, quindi l'angolo di contatto tra il liquido e le pareti del poro è basso e può avvenire la risalita capillare.

Si può valutare sperimentalmente il volume di liquido assorbito per unità di area bagnata i (mm^3/mm^2) nel tempo con la seguente formula:

$$i = S \cdot \sqrt{t}$$

S è espressa in $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ e varia tra 0.1 per calcestruzzi poco porosi, come quelli ad alta resistenza, e 0.3 per calcestruzzi molto porosi.

3.4.5 Permeazione

La permeazione è dovuta ad un gradiente di pressione. Il flusso di un liquido attraverso un elemento di sezione A e spessore L segue la legge di Darcy:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{K \cdot \Delta P \cdot A}{L \cdot \mu}$$

in cui μ è la viscosità del fluido (Ns/m²), $\Delta P/L$ è il gradiente di pressione (Pa/m), K è il coefficiente di permeabilità intrinseco del materiale (m²).

La permeabilità della pasta cementizia dipende dalla porosità capillare, quindi il coefficiente di permeabilità diminuisce al diminuire del rapporto a/c e all'aumentare della maturazione.

3.4.6 Aspirazione

Fenomeno che avviene soprattutto nelle fondazioni, rivestimenti di tunnel, quando una faccia di calcestruzzo è a contatto con l'acqua mentre l'altra è asciutta, si innesca uno spostamento di ioni dalla prima alla seconda faccia.

3.4.7 Combinazione

Il fenomeno riguarda la combinazione dello ione cloruro con la matrice cementizia. In questo caso gli ioni di Cl⁻ si combinano, mentre i componenti responsabili della corrosione sono solo gli ioni liberi, quindi non contribuiscono al raggiungimento della soglia critica, aumentando dunque il tempo di innesco.

3.4.8 Diffusione

Il fenomeno di diffusione costituisce il principale meccanismo di penetrazione dei cloruri. La causa del trasporto per diffusione è un gradiente di concentrazione: una sostanza diffonde attraverso i pori da una zona in cui è presente in concentrazione più elevata, nel caso in esame la superficie del materiale, ad una in cui la sua concentrazione inferiore.

Per descrivere il fenomeno in maniera quantitativa si fa riferimento alle formulazioni proposte da Fick.

La prima legge di Fick, che descrive la diffusione stazionaria unidirezionale, è la

seguinte:

$$F = -D \frac{dC}{dx}$$

in cui C è la concentrazione della specie che diffonde (kg/m^3), D è il coefficiente di diffusione per la specie considerata (m^2/s) ed F ($\text{kg/m}^2\text{s}$) è il flusso, costante nel tempo.

La diffusione dei gas è favorita nei pori contenenti aria, mentre la diffusione degli ioni può avvenire solamente per mezzo dell'acqua nei pori.

Tuttavia, il fenomeno, così come avviene in una struttura reale, oltre ad essere dipendente da vari fattori legati al materiale e all'ambiente, non si può considerare costante nel tempo.

Risulta fondamentale quindi considerare un flusso unidirezionale non stazionario descritto tramite la seconda legge di Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Assumendo che la concentrazione della specie che diffonde rimanga costante nel tempo sulla superficie (forzante esterna $C = C_s$) e che anche D sia una proprietà del materiale costante nel tempo, ipotizzando che all'inizio il materiale non contenga la specie che diffonde, ovvero imponendo come condizioni al contorno: $C=0$, $t=0$, si può ottenere la soluzione:

$$\frac{C}{C_s} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right)$$

Questa soluzione può essere anche utilizzata per stimare il coefficiente di diffusione dei cloruri adattando il profilo teorico ai risultati di prove sperimentali su campioni estratti da strutture esposte ai cloruri.

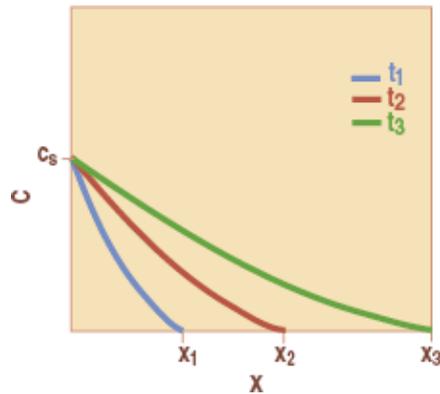


Figura 3.4.8.1 - Profilo della concentrazione di cloruro (c) in funzione dello spessore di calcestruzzo (x) a vari tempi di esposizione ($t_1 < t_2 < t_3$); C_s è la concentrazione (costante) del cloruro nell'acqua a contatto con la superficie del calcestruzzo.

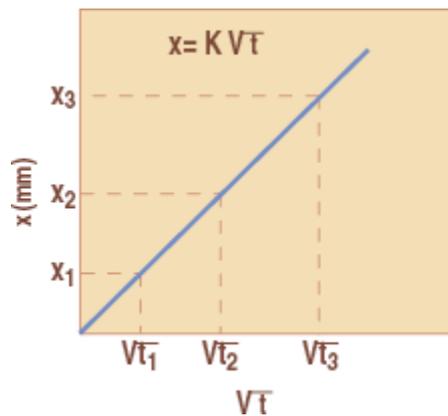


Figura 3.4.8.2- Spessore di calcestruzzo penetrato dal cloruro (x) in funzione del tempo (t) di esposizione alla soluzione di cloruro.

È stato dimostrato (M. Collepardi, A. Marcialis, R. Turriziani, "Penetration of chloride ions in cement pastes and in concretes", Journal of American Ceramic Society, 55, pp. 534-535, 1972), che il valore di K , è correlabile con il coefficiente di diffusione (D) del cloruro che appare nella soluzione della seconda legge di Fick:

$$x = K \cdot t^{1/2} = 4(Dt)^{1/2}$$

In altre parole, il coefficiente angolare (K) della retta della precedente Figura 3.4.8.2 calcolato con qualche determinazione di penetrazione (x) del cloruro a tempi vari (t)

mediante il saggio colorimetrico con nitrato d'argento e fluoresceina – consente di calcolare molto semplicemente il coefficiente di diffusione (D) mediante la l'equazione:

$$D=K^2/16$$

I valori dei coefficienti di diffusione D hanno un qualche significato se determinati su calcestruzzi saturi di umidità e ben stagionati (almeno 1-2 mesi) prima dell'esposizione alla penetrazione del cloruro, in modo tale che si possa ragionevolmente assumere che, dopo questa stagionatura (specialmente se il rapporto a/c è elevato: > 0,50), la qualità del calcestruzzo, ed in particolare la sua porosità capillare, non vari apprezzabilmente durante il tempo della diffusione del cloruro. Se, invece, il calcestruzzo è esposto alla penetrazione dei cloruri dopo pochi giorni di stagionatura, il coefficiente di diffusione varia (diminuendo) man mano che il cloruro avanza nel calcestruzzo a seguito della diminuzione di porosità capillare associata all'aumento del grado di idratazione del cemento (S. Monosi, G. Moriconi, I. Alverà and M. Collepardi, "Effect of water/cement ratio and curing time on chloride penetration into concrete", International Conference on Engineering Material 88, Bologna, giugno,1988). L'aggiunta di pozzolana in forma di cenere volante o fumo di silice (circa 60 kg/m³), al calcestruzzo con a/c eguale a 0,44 e dosaggio di cemento eguale a 400 kg/m³ provoca una ulteriore riduzione della penetrazione dei cloruri.

Tabella 2 – Coefficienti di diffusione del cloruro forniti da Collepardi

| Cemento | Grado di compattazione | Temperatura °C | D mm ² /anno |
|---------------------|------------------------|----------------|-------------------------|
| Portland CEM I | 1,00 | 10 | 25 |
| Portland CEM I | 1,00 | 25 | 50 |
| Portland CEM I | 1,00 | 40 | 100 |
| Portland CEM I | 0,95 | 25 | 100 |
| pozzolanico CEM IV | 1,00 | 10 | 20 |
| pozzolanico CEM IV | 1,00 | 25 | 30 |
| pozzolanico CEM IV | 1,00 | 40 | 40 |
| pozzolanico CEM IV | 0,95 | 25 | 60 |
| d'altoforno CEM III | 1,00 | 25 | 20 |
| d'altoforno CEM III | 0,95 | 25 | 50 |

* con a/c=0,40 i valori di D sono di un ordine di grandezza minore

3.5 Quadro normativo

Dal punto di vista normativo il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) è una delle novità più interessanti introdotte dal D.M. 17/01/2018, il quale assegna finalmente a questo materiale lo status di “materiale da costruzione” da impiegare in usi strutturali. L’uscita della Circolare n.7 del 21/01/2019 “Istruzioni per l’applicazione dell’Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni” di cui al decreto ministeriale 17 Gennaio 2018, introduce altre importanti novità, citando al C11.2.12: Le NTC definiscono il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) come “caratterizzato dalla presenza di fibre discontinue nella matrice cementizia” e stabiliscono che sia per la sua qualificazione che per la progettazione delle strutture in FRC, si dovrà fare esclusivo riferimento a specifiche disposizioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, rese attraverso apposite Linee Guida. Al riguardo occorre precisare che secondo le dizioni comunemente adottate nel settore della tecnologia delle costruzioni, un calcestruzzo fibrorinforzato ad uso strutturale, per essere definito tale, deve essere caratterizzato da un dosaggio minimo delle fibre al suo interno. Le norme CNR-DT204/2006 “Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato”, indicano che “per impieghi strutturali deve essere garantito un dosaggio minimo di fibre” e quantificano tale dosaggio come “non inferiore allo 0,3% in volume”.

Recentemente è stato approvato il testo della “Linea Guida per la identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)”. Innanzitutto, tale norma specifica che un calcestruzzo fibrorinforzato ad uso strutturale, per essere definito tale, deve essere caratterizzato sia da un dosaggio minimo delle fibre al suo interno “non inferiore allo 0,3% in volume”, sia da requisiti minimi prestazionali.

In merito al tipo di fibre che possono essere utilizzate, queste devono essere marcate CE, in accordo con le norme europee armonizzate EN 14889-1 (per le fibre d’acciaio) ed EN 14889-2 (per le fibre polimeriche). La normativa specifica, inoltre, quali sono i parametri che devono caratterizzare le fibre.

Tabella 3 - Parametri da riportare sulla confezione delle fibre

| Fibre di acciaio | Fibre polimeriche |
|--|---|
| Lunghezza [mm] | Polimero |
| Diametro equivalente [mm] | Lunghezza [mm] |
| Rapporto d'aspetto | Diametro equivalente [mm] |
| Forma | Rapporto d'aspetto |
| Resistenza a trazione ^(*) [MPa] | Forma |
| Modulo elastico ^(*) [GPa] | Resistenza a trazione ^(*) [MPa] |
| Allungamento a rottura ^(*) [%] | Modulo elastico ^(*) [GPa] |
| Densità [kg/m ³] | Allungamento a rottura ^(*) [%] |
| | Massa volumica lineare [tex] |
| | Temperatura di transizione vetrosa e di fusione ^(**) |

Un'altra novità riguarda il fatto che le Linee Guida ammettono che il comportamento post-fessurativo in trazione uniassiale possa essere diverso dal comportamento post-fessurativo in una prova di flessione. Per lo stesso motivo la capacità redistributiva della struttura può garantire una risposta meccanica incrudente a partire da un comportamento in trazione uniassiale degradante, come esemplificato in Figura 3.5.1.

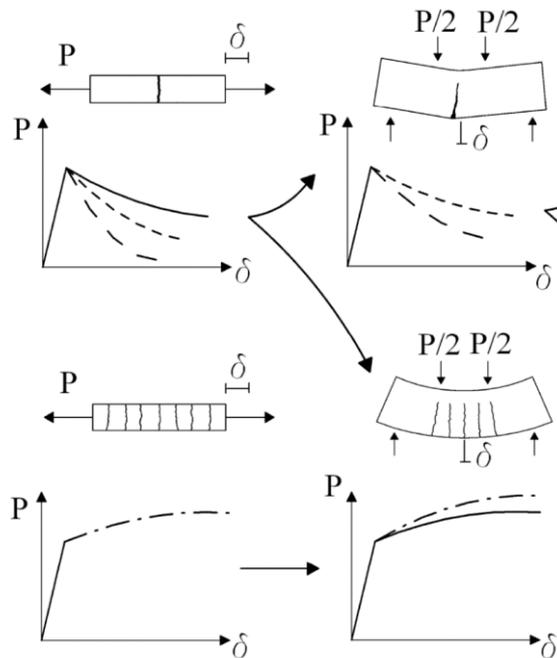


Figura 3.5.1 - Risposta meccanica di strutture caratterizzate da capacità redistributive differenti: trazione uniassiale e flessione

La prova che la normativa ha preso come riferimento per la caratterizzazione del materiale è la prova a flessione su 3 punti, in accordo alle norme europee armonizzate EN 14651. Infine, come tutte le norme per la qualificazione, le Linee Guida specificano tutte le prove per la caratterizzazione meccanica e di durabilità del materiale. Un'ultima ma non meno importante novità introdotta dalle Linee Guida riguarda la possibilità di utilizzare prodotti premiscelati in cantiere.

CAPITOLO 4

Applicazioni sperimentali

4.1 Generale

L'attività sperimentale svolta non è stata mirata solamente all'applicazione di prove di caratterizzazione meccanica previste dalla norma UNI EN 1015-11 su campioni di UHPFRC, ma è anche servita per valutazioni della durabilità della matrice e la sua fibra.

A tale scopo e per poter fare valutazioni più precise e complete sul materiale si sono seguite tutte le fasi di preparazione dei componenti, confezionamento e getto del calcestruzzo.

4.2 Confezionamento dei provini

I provini sono stati preparati e confezionati presso Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU). Sono stati realizzati 18 provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ e 30 provini $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, disarmo dopo 24 ore dal getto e stagionatura all'aria per cinque giorni.

4.2.1 Materiali utilizzati

Vengono descritti di seguito i materiali utilizzati per il confezionamento dei provini. Il cemento utilizzato CEM I 52,5 R prodotto dalla ditta COLACEM S.p.A., è un cemento Portland avente requisiti in accordo alla norma EN 197-1 e composizione riportata in Tabella 1.

Tabella 4 - Composizione CEM I 52,5 R

| CEM I 52,5 R | |
|---|-------|
| Clinker | 91,5% |
| Calcare | 3,3% |
| Gesso | 3,2% |
| Materie prime artificiali (Solfato ferroso, additivi inorganici, solfato di calcio) | 0,7% |
| Materie prime seconde (Ceneri, gesso recuperato) | 1,4% |

- Gli additivi utilizzati sono: additivo superfluidificante a base di naftalensolfonato di ultima generazione per migliorare la lavorabilità dell'impasto ed evitare i rischi di segregazione della miscela; additivo chimico che riduce e ostacola la formazione di schiuma durante la miscelazione; additivo riduttore del ritiro.
- Gli aggregati utilizzati sono di due tipologie: Sabbia 0/1 Po, di granulometria compresa tra 0-1 mm al 30% e sabbia BC 00 con granulometria compresa tra 0-2mm al 70%;



Figura 4.2.1.2 – Sabbia del Po, Sabbia essiccata

- Il Fumo di silice utilizzato è un prodotto in polvere di forma prevalentemente sferica, costituito da silice amorfa submicronica, privo di qualsiasi composto cristallino. Tale componente ha elevata superficie specifica (15-20 m²/g), altissima attività pozzolanica e grandi proprietà fillerizzanti. Le particelle, di dimensioni ridottissime (0,05-0,5µm), si dispongono nei vuoti esistenti fra i granuli di cemento, riducendo così la microporosità della pasta cementizia. Queste caratteristiche fanno del fumo di silice, una materia prima pregiata che permette di ottenere calcestruzzi con incrementata resistenza meccanica, ridotta permeabilità e quindi migliore durabilità. È ovvio che l'utilizzo del fumo di silice richiede un maggior quantitativo d'acqua e, per non compromettere le caratteristiche del conglomerato cementizio, è necessario impiegare additivi superfluidificanti.



Figura 4.2.1.3 – Fumo di silice

- Agente espansivo CaO e additivo antiritiro (SRA, shrinkage reducing admixture) che se usati insieme evitano la formazione del ritiro poiché l'agente espansivo è una sostanza che fa espandere il materiale, quindi, ritarda l'azione del ritiro, ritarda il tempo in cui il materiale si contrae e praticamente tale contrazione non determina fessurazione.



Figura 4.2.1.4 – Agente espansivo

- Per questo lavoro sono state utilizzate fibre in acciaio rivestite di ottone, di dimensioni $l=13$ mm, diametro $\Phi=0,2$ mm e tipologia dritta. Il loro impiego è per calcestruzzi e malte ad alta resistenza, ideali per la sostituzione dell'armatura tradizionale nei conci ed elementi prefabbricati. Inoltre, sono largamente utilizzati nella realizzazione delle piattaforme offshore dei mari e di ponti di grande luce dove, per le eccezionali sollecitazioni meccaniche ed ambientali; risulta difficile impiegare calcestruzzi NSC (Normal Strength Concrete). Sono ottenute mediante trafilatura a freddo del filo d'acciaio, di prima qualità ad alta resistenza.



Figura 4.2.1.5 – *Fibra in acciaio rivestita in ottone*

4.3 Mix design

Mix-design è letteralmente il “progetto della miscela”; più estesamente è il “calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste (lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc.) e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili (cemento, inerti, additivi). Il mix-design si basa su alcune correlazioni sperimentali, non esiste un codice di calcolo esatto per ottenere la miscela ottimale. Le correlazioni sperimentali sono funzione della composizione del calcestruzzo, da una parte, le prestazioni del calcestruzzo e le caratteristiche delle materie dall'altra. Nel caso oggetto di studio, è stato realizzato un impasto con le seguenti proporzioni delle componenti.

Tabella 5 - Proporzioni componenti UHPC (kg/m³)

| Componenti | Kg/m³ |
|--|-------------------------|
| Cemento 52,5 R | 720 |
| Sabbia essiccata (esincalce) | 945 |
| Sabbia Po | 410 |
| Superfluidificante | 11 |
| Antibolle | 5 |
| Antiritiro (Shrinkage reducing admixtures) | 9 |
| Fumo di silice | 100 |
| Espansivo | 25 |
| Acqua | 245 |
| Fibre | 150 |

4.4 Fasi operative

I provini sono stati creati seguendo le successive fasi:

1. pesate dei materiali seguendo le proporzioni calcolate;
2. inserimento dei materiali in una betoniera e miscelazione fino al raggiungimento di un impasto uniforme, omogeneo e senza grumi visibili;
3. esecuzione del “cono di Abrams” per valutare la lavorabilità dell’impasto;
4. getto e compattazione attraverso il tavolo vibrante;
5. ricopertura dei campioni mediante pellicola di nylon per limitare il fenomeno di essudazione dell’acqua;
6. disarmo dopo 24 ore dal getto;
7. maturazione di cinque giorni in ambiente a temperatura e umidità controllata;
8. Immersione dei provini in acqua e acqua e sale (NaCl 5%) per 28,60,90 giorni.



Figura 4.4.1 - *Getto della miscela negli appositi casseri 4x4x16 cm³*



Figura 4.4.2 – *Maturazione di 5 giorni dopo scassero 10x10x10 cm³*

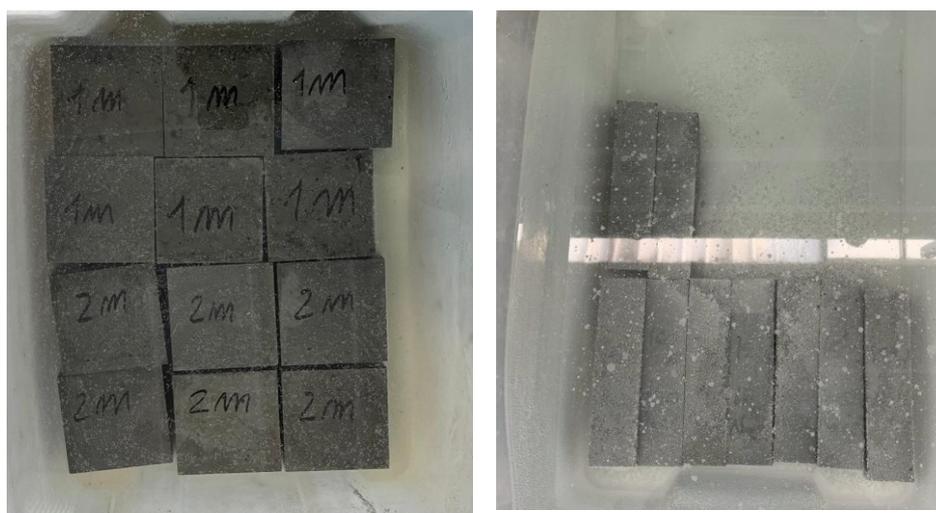


Figura 4.4.3 – Immersione in NaCl e H₂O

4.5 Classificazione dei provini

Sono stati realizzati 18 provini con dimensioni di ogni cassero 4x4x16 cm³, classificati in sequenza dalla lettera A, B, C. A maturazione avvenuta, sui provini oggetto di studio, sono stati effettuati test meccanici a compressione e a flessione su tre punti.

Sono stati realizzati 30 provini con dimensioni di ogni cassero 10x10x10 cm³, classificati in sequenza dalla lettera A, B, C. A maturazione avvenuta sui provini sono stati effettuati test meccanici a compressione a flessione, prova per la determinazione della penetrabilità dello ione cloruro (UNI 7928), analisi delle fibre con microscopio ottico, porosimetria a mercurio.

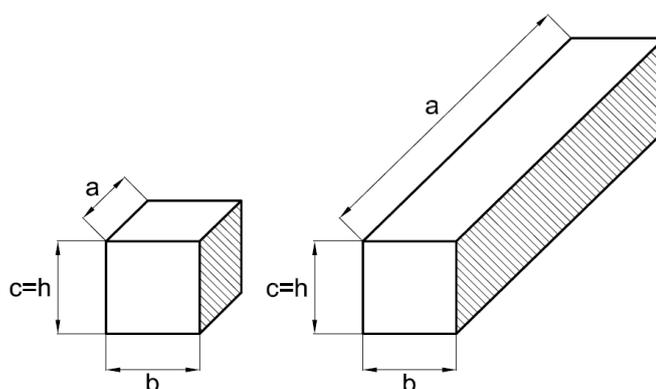


Figura 4.5.1- Schematizzazione dei provini

4.6 Prove eseguite

Di seguito si riportano le modalità delle prove eseguite sui provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ e $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$.

4.6.1 Prova a flessione

Con riferimento alla norma UNI EN 1015-11, i provini di dimensioni $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, sono stati sottoposti a prove per la determinazione della resistenza a flessione su tre punti. La resistenza è stata misurata utilizzando una pressa idraulica munita di cella di carico collegata ad un terminale presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU), (Figura 4.6.1.1).



Figura 4.6.1.1- *Pressa idraulica*

Dopo aver posizionato con cura il provino, appoggiato alle due estremità e disposto longitudinalmente, la resistenza a flessione è ottenuta con l'applicazione di un carico concentrato al centro della faccia superiore del provino stesso e nel calcolare la forza necessaria per portarlo a rottura.

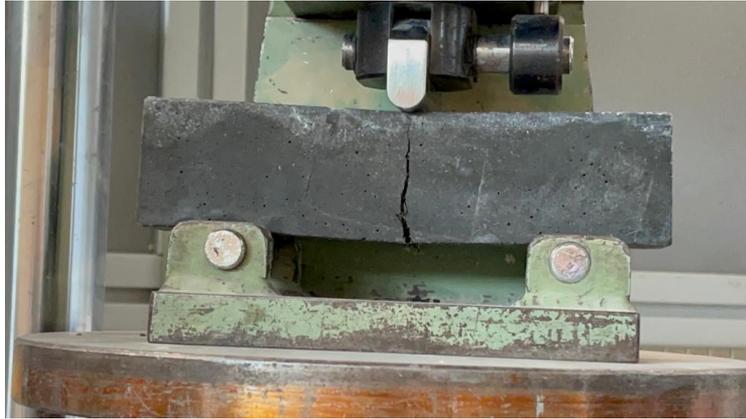


Figura 4.6.1.2- *Setup di prova 4x4x16 cm³*

Nelle immagini sotto allegate, si mostrano provini con differenti comportamenti a flessione. Nel primo caso provini UHPC immersi in H₂O si genera una rottura di tipo *strain-hardening* (incrudente); nel secondo caso i provini immersi in NaCl si genera una rottura di tipo *strain-softening* (degradante).

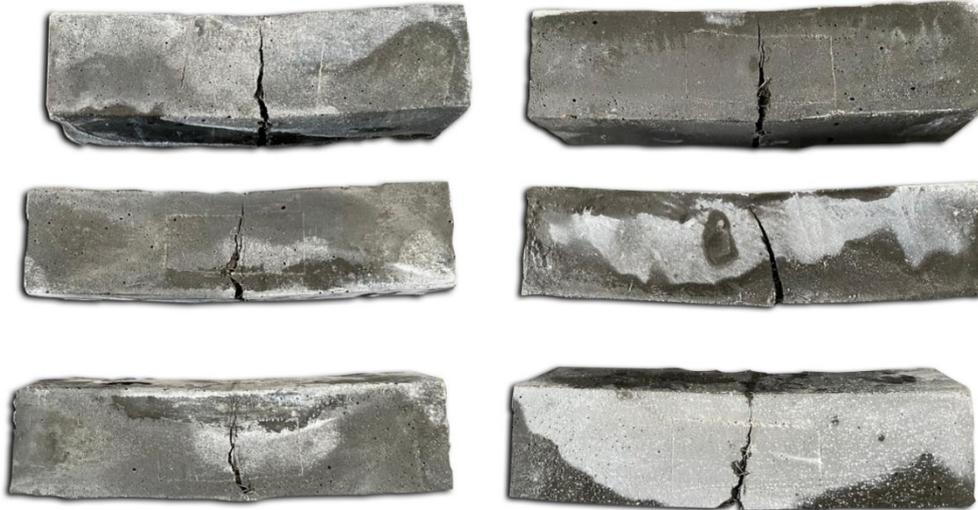


Figura 4.6.1.3 – *Rottura a flessione di tipo duttile provini in H₂O e NaCl*

4.6.2 Prova a compressione

Sulle due estremità di ogni provino $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, precedentemente sottoposto a prova a flessione, in accordo alla norma UNI EN 1015-11, è stata eseguita una prova di compressione semplice mediante una pressa idraulica munita di cella di carico collegata ad un terminale, presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU).



Figura 4.6.2.1 – Setup di prova a compressione provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$



Figura 4.6.2.2 – Rottura a compressione provini in H_2O e $NaCl$

Sui cubetti confezionati è stata eseguita una prova di compressione (figura 4.6.2.2), secondo la norma UNI EN 1015-11, per la determinazione del valore di rottura a compressione. Si nota dalle immagini che il tipo di rottura non è bipiramidale come nei casi di calcestruzzo ordinario; in generale accade che la distribuzione degli sforzi durante la prova di compressione è resa complessa dall'insorgenza di forze d'attrito al contatto tra i piatti di carico e le facce del provino. Conseguenza di ciò è la deformazione quasi nulla del calcestruzzo in prossimità delle piastre, mentre il resto del provino tende ad espandersi per effetto Poisson; questo provoca la comparsa di sforzi di trazione perpendicolari alla direzione del carico, maggiori nella zona centrale, che sono i responsabili dell'espulsione della parte esterna del campione. Nel caso di calcestruzzi fibrorinforzati le trazioni sono assorbite dalle fibre, che quindi contrastano il distacco della parte esterna.

Si nota però che tramite una leggera azione manuale è possibile staccare questa parte esterna, vedendo così la classica rottura a clessidra.



Figura 4.6.2.3 – Setup di prova a compressione provini 10x10x10 cm³



Figura 4.6.2.4 – Cubetti al termine della prova immersi in H₂O



Figura 4.6.2.5 – Cubetti al termine della prova immersi in NaCl

4.6.3 Prova colorimetrica per la determinazione della penetrabilità dello ione cloruro (UNI 7928)

Per determinare lo spessore di conglomerato penetrato dai cloruri, si utilizza un metodo cosiddetto colorimetro che è basato sull'impiego di due soluzioni: una a base di fluoresceina (0,1 g in 100 cm³ di alcol etilico al 70% e l'altra componente è il nitrato d'argento (AgNO₃) in concentrazione acquosa pari a 0,1 mol/l.

Spruzzando alternativamente la soluzione di fluoresceina e quella di nitrato d'argento sulla superficie del provino conferisce al conglomerato una colorazione variabile a seconda dei casi, dal rosa pallido al marroncino molto chiaro. Nelle zone di calcestruzzo non penetrate invece il nitrato d'argento si ossida e assume una colorazione variabile dal

marrone molto scuro al nero. La formazione dell'ossido d'argento e conseguente cambio cromatico è favorito dalla presenza di luce solare.

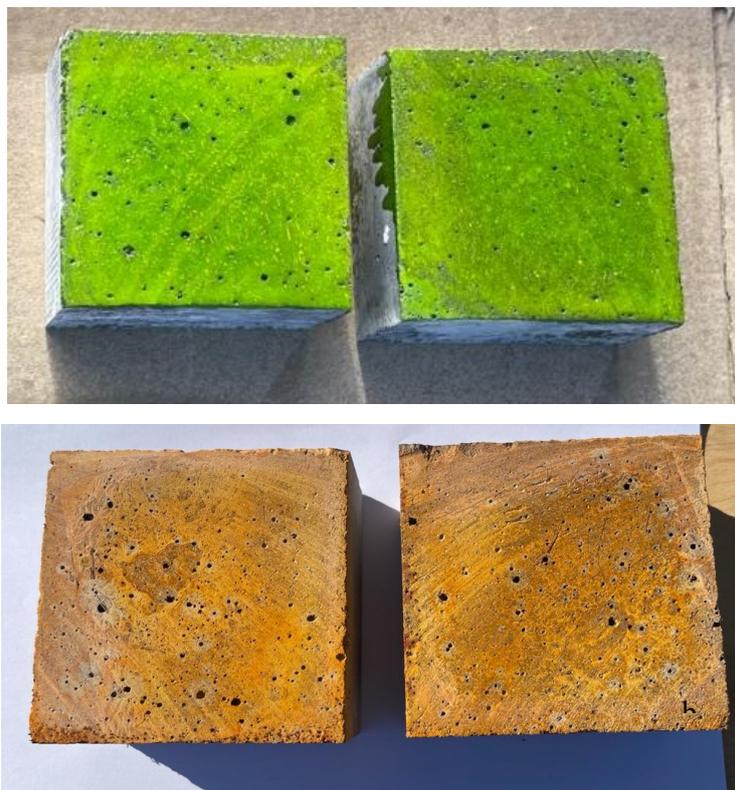


Figura 4.6.3.1 – *Cubetti spruzzati con la fluoresceina (a), reazione al sole della fluoresceina (b).*



Figura 4.6.3.2 – *Reazione con nitrato d'argento provino A – 2 mesi*

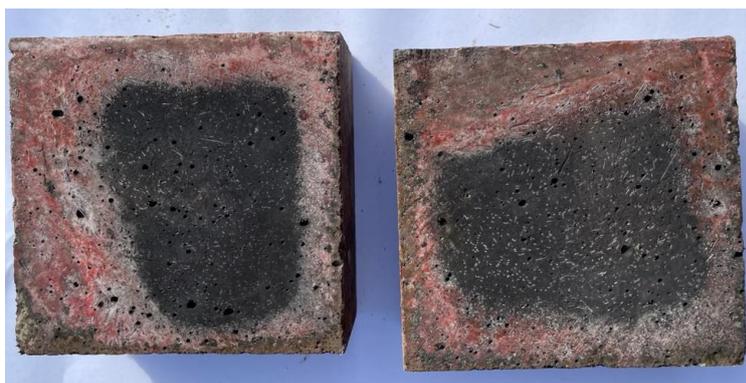


Figura 4.6.3.3 – Reazione con nitrato d’argento provino A – 3 mesi

4.6.4 Analisi porosimetriche al mercurio

La tecnica consente di misurare il volume e le dimensioni dei pori aperti del campione mediante intrusione del mercurio a pressione via via crescente di mercurio. Grazie alla sua proprietà di bagnabilità, il mercurio penetra attraverso la porosità aperta di un campione solido solamente grazie all’applicazione di una pressione esterna. Sono stati prelevati due campioni uno esterno ed uno interno per ogni provino.

Tali analisi sono state svolte in conformità di quanto riportato da Collepari nel libro “Il calcestruzzo vulnerabile: prevenzione, diagnosi del degrado e restauro”, per valutare la porosità aperta totale e la distribuzione dimensionale dei pori.

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

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

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

dove:

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

r è il raggio dei pori;

σ è la tensione superficiale del mercurio;

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



Figura 4.6.4.1 – *Thermo scientific PASCAL 140 e 240*

Provini:

I campioni di UHPFRC che sono stati sottoposti alle analisi porosimetriche derivano dai frammenti dei provini che sono stati precedentemente sottoposti alle prove meccaniche di flessione e compressione.

In totale sono state analizzati 6 campioni di UHPFRC immersi in acqua, sono stati prelevati dei campioni esternamente ed internamente a 1,2,3 mesi.

Procedimento:

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

Poiché tra pressione applicata e raggio (o diametro) dei pori esiste la correlazione precedente (equazione di Washburn) è possibile esprimere sullo stesso grafico il volume di mercurio intruso (riferito per esempio a 100 g di materiale) in funzione del diametro dei pori d (in μm).

In questo modo è possibile conoscere quale è il volume di mercurio penetrato (e quindi di pori presenti) fino ad una certa pressione P , oppure fino ad un certo diametro dei pori.

La curva che si ottiene rappresenta il volume cumulativo dei pori presenti fino ad un certo diametro. Il volume totale di mercurio intruso al massimo della pressione applicabile con lo strumento rappresenta il volume totale dei pori. La forma della curva ed in particolare il suo flesso indicano come sono distribuiti i pori: il diametro dei pori corrispondente al flesso indica la dimensione dei pori più frequente.

La porosimetria a mercurio è particolarmente indicata per valutare la distribuzione dei pori aventi dimensione compresa fra centesimi e centinaia di μm .

4.6.5 Macroscopio ottico

La macroscopica ottica è una tecnica di osservazione che consente di riprodurre immagini ingrandite di oggetti o particolari ad essi troppo piccoli per essere osservati ad occhio nudo. Complessivamente, il macroscopio ottico è costituito da un sistema di lente inserita in un tubo porta-lenti racchiuso tra una lente oculare, dove ci si appoggia l'occhio e un'altra che è l'obiettivo vero è proprio, vicino l'oggetto da osservare.

CAPITOLO 5

Analisi dei risultati

Dall'esecuzione delle prove meccaniche e chimiche descritte nel precedente capitolo, di seguito sono riportati grafici con discussione dati e risultati ottenuti.

5.1 Risultati prova di flessione

Come descritto nel capitolo precedente, sono state condotte prove di flessione sia su provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ immersi in NaCl e H₂O.

5.1.1 Provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$

La resistenza a flessione è stata valutata sui provini prismatici di dimensioni $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, secondo le indicazioni della normativa UNI EN 1015-11 (*Metodi di prova per malte per opere murarie-Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita*).

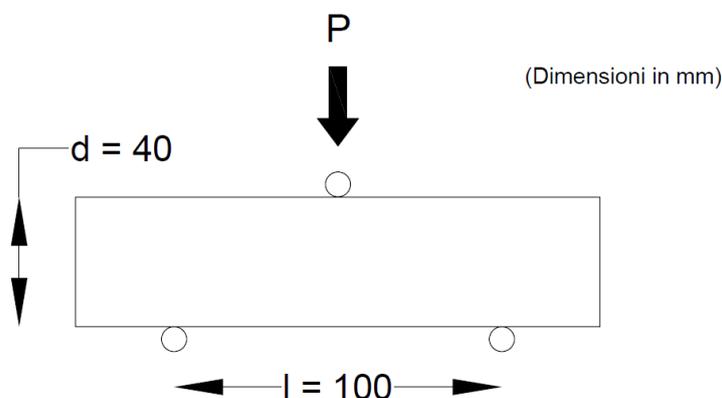


Figura 5.1.1.1 – Schema di carico della prova a flessione

Il valore della resistenza a flessione f è stato calcolato con la seguente formula:

$$f = 1,5 Fl/bd^2 \text{ (MPa)}$$

dove F è il valore del carico massimo applicato (in N), b e d sono rispettivamente i valori (in mm) di larghezza e altezza del provino (pari a 40 mm entrambi nel caso specifico) e con l si indica la distanza (in mm) tra gli assi dei supporti (pari a 100 mm nel caso specifico).

Di seguito si riportano le curve forza F -spostamento s derivanti dai risultati delle prove a flessione su tre punti eseguite sui provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. La relazione F - s è presentata nella forma di un diagramma x - y con lo spostamento sull'asse delle ascisse x e la forza su quello delle ordinate y .

Ogni grafico è preceduto dalla tabella nella quale, per tutti i provini, sono indicati il valore di carico massimo a rottura, espresso in kN, lo spostamento al carico massimo, in mm e la resistenza a flessione f_{\max} in MPa.

Risultati prova a flessione 1 mese H2O

| Campione | Carico massimo Fmax (kN) | Spostamento al carico massimo s(mm) | Resistenza a flessione <i>f</i> max (Mpa) |
|-----------|--------------------------------|--|---|
| Provino A | 5,21 | 5,86 | 12,20 |
| Provino B | 5,86 | 5,95 | 13,40 |
| Provino C | 5,90 | 5,39 | 13,82 |
| Media | 5,65 | 0,07 | 13,14 |
| COV | 0,07 | 0,05 | 0,06 |

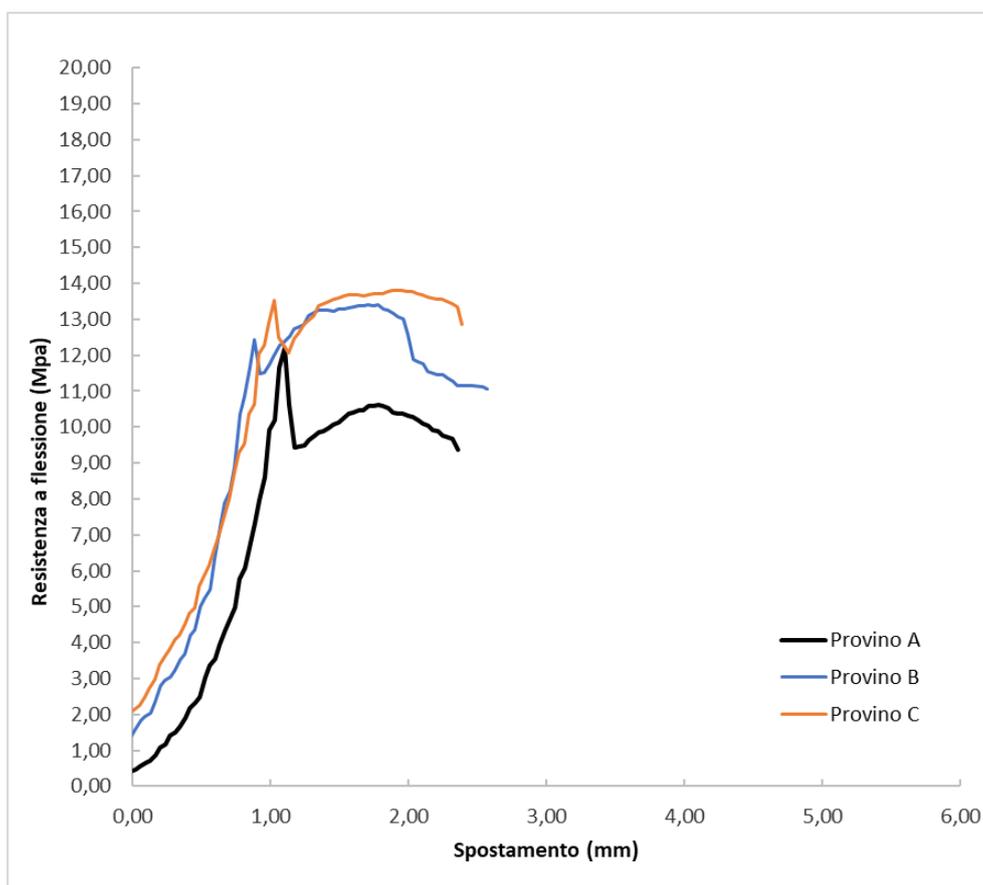


Figura 5.1.1.2 – Curva Forza-Spostamento a flessione 1 mese H2O

Risultati prova a flessione 2 mesi H2O

| Campione | Carico massimo Fmax (kN) | Spostamento al carico massimo s(mm) | Resistenza a flessione <i>fmax</i> (Mpa) |
|-----------|--------------------------------|--|--|
| Provino A | 5,69 | 4,17 | 13,34 |
| Provino B | 5,74 | 4,49 | 13,46 |
| Provino C | 5,28 | 4,01 | 12,38 |
| Media | 5,57 | 4,49 | 13,06 |
| COV | 0,05 | 0,07 | 0,05 |

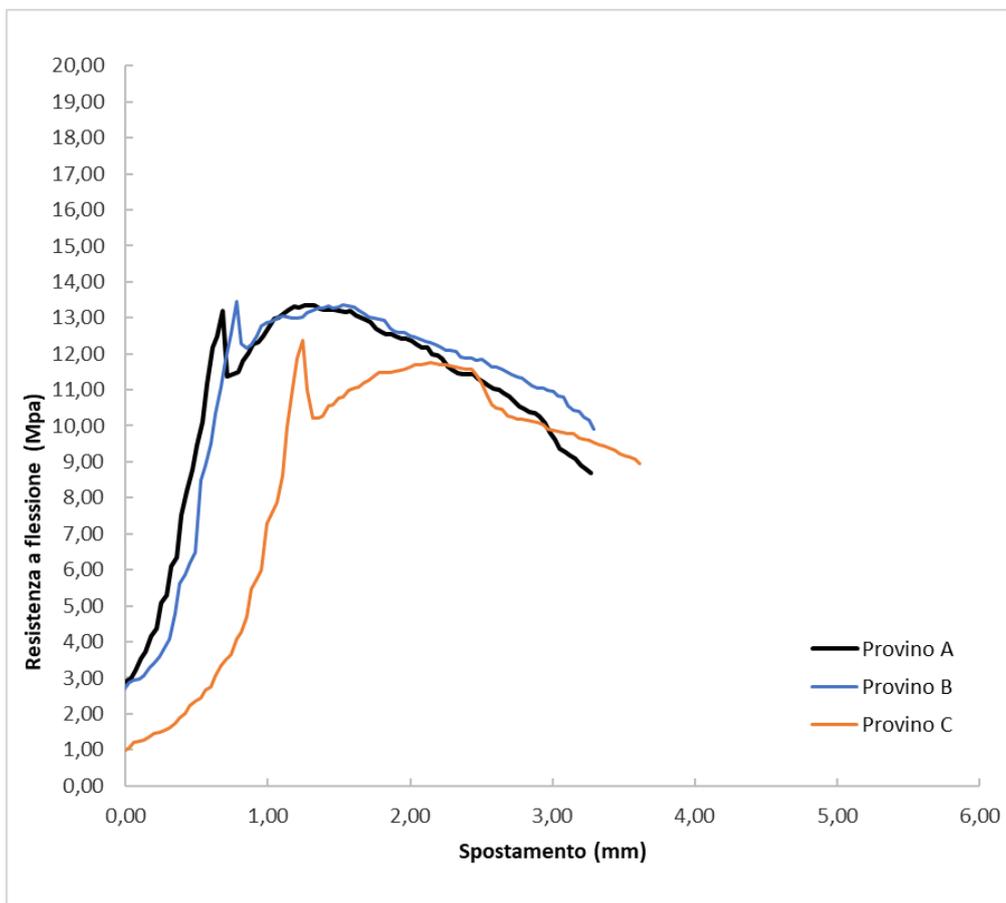


Figura 5.1.1.3 – Curva Forza-Spostamento a flessione 2 mesi H2O

Risultati prova a flessione 3 mesi H2O

| Campione | Carico massimo Fmax (kN) | Spostamento al carico massimo s(mm) | Resistenza a flessione <i>f</i> _{max} (Mpa) |
|-----------|--------------------------------|--|---|
| Provino A | 6,29 | 6,14 | 14,75 |
| Provino B | 6,00 | 6,22 | 14,06 |
| Provino C | 7,17 | 7,511 | 16,81 |
| Media | 6,49 | 6,62 | 15,21 |
| COV | 0,09 | 0,12 | 0,09 |

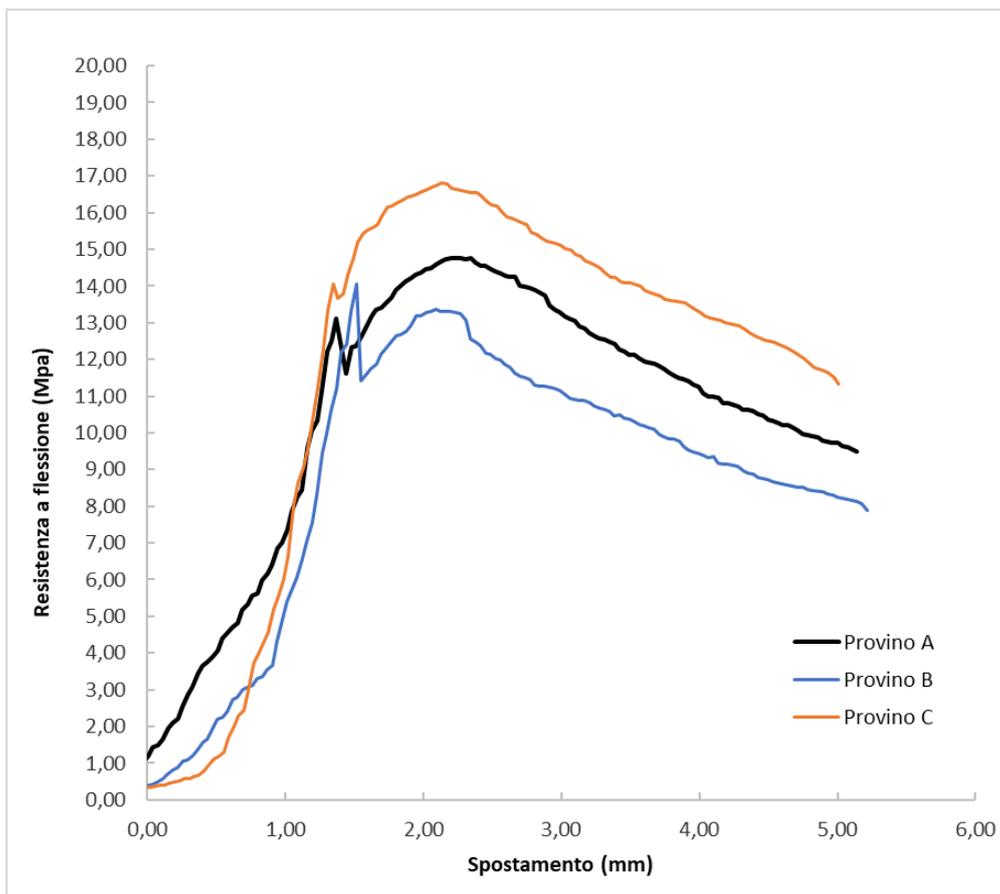


Figura 5.1.1.4 – Curva Forza-Spostamento a flessione 3 mesi H2O

Risultati prova a flessione 1 mese NaCl

| Campione | Carico massimo Fmax (kN) | Spostamento al carico massimo s(mm) | Resistenza a flessione <i>fmax</i> (Mpa) |
|-----------|--------------------------------|--|--|
| Provino A | 6,03 | 6,22 | 14,14 |
| Provino B | 5,49 | 4,63 | 12,86 |
| Provino C | 5,96 | 7,71 | 13,97 |
| Media | 5,83 | 5,52 | 13,66 |
| COV | 0,05 | 0,15 | 0,05 |

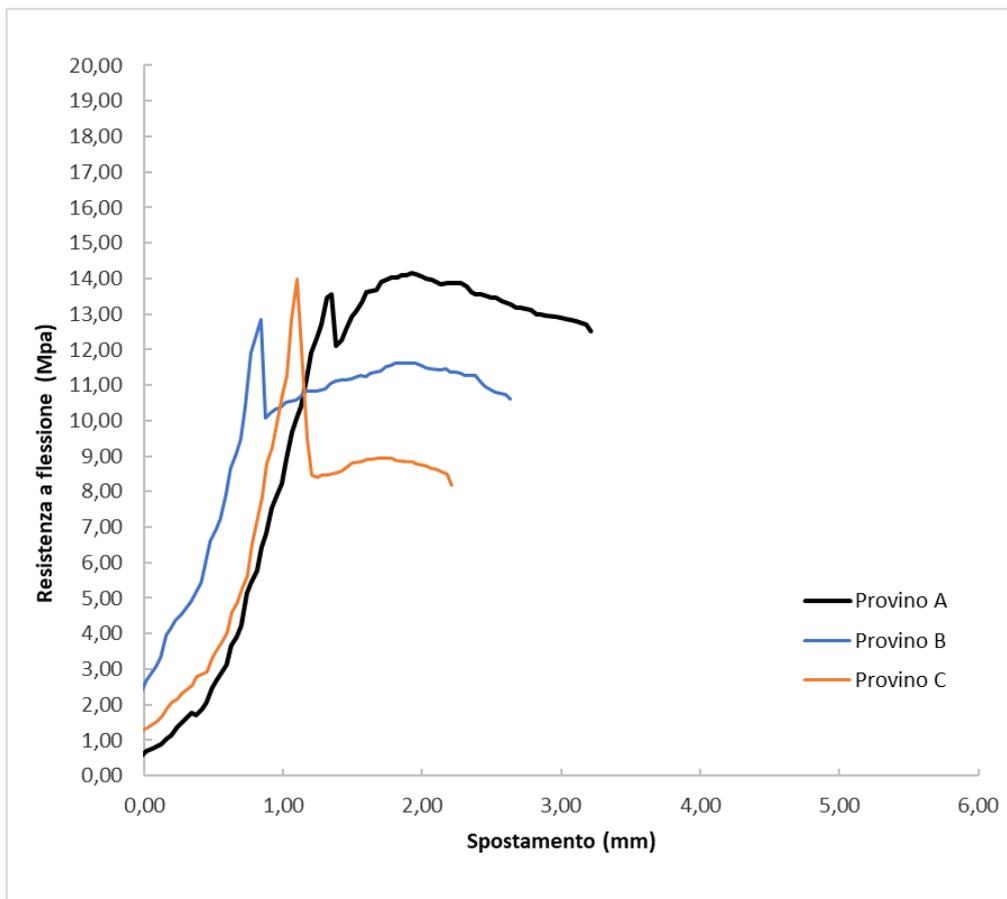


Figura 5.1.1.5 – Curva Forza-Spostamento a flessione 1 mese NaCl

Risultati prova a flessione 2 mesi NaCl

| Campione | Carico massimo Fmax (kN) | Spostamento al carico massimo s(mm) | Resistenza a flessione <i>f</i> _{max} (Mpa) |
|-----------|--------------------------------|--|--|
| Provino A | 6,26 | 4,85 | 14,68 |
| Provino B | 5,45 | 4,60 | 12,77 |
| Provino C | 6,35 | 4,20 | 14,89 |
| Media | 6,02 | 4,55 | 14,11 |
| COV | 0,08 | 0,33 | 0,08 |

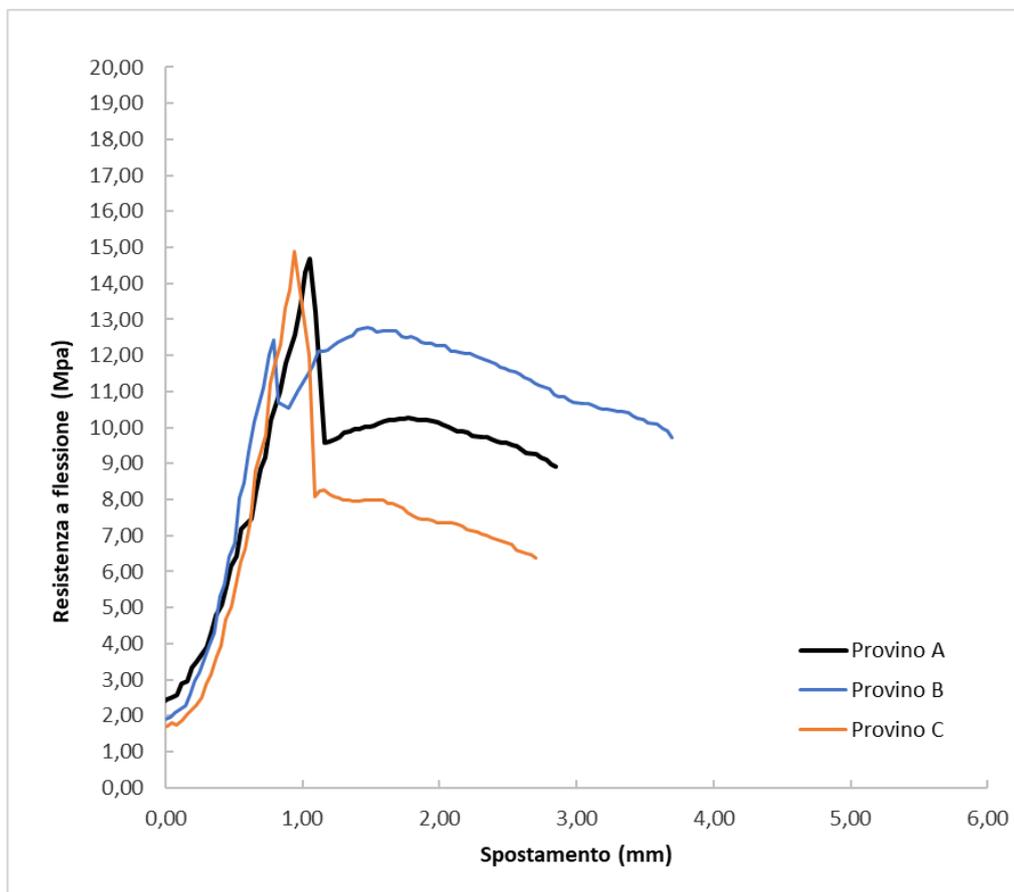


Figura 5.1.1.6 – Curva Forza-Spostamento a flessione 2 mesi NaCl

Risultati prova a flessione 3 mesi NaCl

| Campione | Carico massimo F_{max} (kN) | Spostamento al carico massimo s (mm) | Resistenza a flessione f_{max} (Mpa) |
|-----------|-------------------------------------|---|--|
| Provino A | 6,61 | 7,22 | 15,50 |
| Provino B | 7,43 | 7,40 | 17,41 |
| Provino C | 7,20 | 7,22 | 16,879 |
| Media | 7,08 | 7,28 | 16,59 |
| COV | 0,06 | 0,01 | 0,06 |

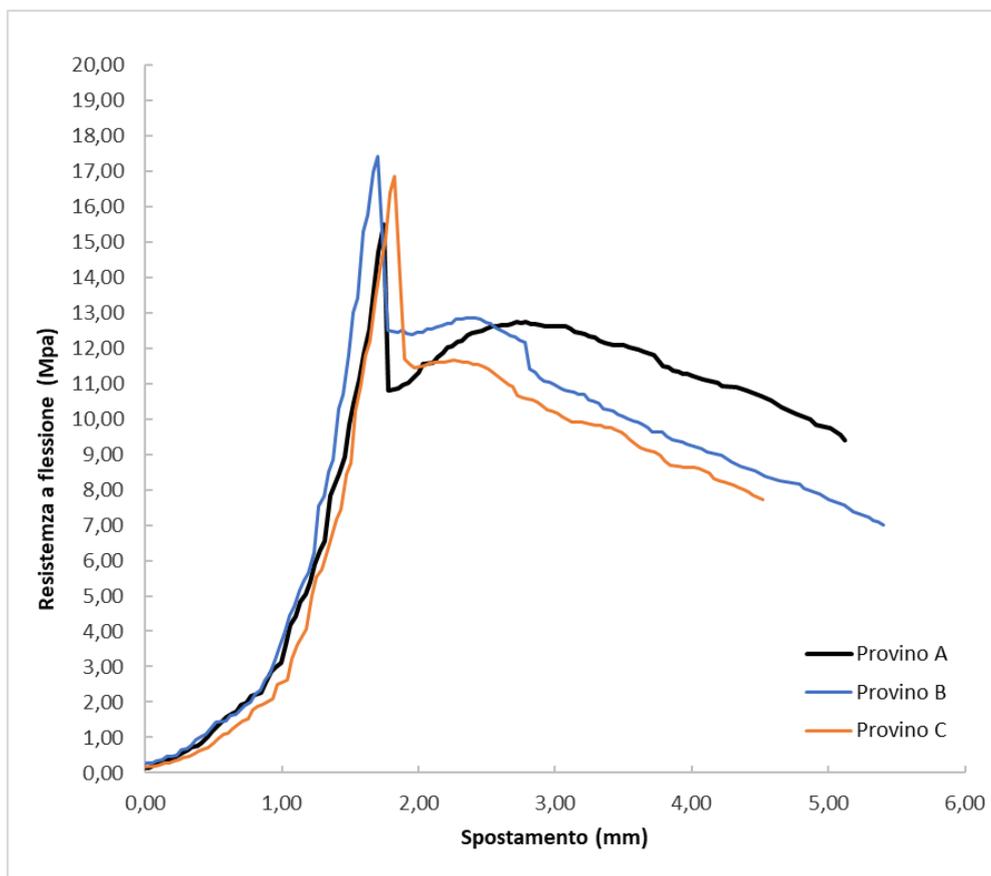


Figura 5.1.1.7– Curva Forza-Spostamento a flessione 3 mesi NaCl

Risultati prova a flessione 1 mese

| Campione | Tensione di Resistenza a | |
|----------|--------------------------------|--|
| | prima fessurazione (Mpa) | flessione <i>f_{max}</i> (Mpa) |

| | | |
|------|-------|-------|
| H2O | 13,52 | 13,80 |
| NaCl | 12,86 | 12,86 |

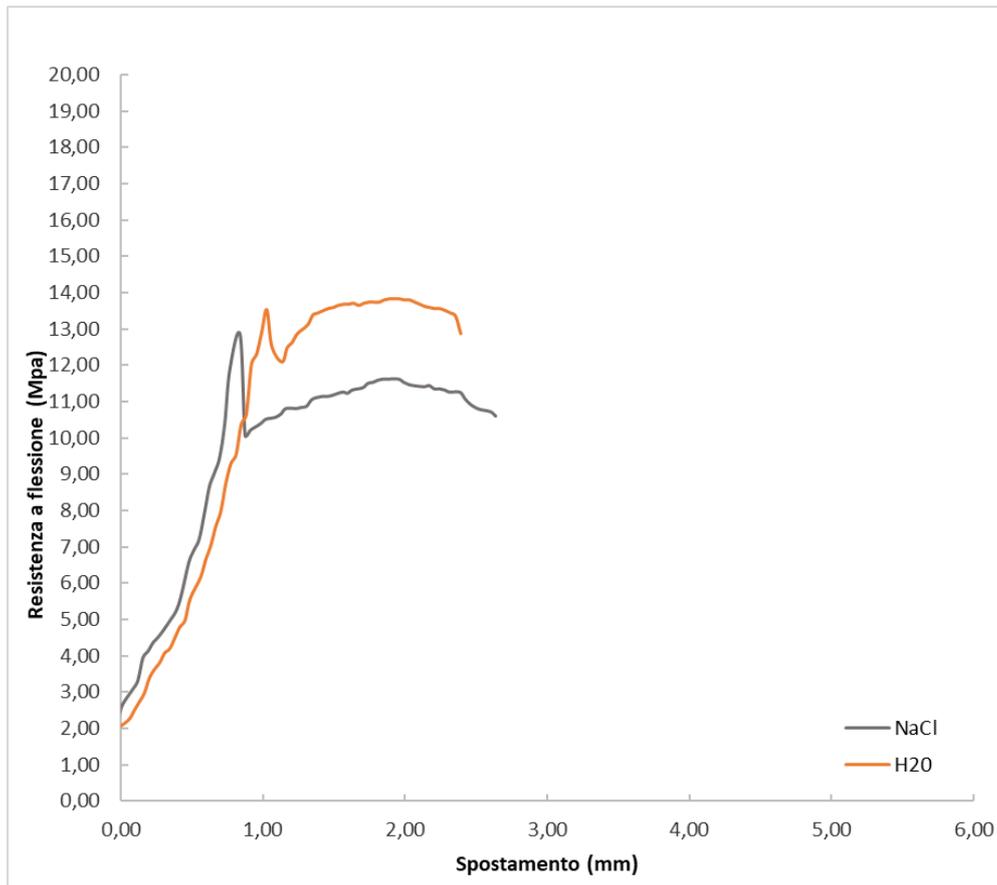


Figura 5.1.1.8 – Curva Forza-Spostamento a flessione 1 mese NaCl e H2O

Risultati prova a flessione 2 mesi

| Campione | Tensione di Resistenza a | |
|----------|--------------------------------|--|
| | prima fessurazione (Mpa) | flessione <i>f_{max}</i> (Mpa) |

| | | |
|------|-------|-------|
| H2O | 13,19 | 13,34 |
| NaCl | 14,68 | 14,68 |

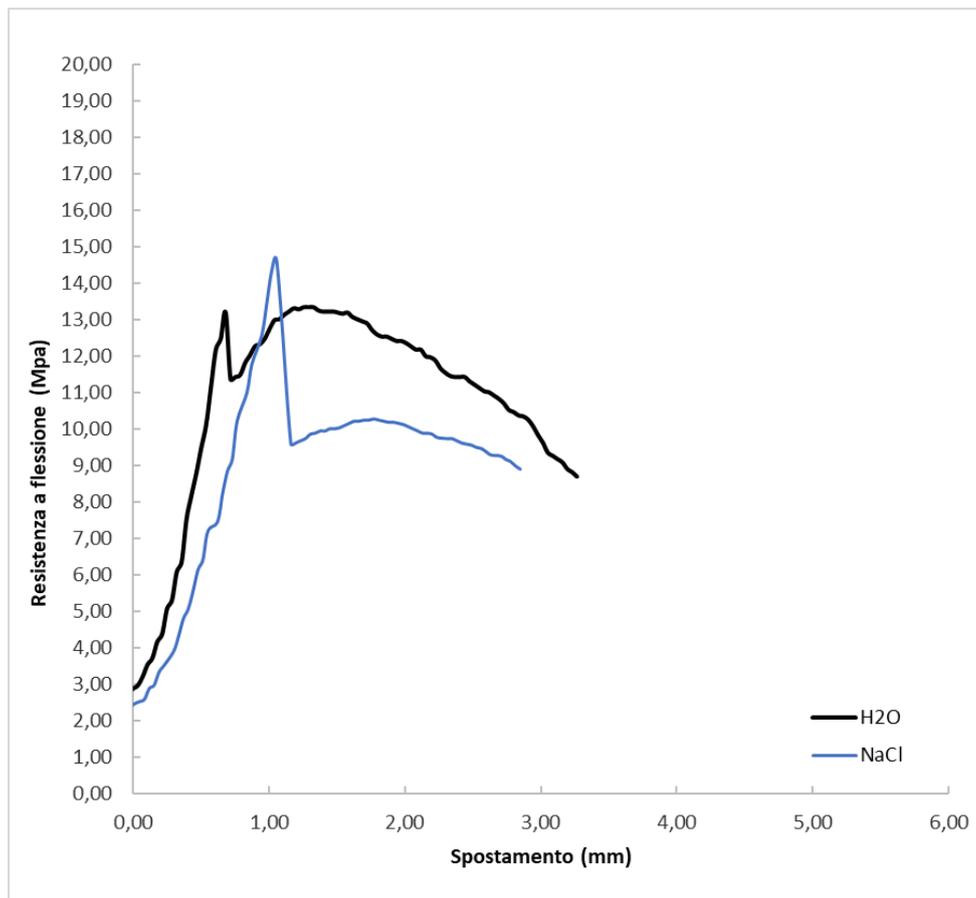


Figura 5.1.1.9 – Curva Forza-Spostamento a flessione 2 mesi NaCl e H2O

Risultati prova a flessione 3 mesi

| Campione | Tensione di Resistenza a | |
|----------|--------------------------------|--|
| | prima fessurazione (Mpa) | flessione <i>f_{max}</i> (Mpa) |

| | | |
|------|-------|-------|
| H2O | 14,09 | 16,81 |
| NaCl | 17,41 | 17,41 |

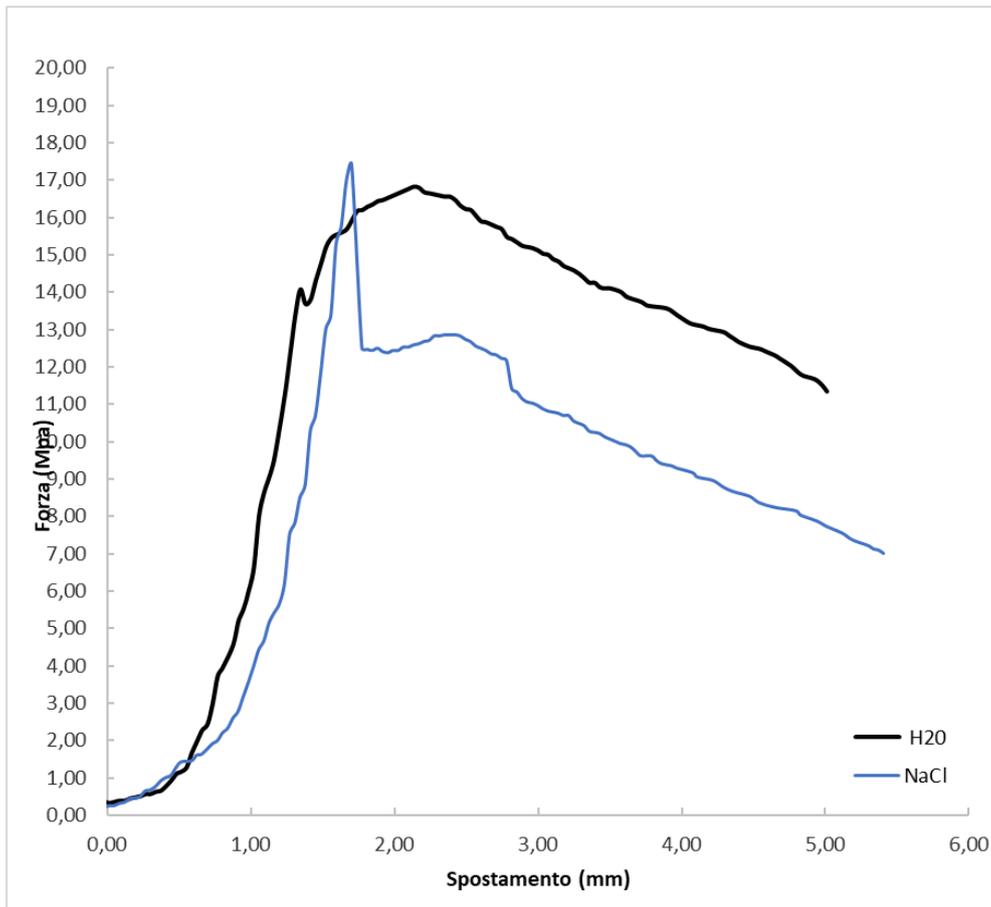


Figura 5.1.1.10 – Curva Forza-Spostamento a flessione 3 mesi NaCl e H2O

5.1.2 Discussione dei risultati

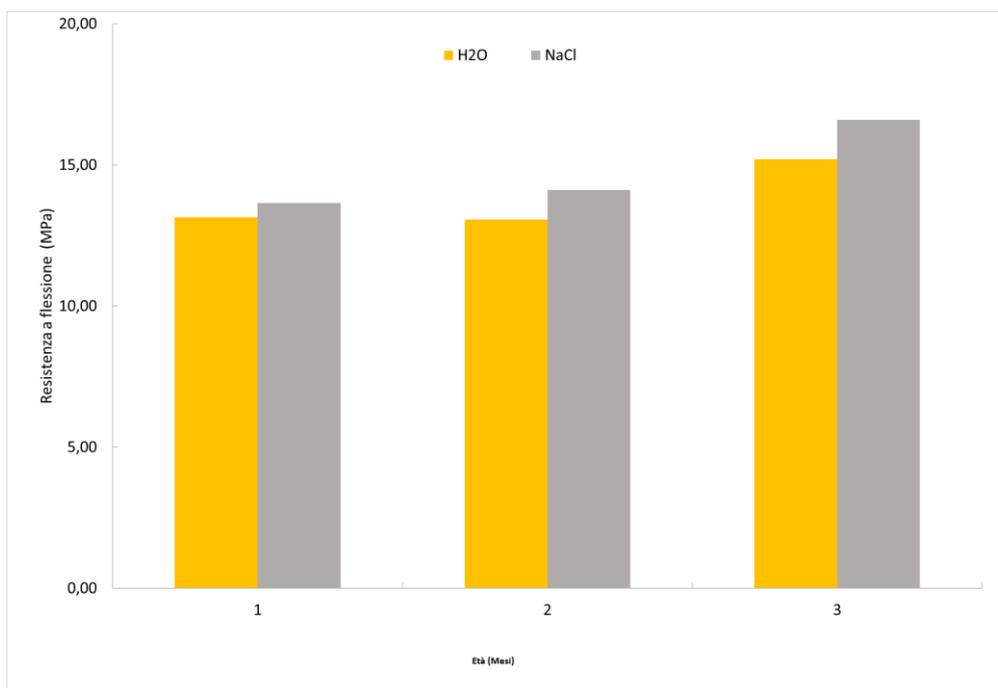


Figura 5.1.2.1 – Confronto tra la resistenza a flessione dei provini immersi in NaCl e H2O

Analizzando i risultati ottenuti si può evincere che il comportamento flessionale per i provini immersi in H2O e NaCl nella fase pre-fessurativa dipende dalla pasta cementizia; in questo caso rimane invariata in entrambi i provini a differenza della fase post-fessurativa che si modifica.

I provini immersi in H2O hanno un comportamento incrudente (*strain hardening*) poiché la resistenza a trazione è maggiore dello sforzo di prima fessurazione.

I provini immersi in NaCl hanno un comportamento degradante (*strain softening*) poiché lo sforzo di prima fessurazione è maggiore per poi avere un andamento decrescente fino ad annullarsi. Questo è dovuto dal degrado della fibra dovuto all'ione cloruro penetrato all'interno della matrice cementizia, la fibra non riesce a creare in maniera ottimale l'effetto ponte con la matrice cementizia come avviene nei provini immersi in H2O.

5.2 Risultati prova di compressione 4x4x16 cm³

| Risultati prova a compressione 1 mese H2O | | | |
|---|--------------------------------|--|---|
| Campione | Carico massimo Fmax (kN) | Spostamento al carico massimo s(mm) | Resistenza a compressione <i>f</i> _{max} (Mpa) |
| Provino 1A sx | 147,72 | 14,91 | 92,32 |
| Provino 1A dx | 147,53 | 13,33 | 92,20 |
| Provino 1B sx | 157,77 | 14,23 | 98,61 |
| Provino 1B dx | 152,04 | 0,00 | 95,03 |
| Provino 1C sx | 150,20 | 12,47 | 93,88 |
| Provino 1C dx | 150,98 | 13,33 | 94,36 |
| Media | 151,04 | 11,38 | 94,4 |
| COV | 0,02 | 0,50 | 0,02 |

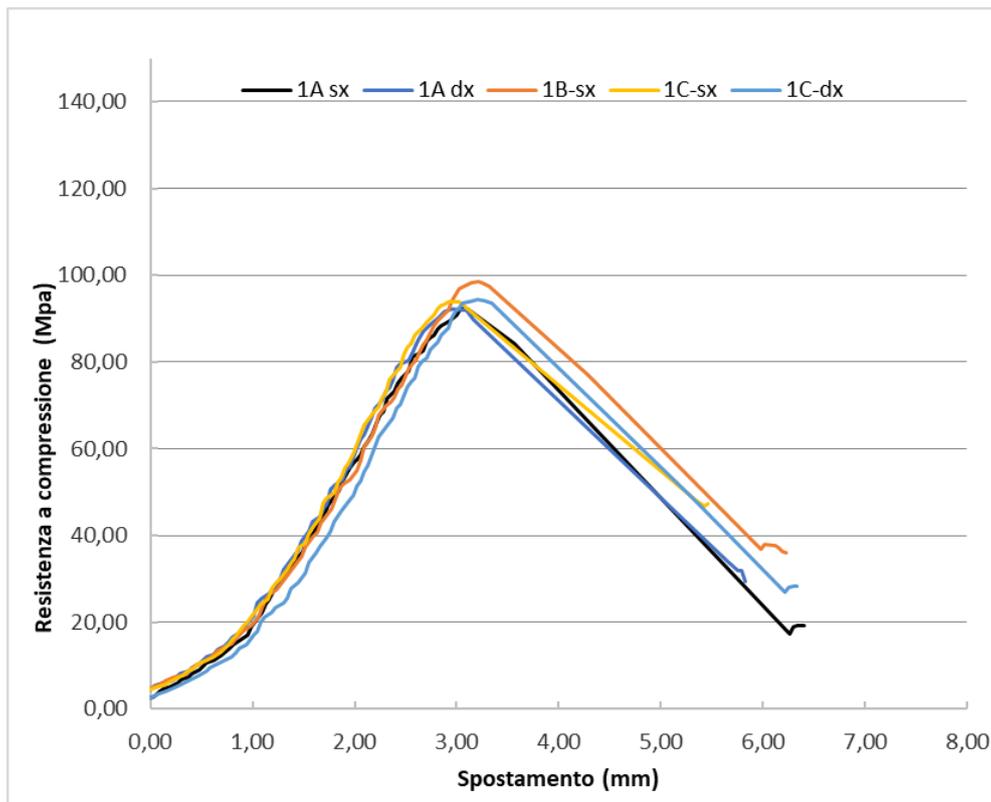


Figura 5.2.1 – Curva Forza-Spostamento a compressione 1 mese H2O

Risultati prova a compressione 2 mesi H2O

| Campione | Carico massimo Fmax (kN) | Spostamento al carico massimo s(mm) | Resistenza a compressione <i>f</i> max (Mpa) |
|---------------|--------------------------------|--|--|
| Provino 1A sx | 159,25 | 12,25 | 99,53 |
| Provino 1A dx | 162,05 | 13,76 | 101,28 |
| Provino 1B sx | 162,29 | 13,29 | 102,38 |
| Provino 1B dx | 163,81 | 13,08 | 102,49 |
| Provino 1C sx | 163,98 | 14,19 | 102,49 |
| Provino 1C dx | 158,83 | 12,43 | 99,27 |
| Media | 161,72 | 13,17 | 101,07 |
| COV | 0,01 | 0,06 | 0,01 |

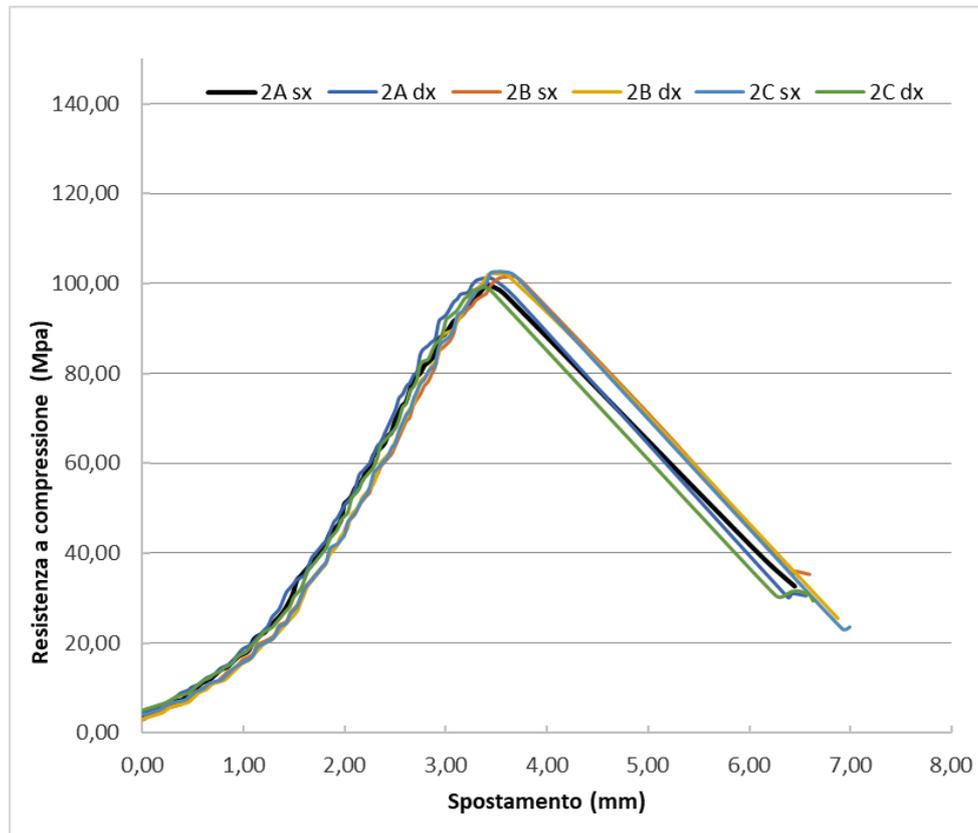


Figura 5.2.2 – Curva Forza-Spostamento a compressione 2 mesi H2O

Risultati prova a compressione 3 mesi H2O

| Campione | Carico massimo Fmax (kN) | Spostamento al carico massimo s(mm) | Resistenza a compressione <i>fmax</i> (Mpa) |
|---------------|--------------------------------|--|---|
| Provino 1A sx | 171,59 | 12,79 | 107,24 |
| Provino 1A dx | 181,81 | 15,59 | 113,63 |
| Provino 1B sx | 159,61 | 14,19 | 99,76 |
| Provino 1B dx | 164,81 | 14,08 | 103,01 |
| Provino 1C sx | 181,54 | 15,13 | 113,46 |
| Provino 1C dx | 181,82 | 14,37 | 113,64 |
| Media | 173,53 | 14,36 | 108,46 |
| COV | 0,06 | 0,07 | 0,06 |

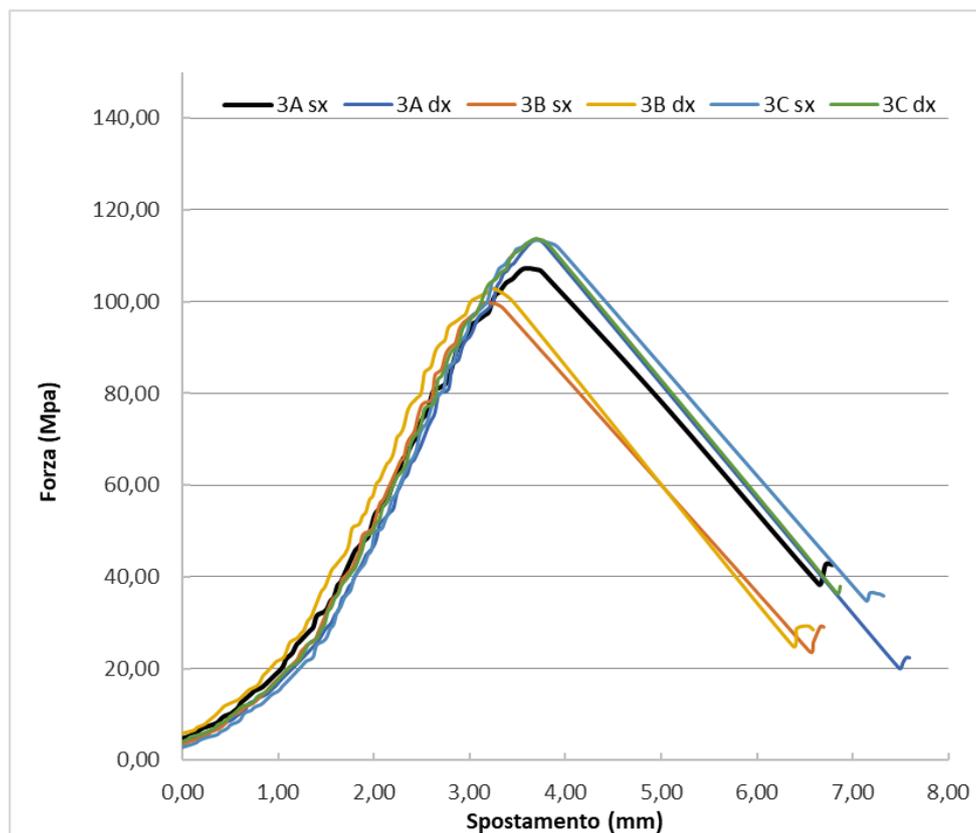


Figura 5.2.3 – Curva Forza-Spostamento a compressione 3 mesi H2O

Risultati prova a compressione 1 mese NaCl

| Campione | Carico massimo Fmax (kN) | Spostamento al carico massimo s(mm) | Resistenza a compressione <i>f</i> max (Mpa) |
|---------------|--------------------------------|--|--|
| Provino 1A sx | 141,08 | 13,26 | 88,17 |
| Provino 1A dx | 145,17 | 13,80 | 90,73 |
| Provino 1B sx | 161,29 | 11,86 | 100,81 |
| Provino 1B dx | 164,11 | 15,16 | 102,57 |
| Provino 1C sx | 145,09 | 14,62 | 90,68 |
| Provino 1C dx | 149,73 | 14,95 | 93,58 |
| Media | 151,08 | 13,94 | 94,42 |
| COV | 0,06 | 0,09 | 0,06 |

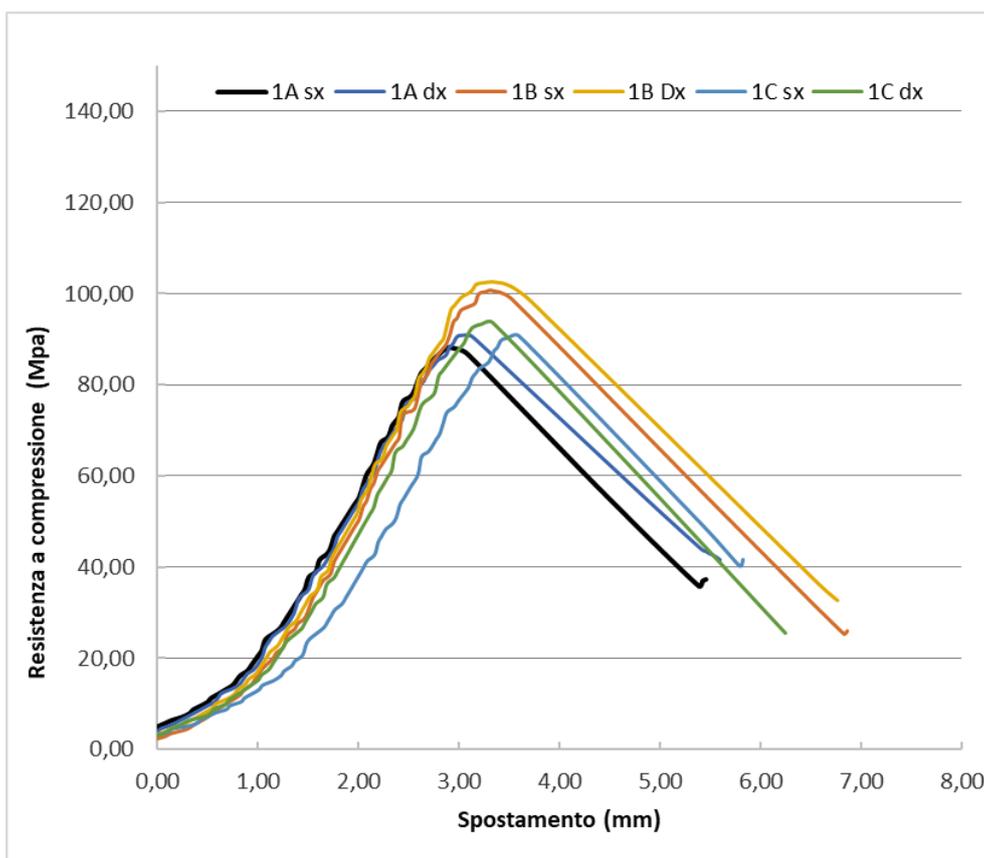


Figura 5.2.4 – Curva Forza-Spostamento a compressione 1 mese NaCl

Risultati prova a compressione 2 mesi NaCl

| Campione | Carico massimo Fmax (kN) | Spostamento al carico massimo s(mm) | Resistenza a compressione <i>f</i> _{max} (Mpa) |
|---------------|--------------------------------|--|---|
| Provino 1A sx | 150,27 | 15,66 | 93,92 |
| Provino 1A dx | 162,14 | 11,17 | 101,34 |
| Provino 1B sx | 154,69 | 10,74 | 96,68 |
| Provino 1B dx | 152,34 | 12,32 | 95,21 |
| Provino 1C sx | 146,63 | 11,78 | 91,65 |
| Provino 1C dx | 150,85 | 12,47 | 94,28 |
| Media | 152,82 | 12,36 | 95,51 |
| COV | 0,03 | 0,14 | 0,03 |

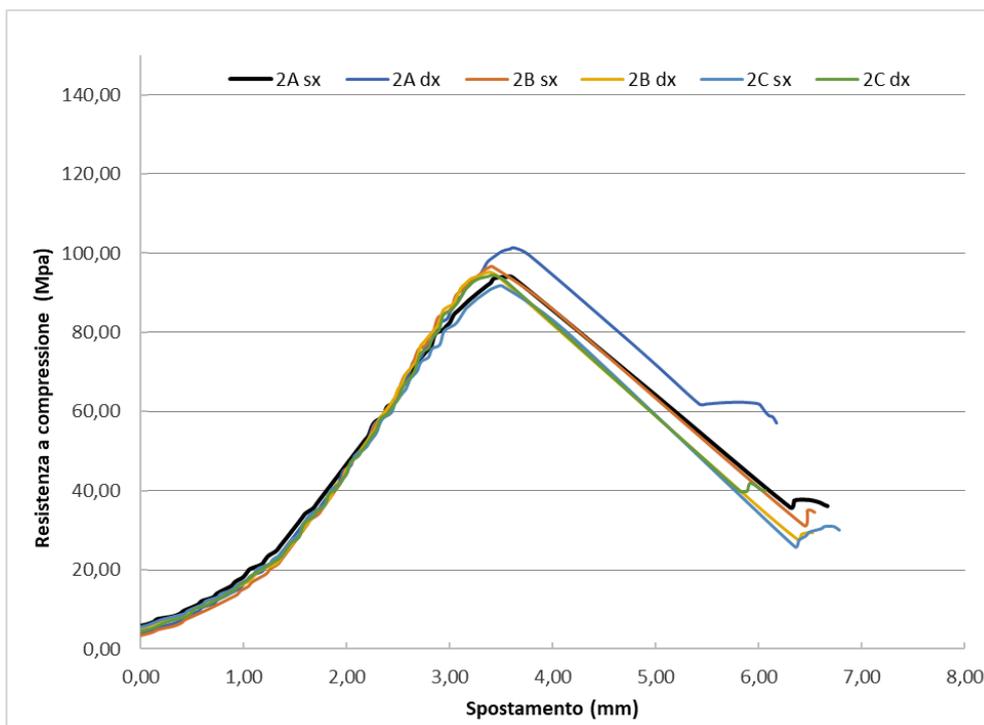


Figura 5.2.5 – Curva Forza-Spostamento a compressione 2 mesi NaCl

Risultati prova a compressione 3 mesi NaCl

| Campione | Carico massimo Fmax (kN) | Spostamento al carico massimo s(mm) | Resistenza a compressione <i>fmax</i> (Mpa) |
|---------------|--------------------------------|--|---|
| Provino 1A sx | 176,98 | 13,44 | 110,61 |
| Provino 1A dx | 163,80 | 13,33 | 102,38 |
| Provino 1B sx | 174,01 | 12,61 | 108,76 |
| Provino 1B dx | 172,28 | 13,83 | 107,67 |
| Provino 1C sx | 166,03 | 11,03 | 103,77 |
| Provino 1C dx | 165,20 | 12,65 | 103,25 |
| Media | 169,72 | 12,81 | 106,07 |
| COV | 0,03 | 0,08 | 0,03 |

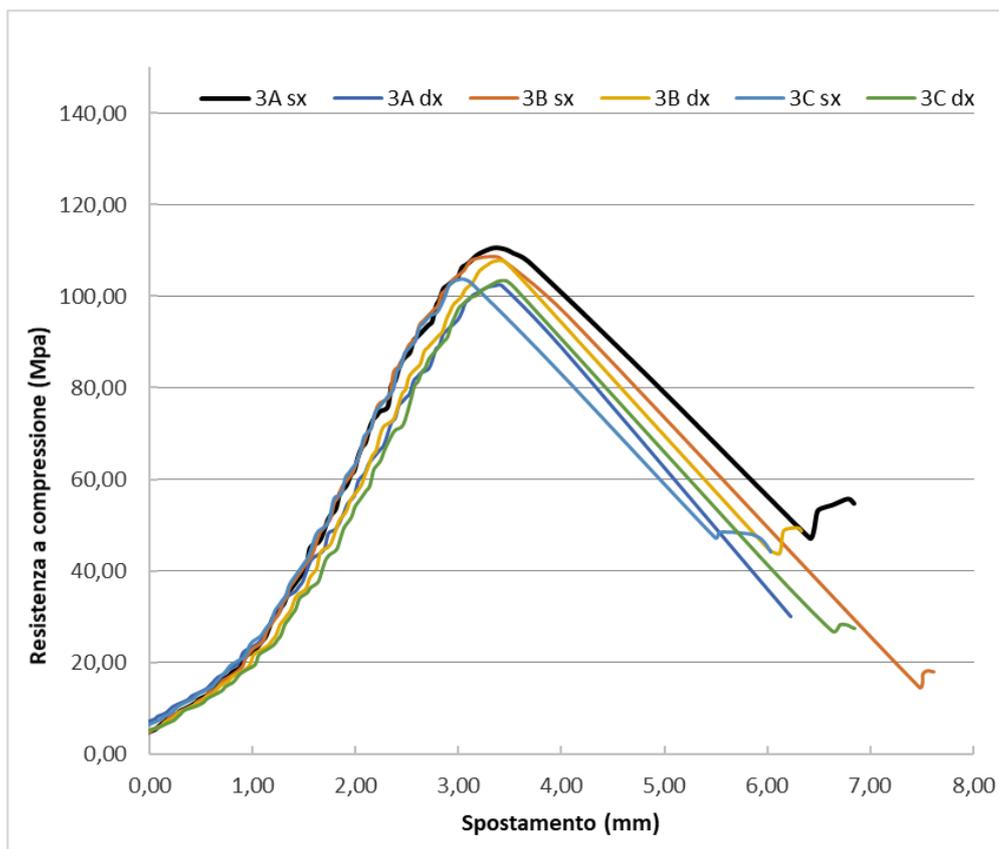


Figura 5.2.6 – Curva Forza-Spostamento a compressione 3 mesi NaCl

5.2.1 Discussione dei risultati

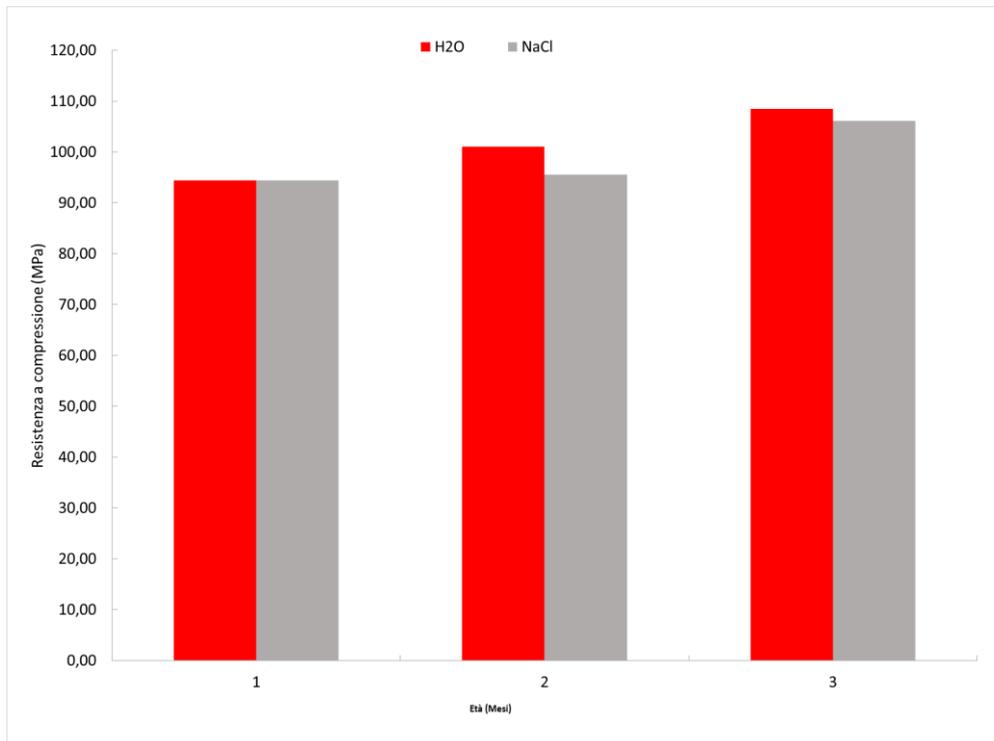


Figura 5.2.1.1 – Confronto tra la resistenza a compressione dei provini immersi in NaCl e H₂O

Analizzando la prova a compressione la resistenza per i provini immersi in H₂O aumenta con l'aumentare del tempo, mentre per i provini immersi in NaCl diminuisce la resistenza rispetto agli altri per l'effetto della fibra degradata; diminuisce l'effetto confinamento.

5.3 Risultati prova di compressione 10x10x10 cm³

Risultati prova a compressione

| Campione | Tensione massima σ_{max} (Mpa) | Incremento tensione massima (%) |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------|
| 1 mese | 81,50 | 0,00 |
| 2 mesi | 93,50 | 14,72 |
| 3 mesi | 94,17 | 0,72 |

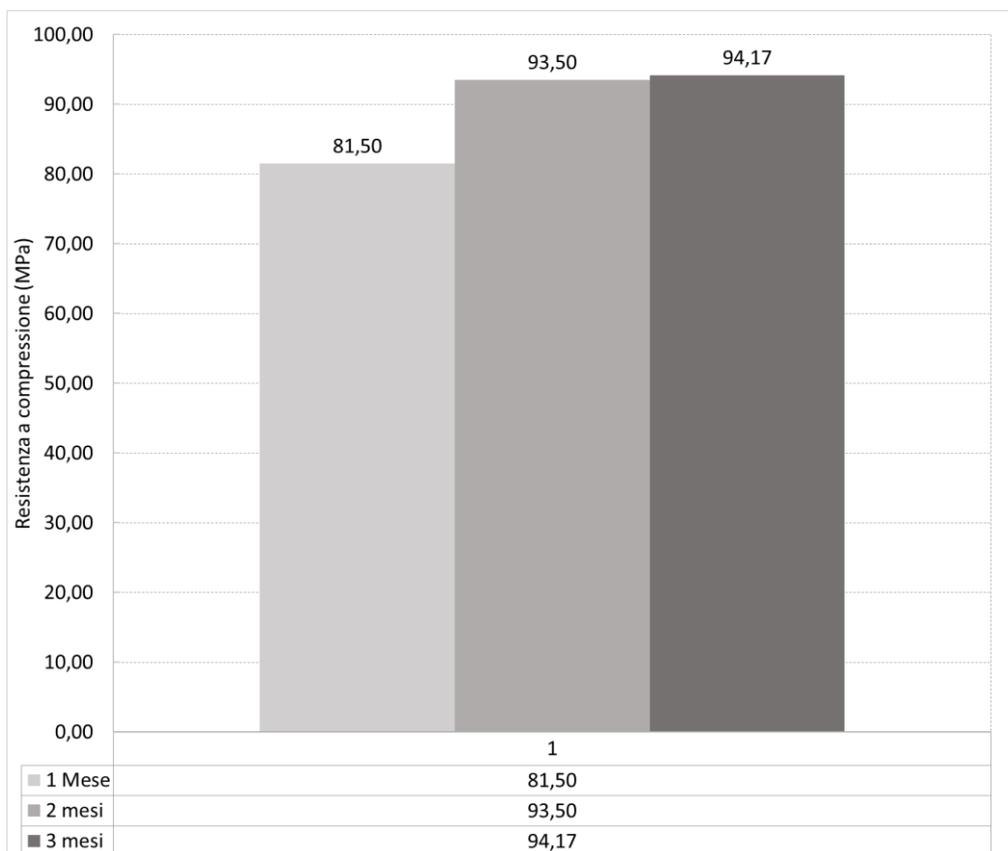


Figura 5.3.1 – Resistenza a compressione provini immersi in H₂O

Risultati prova a compressione

| Campione | Tensione massima σ_{max} (Mpa) | Incremento tensione massima (%) |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------|
| 1 mese | 82,50 | 0,00 |
| 2 mesi | 94,00 | 13,94 |
| 3 mesi | 94,17 | 0,18 |

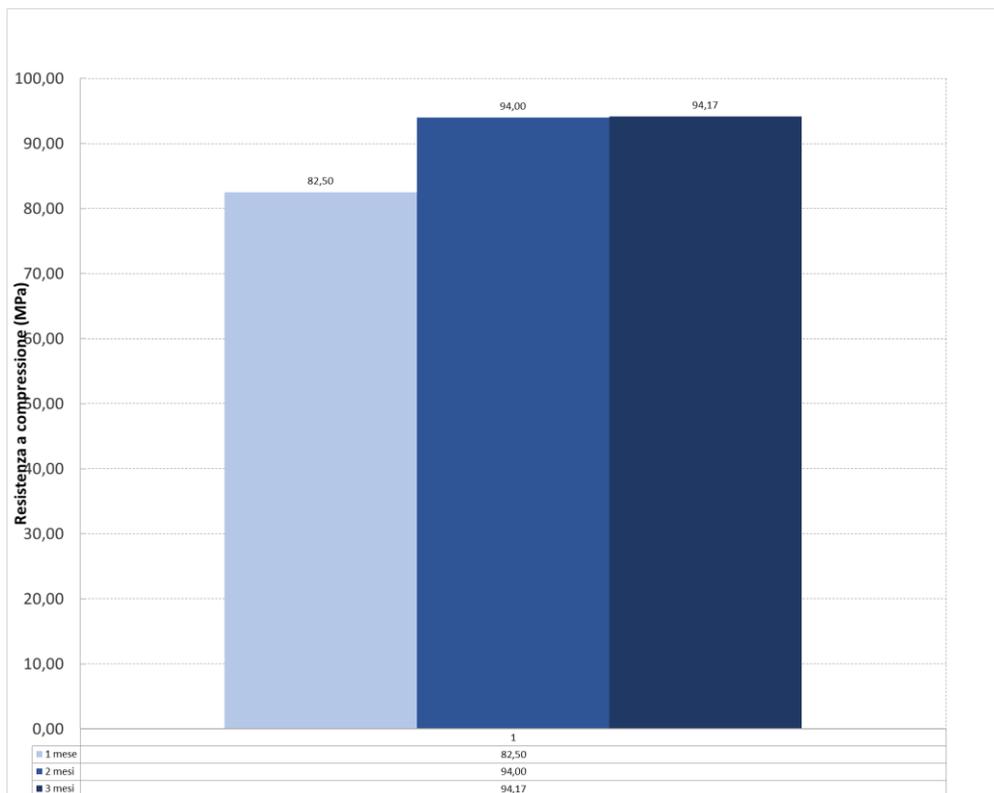


Figura 5.3.2 – Resistenza a compressione provini immersi in NaCl

5.3.1 Discussione dei risultati

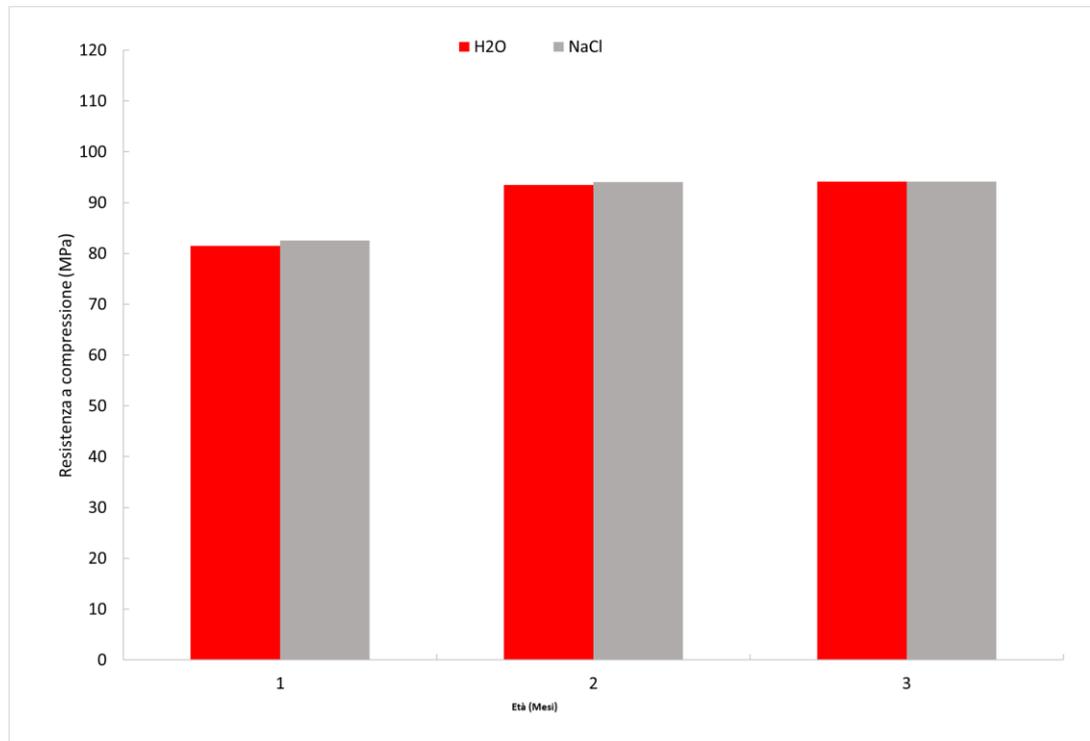


Figura 5.3.1.1 – Confronto tra la resistenza a compressione dei provini immersi in NaCl e H₂O

La prova a compressione fornisce risultati in termini di carico di rottura. Operativamente si è determinato tale valore per ogni cubetto e se n'è calcolata la media per ogni tipo di calcestruzzo. La media è stata eseguita su tre valori, in quanto per ogni tipo di calcestruzzo erano presenti tre cubetti. A partire da questi due valori è stato semplice poi calcolare il valore caratteristico di tensione di rottura.

Qui si può notare che la resistenza a compressione è aumentata per ogni mese d'immersione, in questo caso le fibre all'interno dei provini immersi in NaCl non sono state corrose, ma solo quelle nel primo strato superficiale. L'effetto confinamento all'interno della matrice cementizia avviene correttamente.

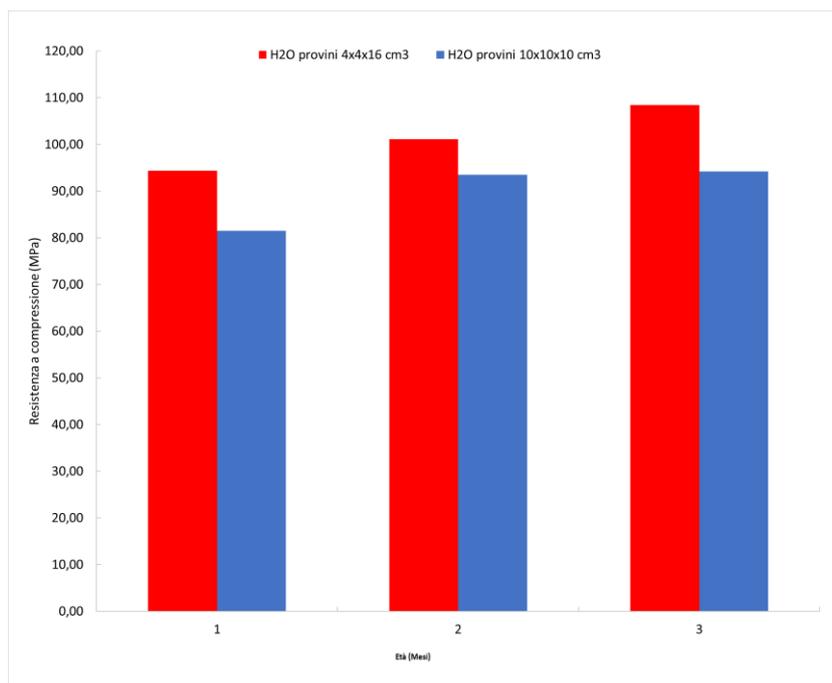


Figura 5.3.1.2 – Confronto tra la resistenza a compressione dei provini 4x4x16 cm³ e 10x10x0cm³ immersi in H2O

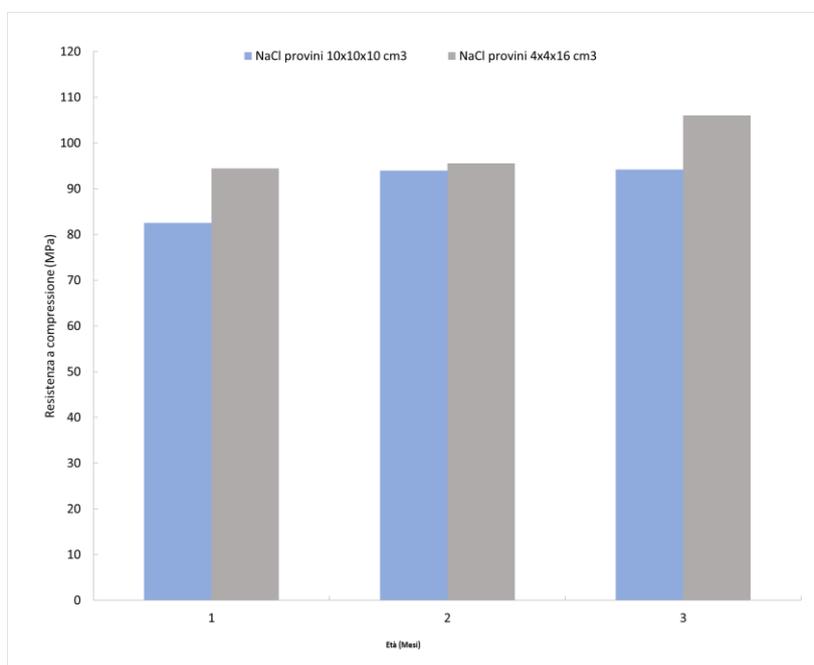


Figura 5.3.1.3 – Confronto tra la resistenza a compressione dei provini 4x4x16 cm³ e 10x10x0cm³ immersi in NaCl

Confrontando la resistenza a compressione con due dimensioni di provini differenti si è riscontrato che sui provini di dimensione maggiore si ha un effetto scala, quindi la resistenza diminuisce. È stato riscontrato che la dimensione del campione ha un'influenza significativa

sulla resistenza alla compressione misurata dell'UHPFRC, probabilmente dovuto alla maggiore probabilità di incontrare difetti di dimensioni maggiori in esemplari più grandi.

5.4 Risultati prova colorimetrica per la determinazione della penetrabilità dello ione cloruro (UNI 7928)

La profondità di penetrazione del cloruro è stata misurata dal cambiamento del colore al bordo del provino, è stata registrata come distanza media, abbiamo suddiviso il provino in una scacchiera (fig. 5.4.1) il livello di profondità è stato preso nei due quadrati centrali per ogni lato del provino ed è stata fatta la media, alle estremità non l'abbiamo considerato perché avviene la sovrapposizione degli effetti nelle due direzioni quindi la profondità aumenta.

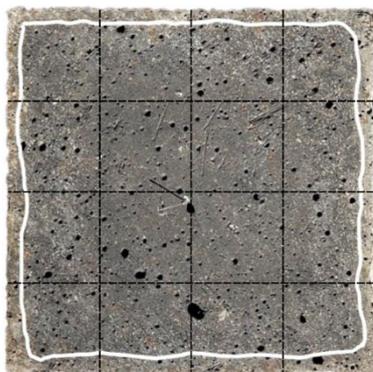


Figura 5.4.1 – *Provino suddiviso a scacchiera per la determinazione della profondità dello ione cloruro*



Figura 5.4.2 – *Provino A a 1 mese prova colorimetrica*



Figura 5.4.3 – *Provino B a 1 mese prova colorimetrica*



Figura 5.4.4 – *Provino C a 1 mese prova colorimetrica*



Figura 5.4.5 – *Provino A a 2 mesi prova colorimetrica*



Figura 5.4.6– *Provino B a 2 mesi prova colorimetrica*



Figura 5.4.7 – *Provino C a 2 mesi prova colorimetrica*



Figura 5.4.8 – *Provino A a 3 mesi prova colorimetrica*



Figura 5.4.9 – *Provino B a 3 mesi prova colorimetrica*

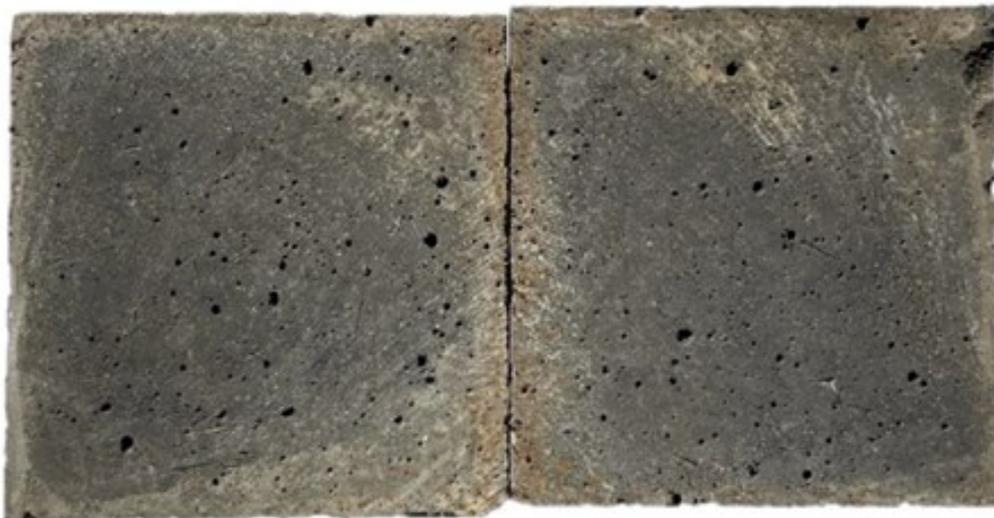


Figura 5.4.10 – *Provino C a 3 mesi prova colorimetrica*

Ottenuta la media di tutti i provini sono stati inserite nei seguenti grafici:

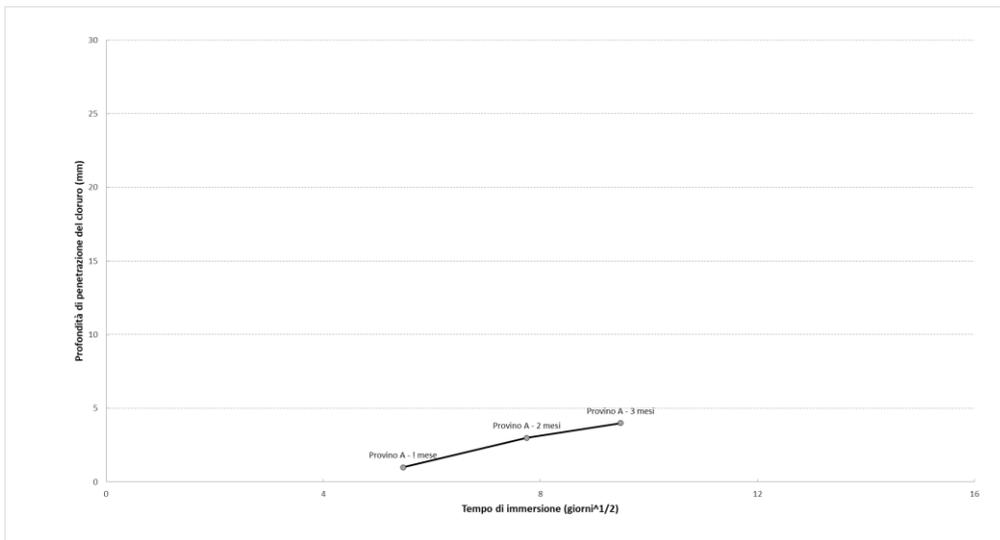


Figura 5.4.11 – Confronto tra la profondità di penetrazione media del cloruro provino A

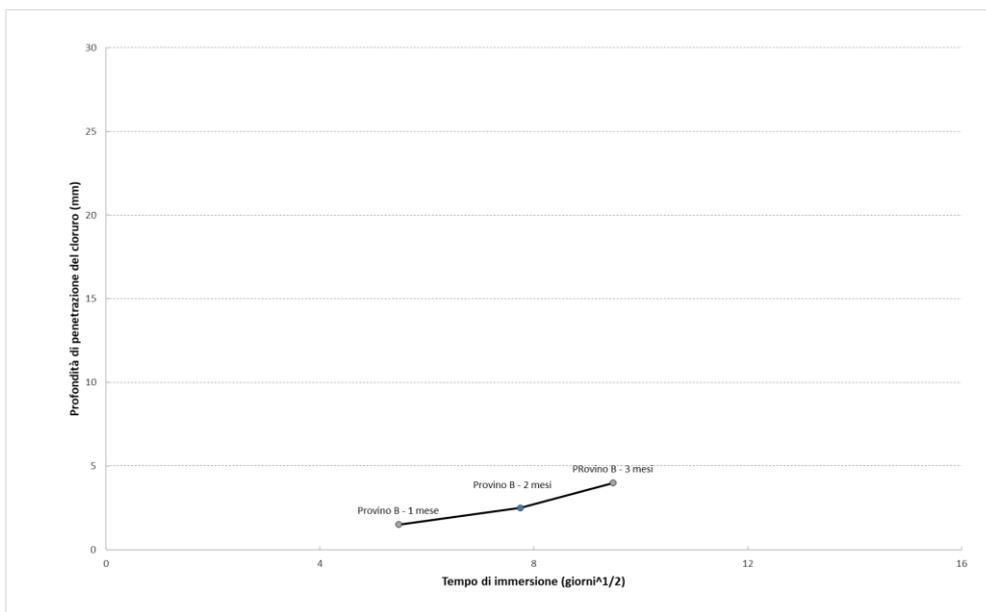


Figura 5.4.12 – Confronto tra la profondità di penetrazione media del cloruro provino B

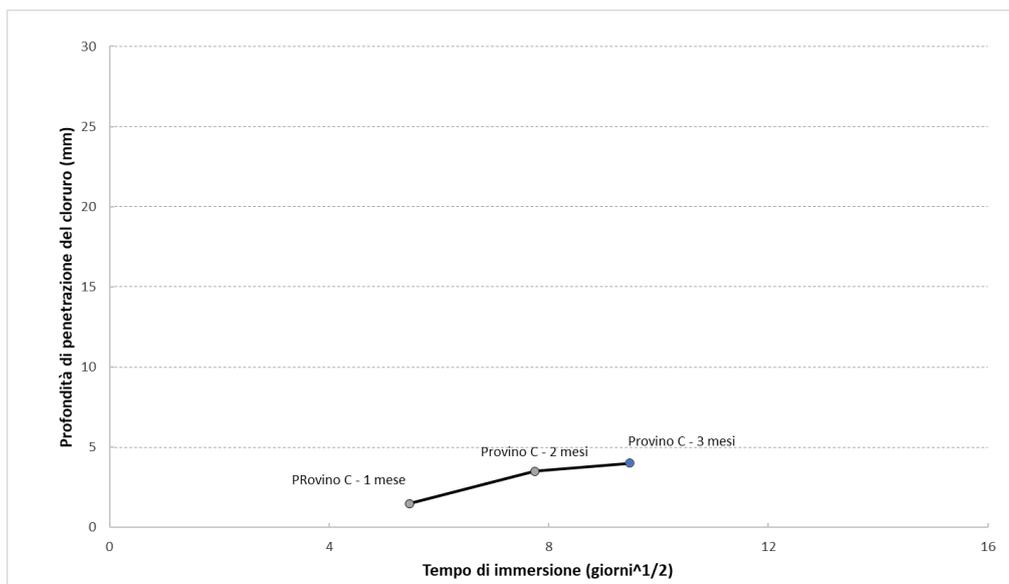


Figura 5.4.13 – Confronto tra la profondità di penetrazione media del cloruro provino C

Da questi grafici ci siamo ricavati la linea di tendenza che passa per l'origine e segue al meglio l'andamento dei tre punti. Abbiamo ottenuto l'equazione della retta e la sua pendenza.

Data la pendenza della retta (K), è correlabile con il coefficiente di diffusione (D) del cloruro che appare nella soluzione della seconda legge di Fick:

$$x = K \cdot t^{1/2} = 4(Dt)^{1/2}$$

Mediante il saggio colorimetrico con nitrato d'argento e fluoresceina consente di calcolare molto semplicemente il coefficiente di diffusione (D) mediante la l'equazione:

$$D=K^2/16$$

Tabella 6 – Valori coefficiente di diffusione del cloruro

| Coefficiente di diffusione del cloruro (D mm ² /anno) | |
|--|------|
| Provino A | 3,94 |
| Provino B | 3,54 |
| Provino C | 4,38 |

| | |
|-----------|------|
| Provino A | 3,94 |
| Provino B | 3,54 |
| Provino C | 4,38 |

5.4.1 Discussione dei risultati

Tabella 7 – Valori coefficiente di diffusione del cloruro

| Coefficiente di diffusione del cloruro (D mm ² /anno) | |
|--|------|
| Provino A | 3,94 |
| Provino B | 3,54 |
| Provino C | 4,38 |

Tabella 8 – Coefficienti di diffusione del cloruro “Il nuovo calcestruzzo” di Colleparidi

| Cemento | Grado di compattazione | Temperatura °C | D mm ² /anno |
|---------------------|------------------------|----------------|-------------------------|
| Portland CEM I | 1,00 | 10 | 25 |
| Portland CEM I | 1,00 | 25 | 50 |
| Portland CEM I | 1,00 | 40 | 100 |
| Portland CEM I | 0,95 | 25 | 100 |
| pozzolanico CEM IV | 1,00 | 10 | 20 |
| pozzolanico CEM IV | 1,00 | 25 | 30 |
| pozzolanico CEM IV | 1,00 | 40 | 40 |
| pozzolanico CEM IV | 0,95 | 25 | 60 |
| d’altoforno CEM III | 1,00 | 25 | 20 |
| d’altoforno CEM III | 0,95 | 25 | 50 |

* con $\alpha/c=0,40$ i valori di D sono di un ordine di grandezza minore

Abbiamo confrontato i coefficienti di diffusione di cloruro che ci siamo ricavati con quelli in letteratura presenti nel libro “il nuovo calcestruzzo” di Collepardi.

Abbiamo riscontrato che con un basso rapporto di a/c= 0,30 e l’aggiunta di fumo di silice, UHPFRC è più durevole dei calcestruzzi ordinari. Il coefficiente di diffusione del cloruro medio è $D=3,95 \text{ mm}^2/\text{anno}$.

5.5 Risultati analisi porosimetriche a mercurio

Lo scopo di queste analisi è quella di valutare la porosità aperta e chiusa totale dei provini presi superficialmente ed internamente. Per poter confermare le ipotesi fatte in precedenza sulla corrosione dello ione cloruro.

| Campione | Porosità totale [%] | Densità apparente [g/cm^3] | Area superf. tot. dei pori [m^2/g] | Diametro medio dei pori [μm] |
|----------------|---------------------|--|--|---|
| 1 mese interno | 11,96 | 2,57 | 1,55 | 0,13 |
| 1 mese esterno | 6,86 | 2,52 | 3,93 | 0,03 |
| 2 mesi interno | 9,61 | 2,57 | 2,87 | 0,06 |
| 2 mesi esterno | 6,86 | 2,49 | 4,44 | 0,02 |
| 3 mesi interno | 10,35 | 2,49 | 3,08 | 0,06 |
| 3 mesi esterno | 5,75 | 2,53 | 4,12 | 0,02 |

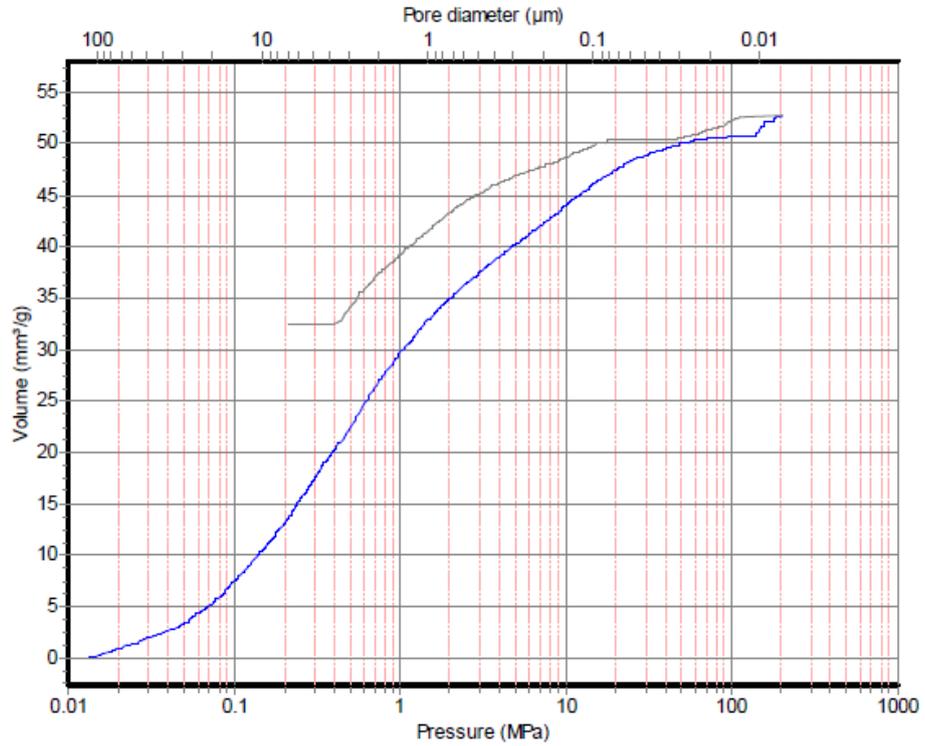


Figura 5.5.1 – Volume (mm^3/g) in funzione del Diametro dei pori (μm) e della pressione (Mpa), provino 1 mese interno

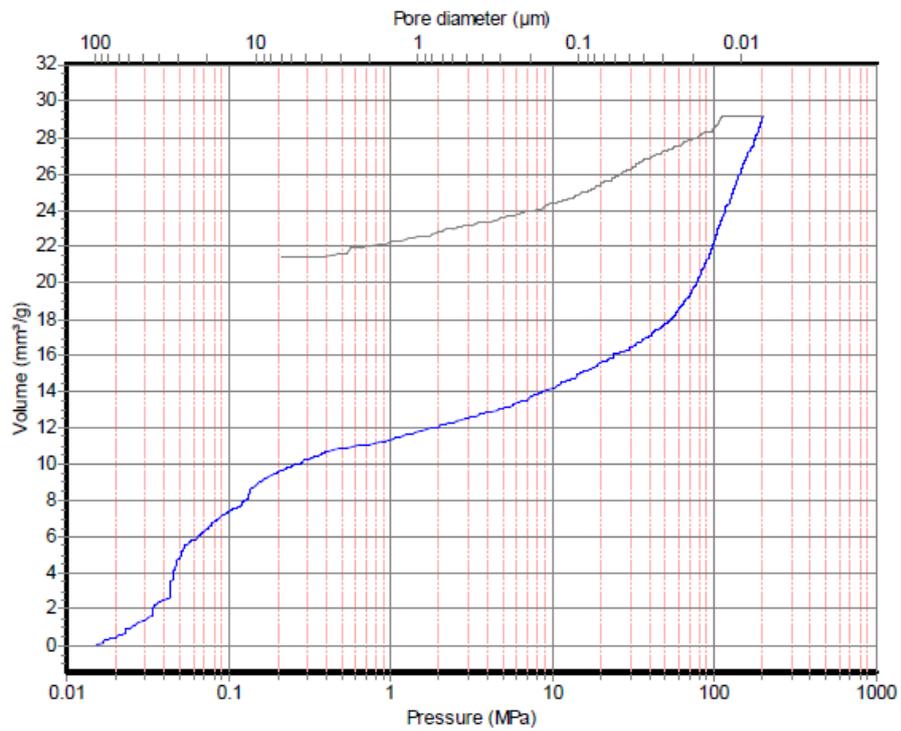


Figura 5.5.2 – Volume (mm^3/g) in funzione del Diametro dei pori (μm) e della pressione (Mpa), provino 1 mese esterno

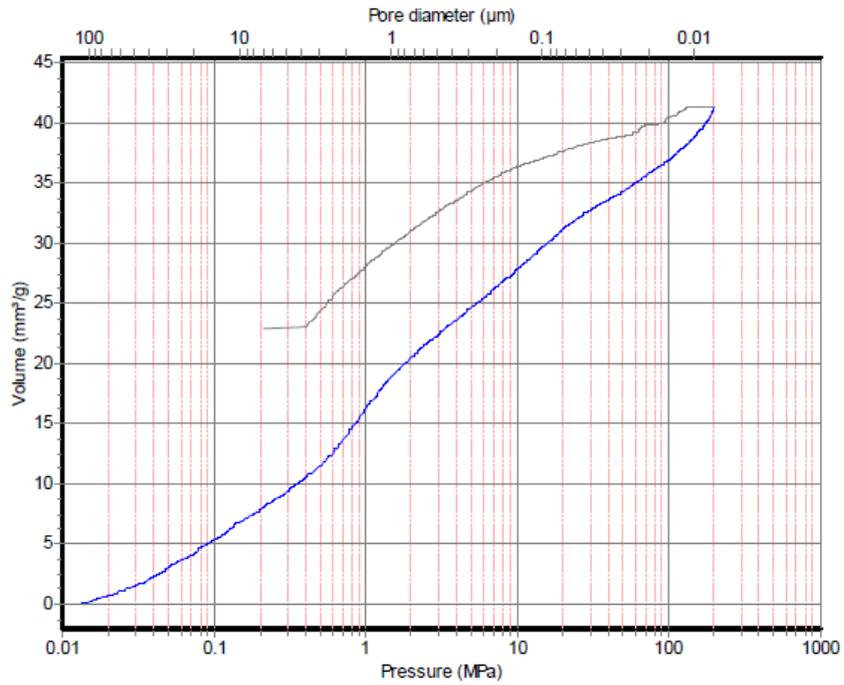


Figura 5.5.3 – Volume (mm^3/g) in funzione del Diametro dei pori (μm) e della pressione (Mpa), provino a 2 mesi interno

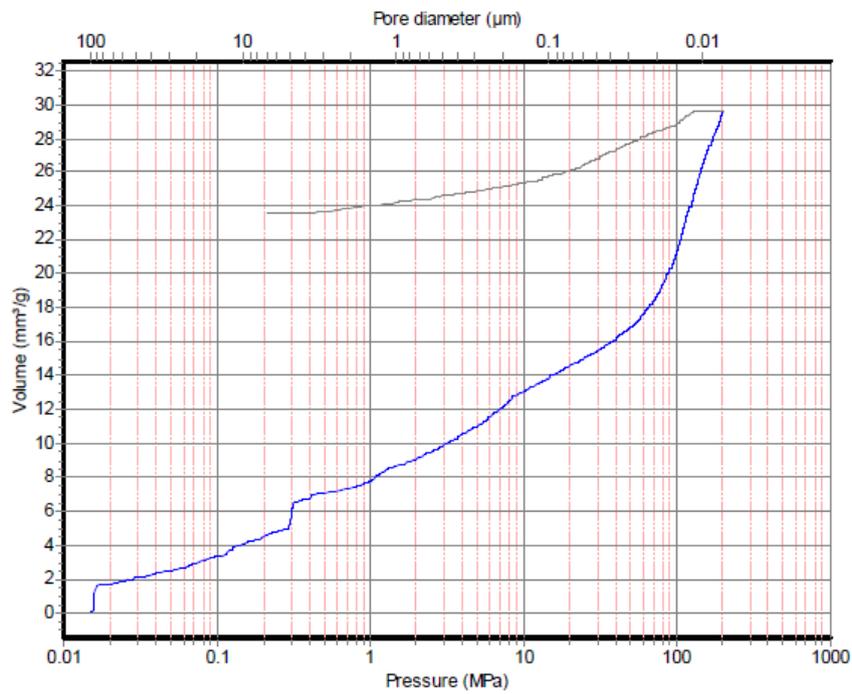


Figura 5.5.4 – Volume (mm^3/g) in funzione del Diametro dei pori (μm) e della pressione (Mpa), provino a 2 mesi esterno

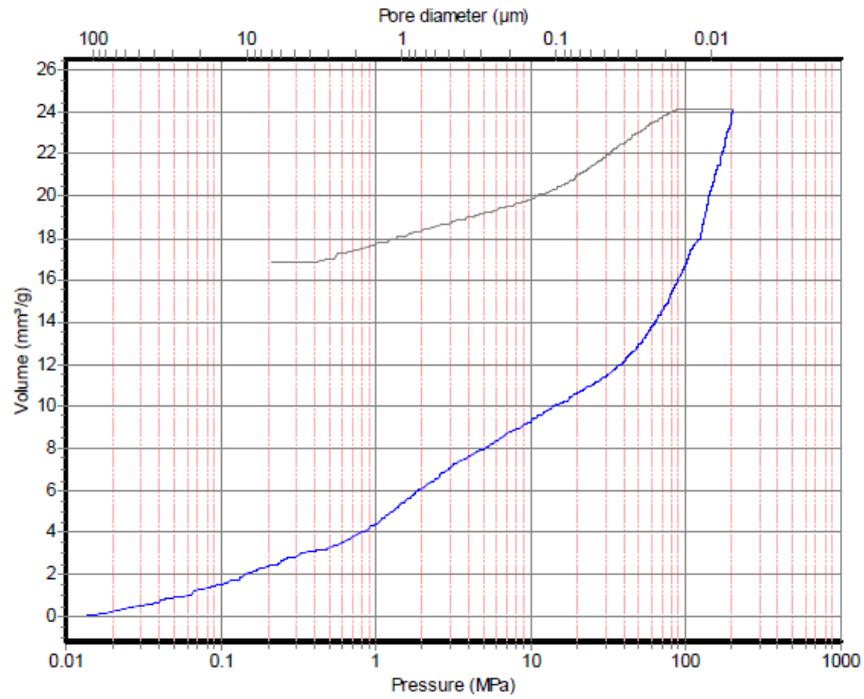


Figura 5.5.5 – Volume (mm^3/g) in funzione del Diametro dei pori (μm) e della pressione (Mpa), provino a 3 mesi esterno

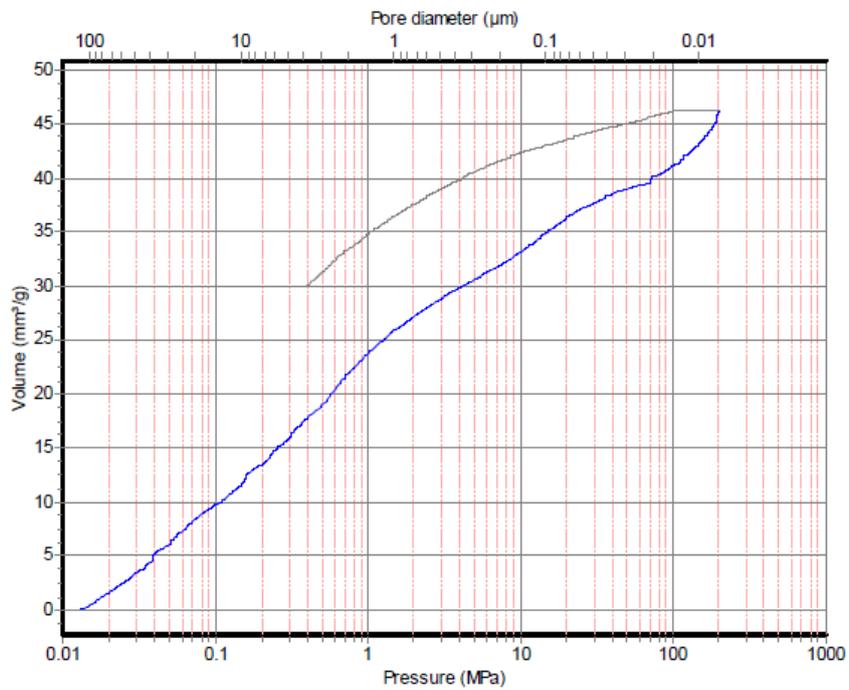


Figura 5.5.6 – Volume (mm^3/g) in funzione del Diametro dei pori (μm) e della pressione (Mpa), provino a 3 mesi interno

5.5.1 Discussione dei risultati

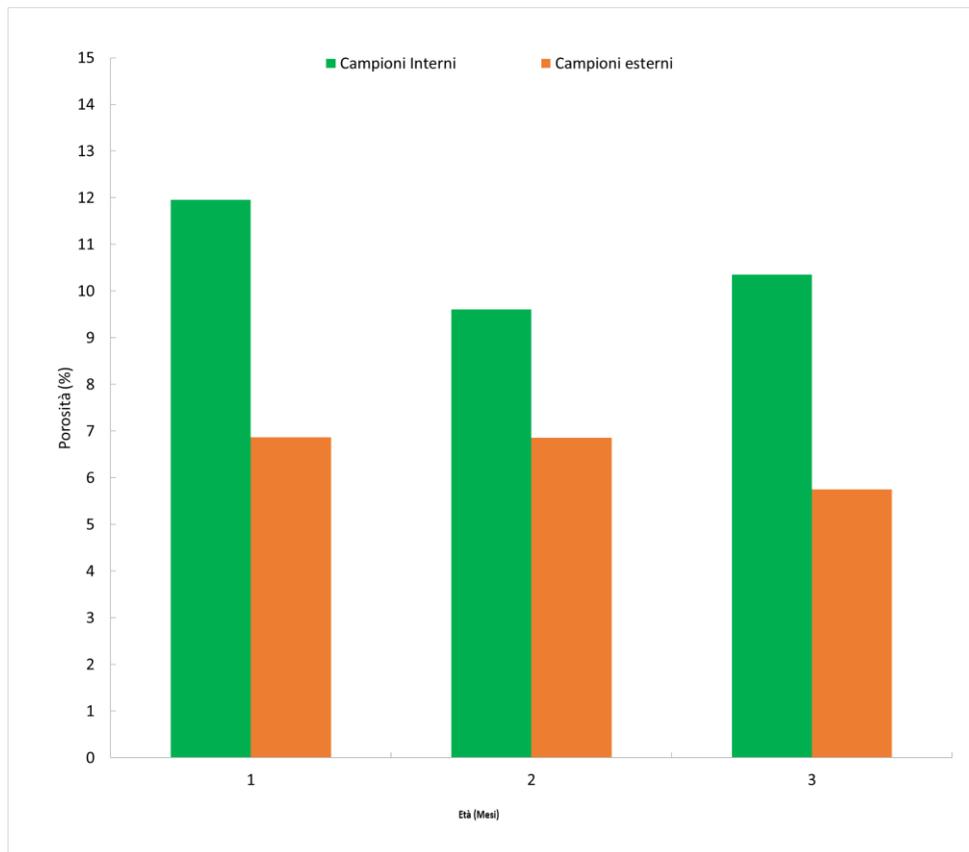


Figura 5.5.1.1 – Confronto porosità (%) tra campioni presi esternamente e internamente

Da una prima analisi si è riscontrato che all'interno del nostro provino la porosità è aperta per la scarsa idratazione del calcestruzzo dovuta al basso rapporto acqua/cemento.

Mentre nei campioni prelevati esternamente al nostro provino la porosità è chiusa perché ha una percentuale più bassa dei campioni presi internamente. Il campione stando immerso in acqua continua con l'idratazione, ogni mese si avrà una progressiva idratazione. Questo risultato ci ha permesso di confermare che nei provini $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ le fibre interne non sono state corrose, l'effetto confinamento si è svolto correttamente, a differenza dei provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ avendo una dimensione ridotta la fibra si è degradata infatti la resistenza a compressione nei provini immersi in NaCl è diminuita mese per mese per effetto della corrosione della fibra. Nel campione prelevato internamente al terzo

me se si può notare un aumento di percentuale perché essendo il materiale non omogeneo può avere punti meno compatti o più compatti quindi la variazione è possibile.

5.6 Risultati macroscopio ottico

Abbiamo analizzato al macroscopio ottico sei campioni di fibra presi esternamente ed internamente ai provini immersi in NaCl a 1,2,3 mesi.



Figura 5.6.1 – *Provino a 1 mese interno*



Figura 5.6.2 – *Provino a 1 mese esterno*



Figura 5.6.3 – *Provino a 2 mesi interno*



Figura 5.6.4 – *Provino a 2 mesi esterno*



Figura 5.6.5 – *Provino a 3 mesi interno*



Figura 5.6.6 – *Provino a 3 mesi esterno*

5.6.1 Discussione dei risultati

Dai risultati ottenuti la fibra presa da un campione interno è rimasta incontaminata in tutti e tre mesi di immersione, la porosità all'interno dei provini è una porosità chiusa, questo dato è stato confermato anche dalla porosimetria a mercurio. La fibra presa da un campione esterno ha un principio di corrosione solo in alcuni tratti e non si è disgregata, continua a svolgere la sua funzione di confinamento.

Questa analisi ha confermato ulteriormente i risultati ottenuti dalle prove meccaniche.

CAPITOLO 6

6.1 Conclusioni

Questo studio sperimentale ha avuto come obiettivo la valutazione degli effetti del cloruro nei calcestruzzi ad elevate prestazioni, in termini di prestazione meccaniche e chimico-fisiche.

A questo scopo sono state eseguite prove di compressione e flessione su provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, prove di compressione, prove colorimetriche per valutare la penetrazione dello ione cloruro, prove sul porosimetro al mercurio ed analisi al macroscopio ottico su provini $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$.

Tutti i provini avevano stessa composizione, sono stati immersi in H_2O e in 5% di NaCl per accelerare le prove. I risultati ottenuti dallo studio sperimentale hanno confermato che gli

UHPFRC hanno delle proprietà di miglior durata grazie alla porosità molto bassa e microstruttura più densa.

Lo ione cloruro è penetrato solo superficialmente sui provini grazie alla sua porosità chiusa e non interconnessa con l'interno, dove si hanno le fibre integre non corrose.

Le proprietà meccaniche hanno una diminuzione della resistenza a compressione sui provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ perché l'effetto confinamento della fibra viene ridotto a causa della corrosione, mentre nei provini $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ l'effetto confinamento non si modifica perché all'interno le fibre non sono corrose.

La resistenza a flessione ha dato due comportamenti differenti:

- Strain hardening (effetto incrudente) per i provini immersi in H_2O ;
- Strain softening (effetto degradante) per i provini immersi in NaCl causa corrosione delle fibre.

La porosimetria al mercurio ha confermato le ipotesi fatte per le prove meccaniche si ha una porosità chiusa all'esterno perché la matrice cementizia continua ad idratarsi, mentre l'interno della matrice avrà una porosità aperta a causa del basso rapporto acqua/cemento.

La visualizzazione al microscopio ottico ci ha permesso di valutare lo stato delle fibre, fibre esterne corrose in alcuni tratti, le fibre interne totalmente integre ed ancora ricoperte di ottone.

6.2 Possibili lavori futuri

I calcestruzzi ad altissime prestazioni sono un materiale relativamente giovane che, pur beneficiando degli strumenti metodologici e scientifici più recenti, presentano ancora dei comportamenti e delle caratteristiche da investigare o quanto meno precisare, sia in merito al materiale stesso ed ai suoi componenti sia per quanto riguarda la durabilità e il suo impiego nelle strutture.

Certamente l'introduzione nella normativa italiana di questi compositi con un approccio a prestazione (performance based design) apre la strada a nuovi conglomerati cementizi che potranno incrementare la durabilità delle opere in calcestruzzo, limitando le aperture in condizioni di esercizio e ottimizzare la quantità di armatura nelle strutture in c.a. grazie ad una tenacità locale che va a ridurre sensibilmente la fragilità tipica dei manufatti in calcestruzzo di grandi dimensioni. Inoltre, la possibilità della sostituzione dei rinforzi tradizionali (barre d'armatura) con le fibre, comporta una maggiore facilità di esecuzione se confrontata con l'impiego dei tradizionali rinforzi attivi e passivi di cui necessitano le strutture in c.a., soprattutto quelle molto complesse e articolate, rappresentando una delle principali promesse e sfide del settore delle costruzioni.

Sviluppi successivi potrebbero riguardare la caratterizzazione sperimentale delle prove di ritiro igrometrico con diversi dosaggi di additivo antiritiro e di espansivo, per poter dimostrare che il materiale non si fessura per ritiro, quindi il passaggio dei cloruri sarà impedito dalla sua bassa porosità se si dimostra che non avvengono fessurazioni da ritiro.

BIBLIOGRAFIA

1. Adeline R., I. M. (1998). Design and behavior of the Sherbrooke Footbridge.
2. AFGC. (2013). Ultra-high-performance fiber-reinforced concretes. Recommendations. Paris.
3. CNR-DT 204/2006. (18 Giugno 2007 - rev. 4 Febbraio 2008). Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato. Roma.
4. CNR-DT 209/2013. (10 Ottobre 2013). Istruzioni per l'impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni. Roma.
5. COIN Project report no 44. (2012). Ultra-High-Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) - State of the art.
6. Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, S. T. (Gennaio 2019). Linee guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete).
7. Doo-Yeol Yoo, N. B. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review.
8. Fehling E., S. M. (2004). Ultra-high-performance concrete (UHPC). Proceeding of international Symposium on UHPC. Germany.
9. Francesco Marotti de Sciarra, R. E. (2015). I calcestruzzi ad altissima resistenza: proprietà e comportamento meccanico.
10. Jacques Resplendo, F. T. (2013). The UHPFRC revolution in structural design and construction.
11. Kylyc A., T. A. (2008). The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. Cement and Concrete Composites.
12. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, D. 1. (s.d.). Norme Tecniche per le Costruzioni.
13. Naaman A.E., R. H. (2003). Setting the stage: toward performance classification of FRC composites.

14. Park J.J., K. S. (2008). Influence of the ingredients on the compressive strength of UHPC as a fundamental study to optimize the mixing proportion.
15. Siddique R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: review of hardened properties.
16. UNI 11039-1. (2003). Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio - Definizioni, classificazione e designazione.
17. UNI 8520-1. (2015). Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 1: Designazione e criteri di conformità.
18. UNI 8520-2. (2016). Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 2: Requisiti.
19. UNI 8520-22. (2017). Aggregati per calcestruzzi - Parte 22: Metodologia di valutazione della potenziale reattività alcali-silice degli aggregati.
20. UNI EN 1015-11. (2007). Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita.
21. UNI EN 12620. (2013). Aggregati per calcestruzzo.
22. UNI EN 197-1. (2011). Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni.
23. Wille K., E.-T. S. (2014). Properties of strain hardening ultra-high-performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cement and Concrete Composites*.
24. Mario Collepardi, Silvia Collepardi, Roberto Troli. Il nuovo calcestruzzo, sesta edizione. ENCO 2015.
25. Mario Collepardi. Il calcestruzzo vulnerabile: prevenzione, diagnosi del degrado e restauro. ENCO 2005.
26. Safeer Abbas, Ahmed M. Soliman, Moncef L. Nehdi (2014). Exploring mechanical and durability properties of ultra-high-performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages.
27. Mo Alkaysi, Sherif El-Tawil, Zhichao Liu, Will Hansen (2015). Effects of silica powder and cement type on durability of ultra-high-performance concrete (UHPC).

28. Sukhoon Pyo, Million Tafesse, Heeae Kim, Hyeong-Ki Kim (2017). Effect of chloride content on mechanical properties of ultra-high-performance concrete.
29. Sukhoon Pyo a, Taehoon Koh b, Million Tafesse c, Hyeong-Ki Kim (2019).
30. Chloride-induced corrosion of steel fiber near the surface of ultra-high-performance concrete and its effect on flexural behavior with various thickness.
31. Sivakumar Anandan, Sounthararajan VallarasuManoharan and Thirumurugan Sengottian (2014). Corrosion Effects on the Strength Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete Containing Slag and Corrosion Inhibitor.
32. Muazzam Ghous Sohail, Ramazan Kahraman, Nasser Al Nuaimi, Bora Gencturk, Wael Alnahhal (2020). Durability characteristics of high and ultra-high-performance concretes.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio la professoressa Valeria Corinaldesi per avermi dato la possibilità di fare questa esperienza in laboratorio e il dottorando Nicola Generosi che mi ha aiutato nello sviluppo del lavoro ed è sempre stato professionale e disponibile.

Grazie a tutti i miei familiari, ed in particolar modo ai miei genitori che con grande affetto mi hanno sempre supportato, sopportato, sostenuto, incoraggiato e mi hanno permesso di percorrere e concludere questo cammino.

Un ringraziamento particolare a Sara, la migliore compagna di studi e di appartamento, perché è sempre stata presente senza essere invadente né inopportuna e che ha reso indimenticabili questi anni di università.

Grazie poi ai miei compagni di studi Chiara, Rossella, Arianna, Marco, Valerio, Nicolò e Luca per aver reso più sopportabili le lunghe giornate di lezione e di progetti.

Il ringraziamento più grande è per Luis, che negli ultimi anni mi è stato sempre vicino aiutandomi a sdrammatizzare e superare i momenti più impegnativi; grazie per essere sempre stato al mio fianco con pazienza ed amore.

Un pensiero ed un ringraziamento vanno ai miei nonni, spero che siano orgogliosi della donna che sono diventata, sicuramente a me vicini in qualche posto nel mondo.