



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

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

**STUDIO DELLA DURABILITA' DI MISCELE CEMENTIZIE AD
ALTISSIME PRESTAZIONI**

STUDY OF THE DURABILITY OF ULTRA HIGH PERFORMANCE
CEMENT MIXTURES

Relatore:

Prof. Valeria Corinaldesi

Tesi di laurea di:

Riccardo Primucci

INDICE

Capitolo 1	3
Introduzione	3
Generalità e obiettivi	3
UHPFR	3
Applicazione UHPFRC	5
Capitolo 2	7
Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete	7
Matrice cementizia	8
Fibre	9
Aggregati	11
Additivi	12
Fumo di silice	14
Capitolo 3	16
Proprietà meccaniche e chimico fisiche	16
Comportamento meccanico	16
Comportamento a compressione	19
Comportamento ideale a trazione	21
Durabilità del materiale	23
Ritiro	23
Stagionatura	25
Quadro normativo	26

Capitolo 4.....	32
Applicazioni sperimentali	32
generale	32
Confezionamento dei provini	32
Materiali utilizzati	32
Mix design.....	37
Fasi operative	38
Classificazione provini	40
Prove eseguite	41
Lavorabilità.....	41
Prova a flessione	43
Prova a compressione.....	45
Prova di ritiro	46
Capitolo 5.....	47
Analisi dei risultati.....	47
Risultati prova di flessione	47
Discussione dei risultati	61
Risultati prove di compressione 4x4x16 cm3	63
Discussione dei risultati	76
Risultati prove di determinazione del ritiro/espansione assiale.....	77
Discussione dei risultati	82
Capitolo 6.....	84
Conclusioni.....	84
BIBLIOGRAFIA	85

Capitolo 1

Introduzione

Generalità e obiettivi

Nel campo delle costruzioni uno dei problemi più importanti è da sempre legato alla durabilità dei materiali da costruzione. In un paese come l'Italia dove la maggior parte delle opere ingegneristiche maggiori come ponti, dighe e gallerie sono realizzate in cemento armato tradizionale occorre valutare tale caratteristica. In generale il cemento armato presenta una porosità superficiale che consente un facile ingresso per gli agenti aggressive nonché un'elevate vulnerabilità alle fessure da ritiro. Questa tesi è volta a valutare e studiare le proprietà di un calcestruzzo non più tradizionale, ma migliorato attraverso un'intense attività di studio, ricerca e sperimentazione. Tale materiale viene chiamato UHPFRC (Ultra- High Performance Fiber Reinforced Concrete), ovvero un particolare tipo di UHPC con l'aggiunta di fibre.

UHPFR

Gli UHPC (Ultra High Performance Concrete) sono calcestruzzi ad altissime prestazioni che presentano una migliore risposta meccanica rispetto ai calcestruzzi tradizionali. La nascita degli UHPC è molto recente ed il loro primo impiego è da datarsi alle fine degli anni '90, dapprima in Francia e successivamente negli USA. Tale materiale rientra nella categoria dei materiali cementizi innovativi e nasce per ovviare alle problematiche connesse all'impiego dei calcestruzzi ordinari soprattutto in termini di scarsa duttilità e durabilità. 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, nonché particolare classe degli UHPC. 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 sotto l'effetto del ritiro 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. Le caratteristiche riscontrate in letteratura che accomunano tali materiali sono le seguenti:

- l'aggiunta sistematica di fibre metalliche al fine di garantire un comportamento non fragile alla miscela, aumentare la resistenza a trazione, a flessione e a taglio;
- resistenza a trazione diretta maggiore a 7-8 MPa;
- rapporto a/c inferiore di 0,25, tipicamente compreso tra 0,16 e 0,20 per garantire una porosità capillare prossima allo zero;
- elevata densità della miscela, ottenuta con alto contenuto di componenti finissimi;
- l'uso di additivi di ultima generazione per ridurre il rapporto a/c.

Le differenze principali tra gli UHPFRC e i calcestruzzi ordinari consistono nella quantità di materiali ultra-fini, la dimensione degli aggregati e la presenza di fibre. Paragonata a un calcestruzzo ordinario, la matrice degli UHPFRC è molto più densa. Un importante uso di additivi super-fluidificanti per raggiungere un livello di lavorabilità accettabile è un'altra caratteristica fondamentale degli UHPFRC.

I principali benefici che contraddistinguono un UHPFRC rispetto ad un calcestruzzo tradizionale.

- Resistenza a flessione e a trazione notevolmente aumentata rispetto ad un calcestruzzo ordinario appartenente alla stessa classe di resistenza (in fase di calcolo il contributo del calcestruzzo nella zona tesa non è più trascurabile né allo stato limite di esercizio né allo stato limite ultimo).
- Riduzione della sezione degli elementi strutturali (grazie alle ultraprestazioni) e quindi alleggerimento complessivo della struttura con risparmi ingenti specialmente in fase di trasporto ed assemblaggio. La competitività economica legata agli spessori inferiori può essere rafforzata anche passando da materiali premiscelati e confezionati in sacchi, e quindi con un costo di trasporto

inferiore. Tale approccio, oltre ad aumentare la competitività, può aiutare anche la diffusione e l'impiego più capillare di tale tecnologia.

- Risparmio economico legato al minore impiego di armature metalliche, in particolare all'eliminazione delle staffe (minori costi nell'acquisto del materiale ma anche processo produttivo semplificato, con ulteriori risparmi di manodopera e di tempi di realizzazione).

Comportamento post-fessurativo incrudente che garantisce una notevole tenacità a rottura ed un ottimo comportamento a fatica (maggiore resistenza alle vibrazioni legate a vento, sisma e traffico veicolare).

Applicazione UHPFRC

Una caratteristica che contraddistingue questo materiale è la possibilità di avere un materiale altamente resistente, modellabile e con dimensioni in sezione notevolmente ridotte, ha reso possibile per gli architetti e designer una nuova serie di forme e volumi precedentemente inaspettati, con una grande varietà estetica. Si ricordano a tal proposito, la pensilina per la stazione ferroviaria LTR a Calgary in Canada, il *Flying carpet* dell'Ungerer Museum a Strasburgo, le coperture di Maison Navarra di R. Ricciotti, la facciata del deposito di autobus a Thiais in Francia (Figura 1).



Figura 1 - Esempi di applicazioni non strutturali

Sono state realizzate diverse opere dal punto di vista dell'ingegneria civile come, ad esempio, il ponte pendolare di Sherbrooke in Canada (Figura 2), *Peace Footbridge* costruito a Seoul, Corea del Sud e *Wapello County Bridge* (Figura 3) nell'Iowa.

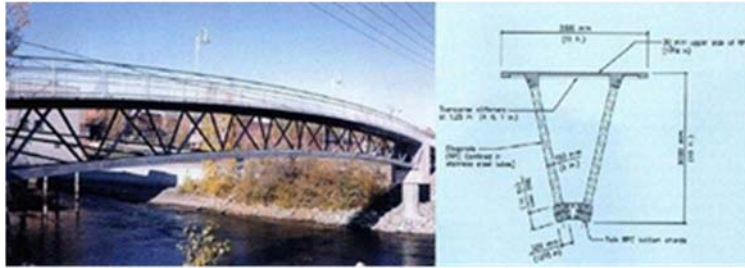


Figura 2 - Ponte pedonale di Sherbrooke (Canada)



Figura 3 - Wapello County Bridge (Iowa, USA)

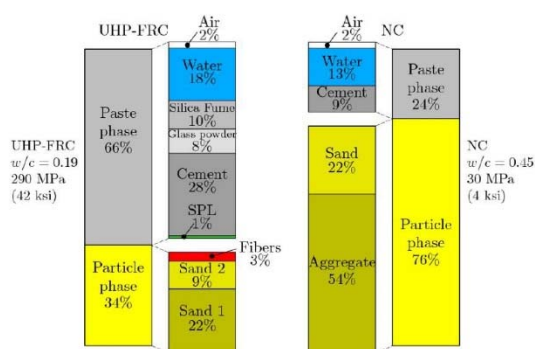
Capitolo 2

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.

Il presente studio si propone di indagare l'effetto dell'uso di fibre metalliche sul ritiro del calcestruzzo.

A tal proposito sono stati eseguiti test di laboratorio, presso l'Università Politecnica delle Marche di Ancona, realizzando provini in calcestruzzo, rinforzati con fibre. Abbiamo fatto una valutazione su provini immersi in acqua e successivamente lasciati in camera climatica (25° C, UR 50%) per valutare al meglio i fenomeni di espansione e ritiro.



Esempio di composizione di un calcestruzzo ordinario NC e un UHP-FRC

Di seguito si riportano alcune note sintetiche in merito ai principali costituenti, individuandone le principali caratteristiche tecniche d'interesse per la produzione degli UHPFRC e segnalandone pregi e difetti per soddisfare pienamente i requisiti prestazionali.

Matrice cementizia

I calcestruzzi ad alta resistenza richiedono l'impiego di cementi ad alta resistenza meccanica. La normativa europea distingue, come è noto, tre classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici come riportato in Tabella 2, tratta dalla UNI EN 197-1 (2011), aggiornamento della norma UNI EN 197-1 (2006).

Tabella 2 - Classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici

Classe	Resistenza a compressione (N/mm ²)			Tempo di inizio presa (min)
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata	
	2 gg	7 gg	28 gg	
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5 ≤ 52,5	≥ 60
32,5 R	≥ 10	-		
42,5 N	≥ 10	-	≥ 42,5 ≤ 62,5	
42,5 R	≥ 20	-		
52,5 N	≥ 20	-	≥ 52,5	≥ 45
52,5 R	≥ 30	-		

Tutti i cementi conformi alla UNI EN 197-1 (2011) possono essere usati. In questo caso, come per i calcestruzzi ordinari, la corretta scelta del tipo di cemento è normalmente dettata da richieste legate a specifiche applicazioni: per getti massivi, ad esempio, possono essere richiesti calori di idratazione ridotti; particolari esigenze tecnologiche possono invece essere legate all'industria della prefabbricazione.

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.

Fibre

Esistono molti tipi di fibre, ognuna 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 rigidità 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 rigidità 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/m³ (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 uncinate, 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.



Fibre in acciaio ottonate

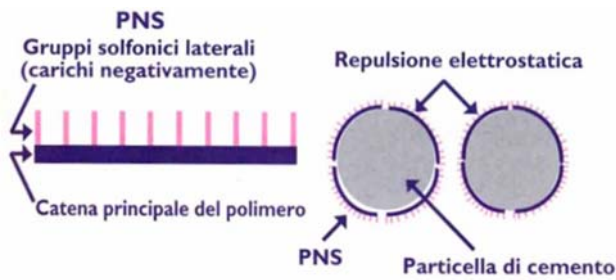
Aggregati

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

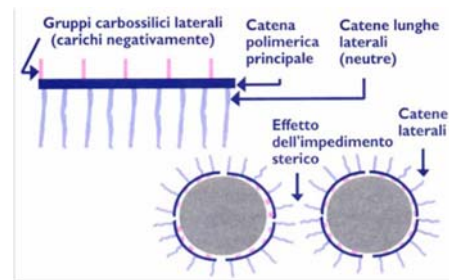
calcestruzzo realizzato con la quarzite: data la superficie levigata, non vi è perfetta aderenza tra pasta ed aggregato e quindi la resistenza complessiva risulta essere inferiore sia alla resistenza dell'aggregato sia a quella della pasta. Il comportamento degli UHPC è funzione anche di altri parametri 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.

Additivi

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.



Repulsione elettrostatica



Impedimento sterico

Gli agenti espansivi normalmente impiegati per il calcestruzzo a ritiro compensato sono di due tipi: il primo comprende l'ossido di magnesio e soprattutto l'ossido di calcio che aumentano (fig 21.1) il volume dell'impasto trasformandosi, per reazione con l'acqua, nei corrispondenti idrossidi come risulta dalle seguenti reazioni:

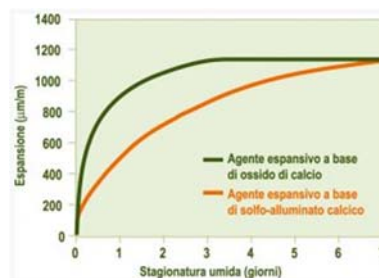
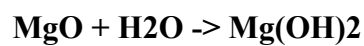
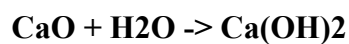


Fig. 21.1 - Esempio di andamento nel tempo dell'espansione di due calcestruzzi contenenti due diversi agenti espansivi in fase di indurimento

Gli altri parametri che possono influire sulla velocità del fenomeno espansivo sono la granulometria e la porosità dell'agente espansivo. Poiché la reazione che provoca l'espansione avviene all'interfaccia acqua-solido (agente espansivo) è evidente che, riducendo la dimensione delle

particelle solide di agente espansivo, si aumenta la superficie esposta all'azione dell'acqua e quindi si accelera il processo riducendo la durata dell'espansione.

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 microsfele più piccole di 0,1 μm . 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.



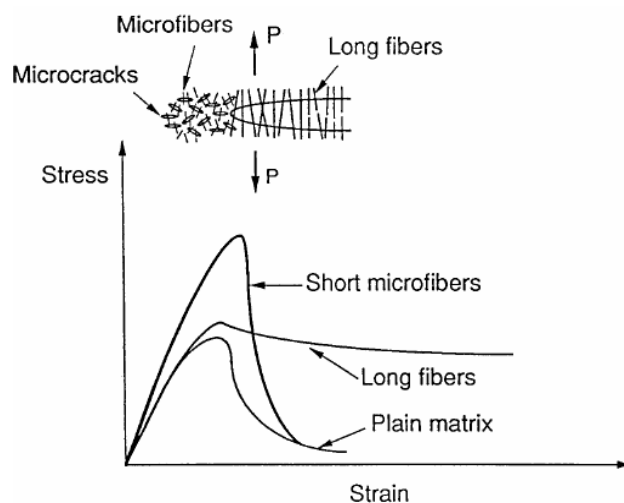
Fumo di silice

Capitolo 3

Proprietà meccaniche e chimico fisiche

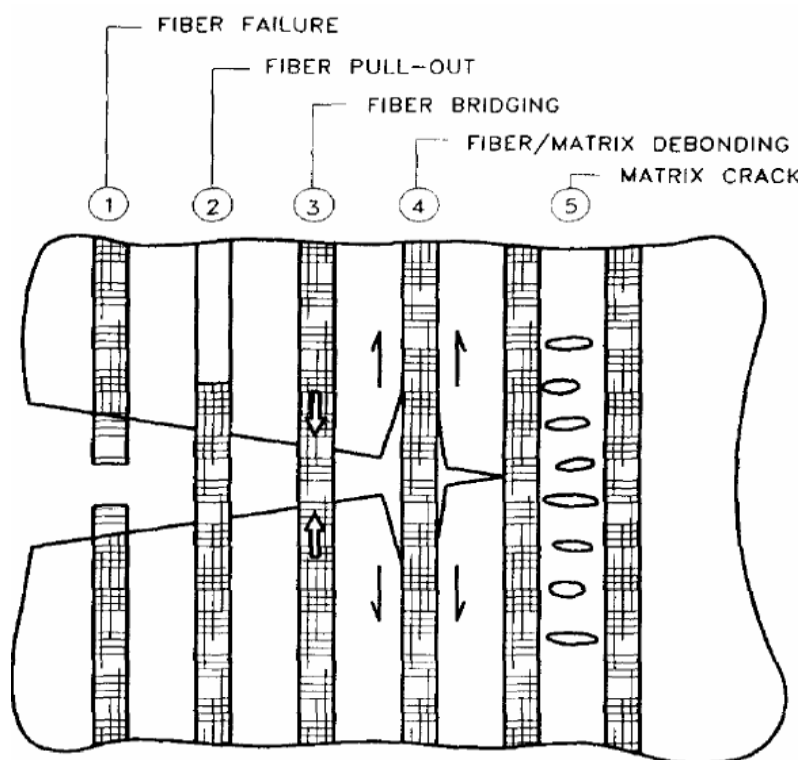
Comportamento meccanico

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 trarre il carico.



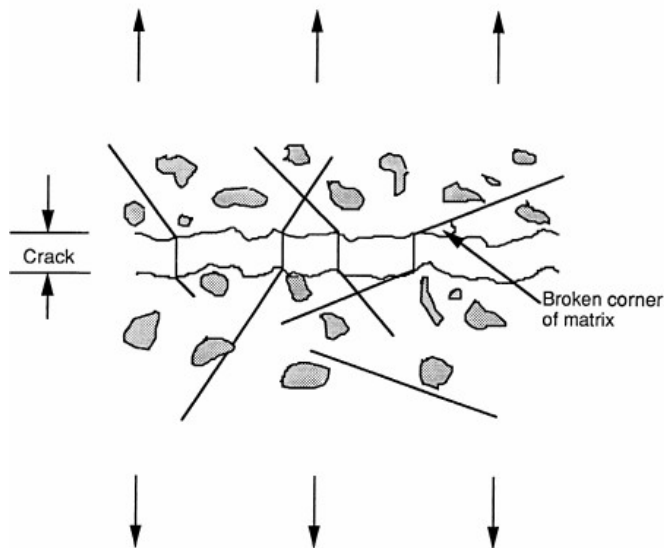
Differenti misure delle fibre e loro comportamento nel grafico sforzo-deformazione

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.



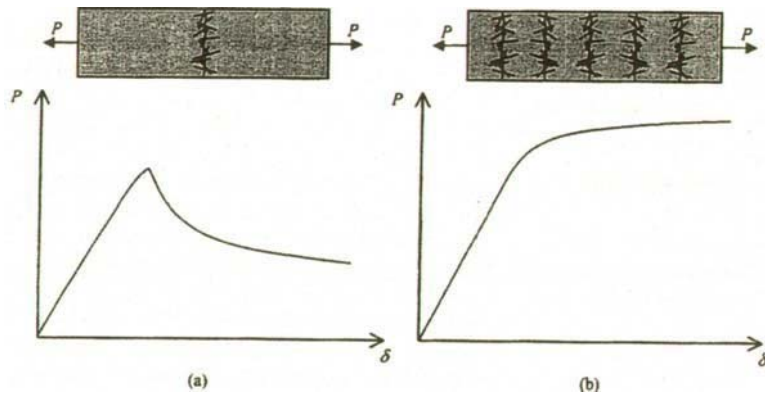
Metodi di assorbimento di energia da parte delle fibre

Nella pratica però un calcestruzzo fibrorinforzato 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.



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.



Comportamento softening (a) e hardening (b)

Comportamento a compressione

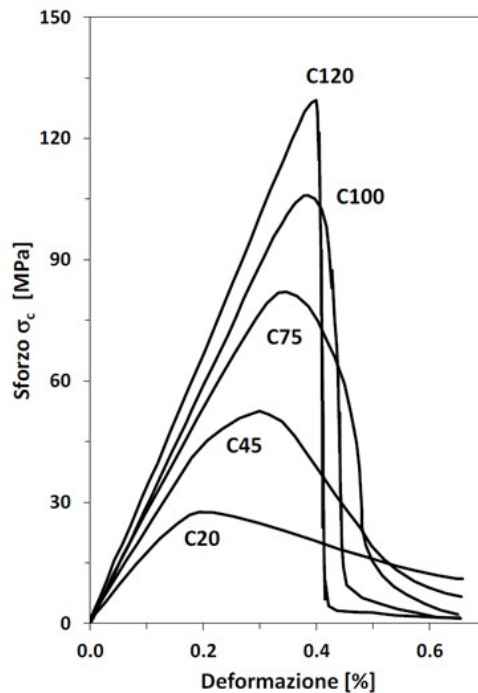
Le prestazioni meccaniche a compressione di un UHPC discendono dal miglioramento della microstruttura della matrice cementizia ed è quindi opportuno a tal proposito analizzare dapprima il comportamento meccanico di un UHPC senza fibre che presenta già delle differenze notevoli rispetto ai calcestruzzi 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 uniassiale 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



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

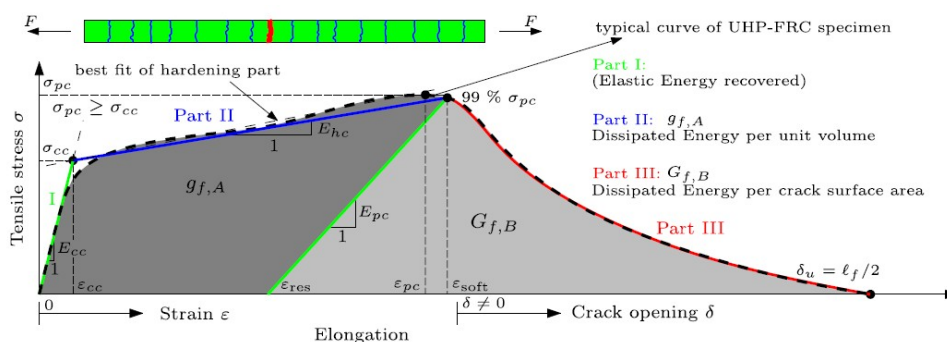
Comportamento ideale a trazione

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



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.

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.

Ritiro

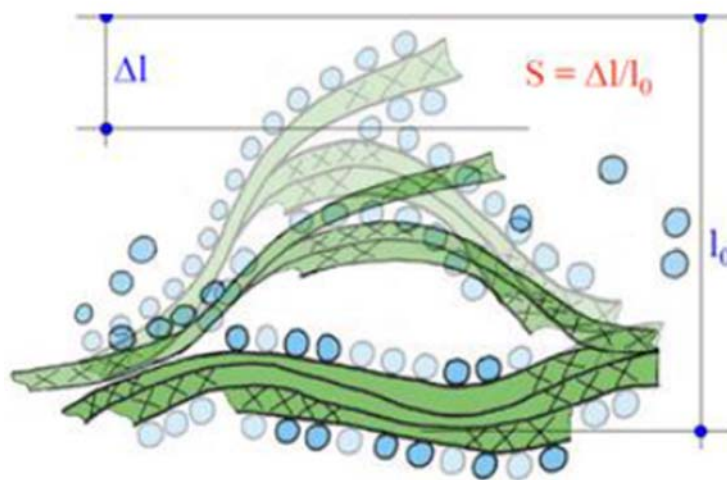
Il ritiro nel calcestruzzo è un fenomeno per cui se il materiale si trovasse in un ambiente secco ($UR < 95\%$) l'acqua all'interno tenderà ad evaporare e questo produce una contrazione del materiale che tenderà a ritirarsi, a fessurarsi a causa di comparsa di tensioni di trazione. È anche vero che il materiale se immerso in acqua rigonfia, ma la stabilità si ha con $UR = 95\%$.

Il ritiro consiste dunque in una variazione volumetrica del materiale dove l'acqua cominciando ad evaporare determina un vuoto all'interno del poro e per effetto della tensione capillare interna il poro

tenderà a contrarsi. Il problema è che il materiale si fessura in seguito a tale fenomeno, ad esempio se una trave vincolata da due pilastri sia soggetta a contrazione la presenza del vincolo fa sì che tale azione di contrazione si trasformi in una tensione di trazione.

Ogni poro, dunque subirà una piccola contrazione e quindi a livello macroscopico

si legge una deformazione significativa $S = \frac{\Delta L}{l_0}$ dove ΔL è l'accorciamento dovuto all'essiccamento e l_0 è la lunghezza iniziale:



Risultato finale essiccamento

Si possono distinguere vari tipi di ritiro a seconda di come si sviluppano e le modalità con cui avvengono:

ritiro termico: avviene entro le primissime ore del getto, non appena il sistema ha fatto presa ed inizia ad indurire è possibile che il materiale si fessuri a causa del basso modulo elastico; è sufficiente che l'acqua riesca ad evaporare dalla superficie. La soluzione consiste nel proteggere queste superfici con teli bagnati o altri sistemi rudimentali. Un modo per prevenire queste fessure è quello di usare delle fibre corte polimeriche.

ritiro autogeno: il ritiro autogeno è una conseguenza della contrazione chimica che avviene nella pasta di cemento quando l'acqua idrata le particelle di cemento. È dovuto al fatto che proprio la reazione chimica del cemento con l'acqua, produce le fibre C-S-H che occupano un volume inferiore rispetto alle particelle iniziali e tale idratazione crea circa l'8% di vuoti capillari. Infatti, il volume assoluto degli idrati formati è minore della somma dei volumi assoluti delle particelle di cemento e

dell'acqua che hanno reagito. È insidioso perché avviene anche se si posiziona un telo impermeabile; si evita quando si nebulizza il getto. Quindi se il rapporto a/c è molto basso, nel caso di UHPC a/c=0,35, questo ritiro inizia a farsi sentire: è un ritiro che riguarda i calcestruzzi ad altissime prestazioni con rapporti a/c molto bassi mentre il calcestruzzo ordinario non è soggetto a tale ritiro. Quando inizia l'auto-essiccamento e parimenti il processo di idratazione, si sviluppano rapidamente dei menischi all'interno dei capillari più piccoli; l'essiccazione dei capillari fini può generare alte tensioni di trazione che fanno ritirare la pasta di cemento idratata se non si nebulizza il getto durante i primi tempi perché tale fenomeno avviene durante la reazione chimica del cemento. Infatti, quando si presenta un apporto esterno di acqua, i capillari non si asciugano quindi non si formano menischi né tensioni di trazione né ritiro autogeno. Quando il rapporto scende sotto lo 0,35% c'è il rischio che, essendo molto densa la struttura, l'acqua non riesca ad entrare con conseguente auto-essiccamento in alcuni punti del calcestruzzo.

ritiro igrometrico: riguarda tutta la vita del calcestruzzo. È la contrazione che subisce il calcestruzzo in un ambiente insaturo di vapore (U.R.< 95%). Avviene una volta che il materiale inizia a indurire anche a tempo infinito. È il responsabile di perdita di resistenza in caso di cattiva stagionatura: se viene nebulizzato il getto solo per 3 giorni e poi lasciato all'aria si hanno problemi in particolare se l'acqua all'interno evapora il cemento non reagisce più non raggiungendo la resistenza desiderata e che il materiale dunque inizia a fessurarsi. È il responsabile di perdita di resistenza in caso di cattiva stagionatura: se viene nebulizzato il getto solo per 3 giorni e poi lasciato all'aria si hanno problemi in particolare se l'acqua all'interno evapora il cemento non reagisce più non raggiungendo la resistenza desiderata e che il materiale dunque inizia a fessurarsi.

Stagionatura

La stagionatura di un UHPFRC è alquanto differente rispetto a quella di un calcestruzzo ordinario a causa, del differente comportamento di ritiro. Se l'UHPFRC non viene da subito stagionato nell'acqua, è incline a sviluppare un discreto ritiro plastico dato che non è protetto dall'acqua di bleeding e successivamente può sviluppare un notevole ritiro autogeno dovuto per lo più alla rapidità con cui avviene l'idratazione. Mentre la membrane utilizzate per la stagionatura provvedono a fornire una adeguata protezione per il calcestruzzo ordinario, nell'UHPFRC possono soltanto prevenire il fenomeno del ritiro plastico ma non riescono ad inibire quello autogeno. Il periodo critico per questi

conglomerati inizia dalla posa in opera fino a 2-3 giorni dopo, tra le 12 e le 36 ore. Applicare acqua nebulizzata al getto, per il breve periodo consigliato, è di importanza notevole; in modo particolare si deve essere consapevoli che possono esserci conseguenze anche drammatiche alla mancata somministrazione di acqua durante l'iniziale processo di maturazione. Iniziare la stagionatura ad acqua dopo 24 ore risulta essere deleterio e tardivo, dato che sono già iniziati sia il ritiro plastico sia quello autogeno e la rete di capillari e pori risulta essere disconnessa in molti punti e la microstruttura è già compatta al punto tale che l'acqua esterna non ha alcuna possibilità di penetrare in profondità nel materiale. La migliore stagionatura dell'UHPC avviene mediante inondamento e nebulizzazione: uno di questi due metodi dovrebbe essere utilizzato il prima possibile, immediatamente dopo la posa in opera o la finitura. Se, per qualsiasi ragione, non è possibile attuare né l'inondamento né la nebulizzazione per un periodo di 7 giorni, allora la superficie del calcestruzzo deve essere coperta con una tela umida o preferibilmente con un tessuto organico (geotessile) precedentemente bagnato, l'importante è mantenerlo sempre umido. Inoltre, è stato osservato che quando un qualsiasi calcestruzzo viene sottoposto a stagionatura all'acqua durante la presa, non si ritira ma piuttosto si gonfia. La stagionatura ad acqua può essere interrotta dopo 7 giorni poiché la gran parte del cemento presente sulla superficie del calcestruzzo è stato idratato e quindi non possono essere ricavati ulteriori vantaggi da tale operazione.

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

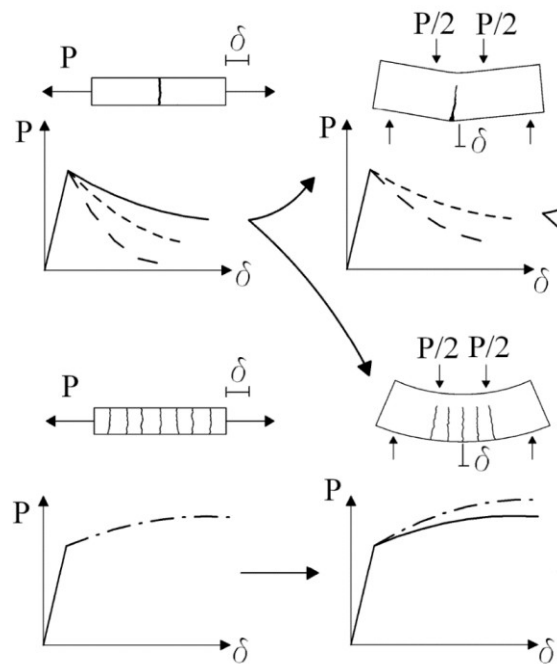
caratterizzato da un dosaggio minimo delle fibre al suo interno. Le norme CNR-DT204/2006 “Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato”, indicano che “per impieghi strutturali deve essere garantito un dosaggio minimo di fibre” e quantificano tale dosaggio come “non inferiore allo 0,3% in volume”. Recentemente è stato approvato il testo della “Linea Guida per l’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.



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 generale

Il lavoro sperimentale condotto presso il Laboratorio di Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU) dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona, si pone l'obiettivo di caratterizzare dal punto di vista del ritiro i provini di materiale UHPFRC, con differenti dosaggi di espansivo. Lo scopo successivo è stato quello di capire come variano le proprietà meccaniche al variare dell'espansivo.

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 60 provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, disarmati dopo 7 ore dal getto. Gli effetti del ritiro autogeno sono stati valutati su provini maturati per tre giorni in ambiente umido poi in camera climatica; i parametri meccanici sono stati valutati su provini maturati in ambiente umido per 3, 7, 28 giorni.

Materiali utilizzati

Vengono descritti di seguito i materiali utilizzati per il confezionamento dei provini. Il cemento utilizzato CEM I 52,5 R, 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 in polvere a base di naftalensolfonato di ultima generazione per migliorare la lavorabilità dell'impasto ed evitare i rischi di segregazione della miscela; additivo chimico antibolle che riduce e ostacola la formazione di schiuma durante la miscelazione; additivo SRA 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 0-2 mm al 70%;



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.



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. Usato in diverse quantità



Agente espansivo

- Per questo lavoro sono state utilizzate fibre in acciaio rivestite di ottone, di dimensioni $l=13$ mm, diametro $\Phi=0,2$ mm, tipologia dritta e rapporto d'aspetto (rapporto tra la lunghezza della fibra e il suo diametro equivalente) pari a 65. 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.



Fibra in acciaio rivestita in ottone

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, sono stati realizzati 4 impasti con le seguenti proporzioni delle componenti:

Materiali	25 Exp	30 Exp	35 Exp	40 Exp
Cemento 52,5 R	720	720	720	720
Sabbia Essiccata (Esincalce)	945	945	945	945
Sabbia Po	410	410	410	410
Pentaflow PC6 (superfluidificante)	11	11	11	11
Antifoam PS5 (antibolle)	6	6	6	6
Pentamix EX5 (SRA)	9	9	9	9
Espansivo nuovo extra (sacco nero)	25	30	35	40
Fumo di silice	100	100	100	100
Acqua	245	245	245	245
Fibre	150	150	150	150

Tabella 4 - Proporzioni componenti UHPFRC (Kg/m³)

Ognuno dei 4 impasti è caratterizzato da una certa quantità di espansivo (kg/m³): 25, 30, 35, 40. In seguito, i getti saranno chiamati 1, 2, 3, 4 rispettivamente per i dosaggi di 25, 30, 35, 40 (kg/m³) di espansivo.

Fasi operative

I provini sono stati creati seguendo le successive fasi:

1. pesate dei materiali seguendo le proporzioni calcolate;
2. inserimento dei materiali in un mixer e miscelazione fino al raggiungimento di un impasto uniforme, omogeneo e senza grumi visibili;
3. esecuzione della prova di spandimento per valutare la lavorabilità dell'impasto mediante tavolo a scosse;
4. getto e compattazione attraverso il tavolo vibrante;
5. copertura dei campioni mediante pellicola di nylon per limitare il fenomeno
6. di essudazione dell'acqua;
7. disarmo dopo 7 ore dal getto;
8. maturazione di 3 giorni in ambiente umido;
9. Termine maturazione dei provini nella camera climatica (25° C, UR 50%)



Pesatura componenti UHPC e successiva miscelazione



Getto della miscela negli appositi casseri 4x4x16 cm³



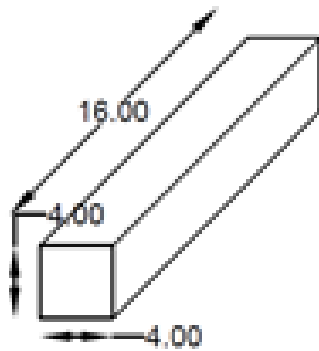
Stagionatura provini UR=50%



Stagionatura provini UR>95%

Classificazione provini

Sono stati realizzati 60 provini con dimensioni di ogni cassero $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, 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. Le prove meccaniche sono avvenute a 3, 7, 28 giorni dal getto. Le misure per il ritiro sono state prese a 7h (misura di riferimento), 1, 2, 3, 7, 14, 21, 28 giorni.



Schematizzazione dei provini

Prove eseguite

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

Lavorabilità

Sono state eseguite le prove di lavorabilità sui quattro dosaggi secondo la prova di spandimento. Il calcestruzzo deve essere introdotto nello stampo collocato al centro della tavola e tenuto fermo gravando con i piedi le 2 staffe di base. Utilizzando la sessola o la cazzuola, si riempie lo stampo in due strati circa uguali. Alla fine di ciascuno strato il calcestruzzo viene assestato con 10 colpi di pestello. Successivamente, il calcestruzzo viene livellato al margine superiore del cono utilizzando il regolo. Prima di sformare il cono la superficie libera della tavola a scosse deve essere pulita. Lo stampo viene sollevato lentamente in direzione verticale. L'operazione di rimozione del cono deve essere compiuta in un tempo compreso fra 5 e 10 s con sollevamento regolare senza provocare movimenti laterali e di torsione al calcestruzzo. La tavola viene sollevata fino alla battuta, senza urto violento, e poi lasciata cadere liberamente. Questa operazione deve essere eseguita 15 volte in un tempo di circa 15 s. Si misura infine lo spandimento sui 2 diametri (a_1 e a_2) ortogonali in corrispondenza della croce tracciata sulla tavola.

Il diametro dello spandimento F è dato dalla media tra a_1 e a_2 misurati in mm.

Di seguito sono mostrate le immagini della prova ed i risultati:

Miscela	a_1 [cm]	a_2 [cm]	a_m [cm]
25 [kg/m ³]	18.5	19	18.75
30 [kg/m ³]	19	19.5	19.25
35 [kg/m ³]	18	18	18
40 [kg/m ³]	18.5	18	18.25



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). I provini sottoposti a tali prove sono stati maturati in acqua, per 3, 7, 28 giorni.



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.



Setup di prova 4x4x16 cm³



Rottura a flessione di tipo duttile provini

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). I provini sottoposti a tali prove sono stati maturati in acqua, per 3, 7, 28 giorni.



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



Rottura a compressione provini

Prova di ritiro

Lo scopo di questa prova è stato quello di capire come l'andamento di deformazione da ritiro nel tempo, variasse al variare della stagionatura. La norma UNI 6687:1973 stabilisce le modalità per la determinazione del ritiro assiale di provini UHPC con dimensioni di $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Il ritiro è definito come la variazione di lunghezza espressa in micrometri, riferita al metro di lunghezza. Lo strumento traduce le misure del ritiro su un comparatore millesimale (minima suddivisione= 0,01 mm). La prova consiste in una misura iniziale di riferimento, eseguita con un'asticella in acciaio; in funzione della temperatura, questa misura può subire fenomeni di dilatazione termica. Successivamente, una volta disposto il provino in posizione verticale sotto il comparatore, si è registrata la misura e per differenza con il riferimento iniziale, abbiamo determinato il ritiro.



Prova determinazione ritiro assiale

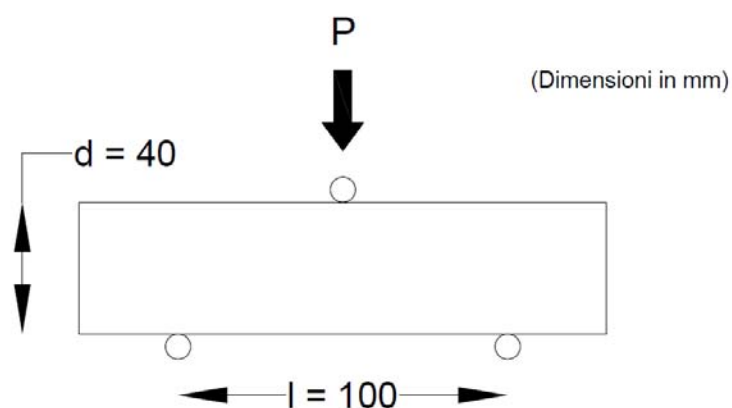
Capitolo 5

Analisi dei risultati

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

Risultati prova di flessione

La resistenza a flessione è stata valutata sui provini prismatici di dimensioni 4x4x16 cm³, 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*).



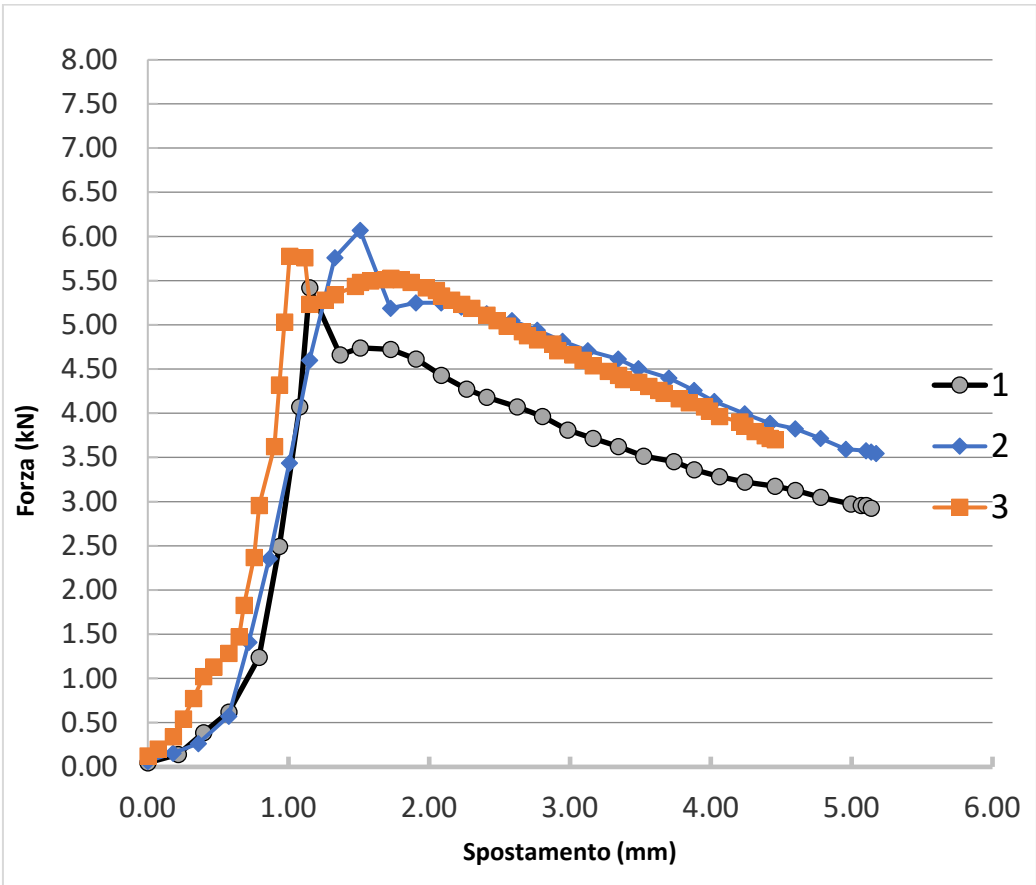
Schema di carico della prova a flessione

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

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

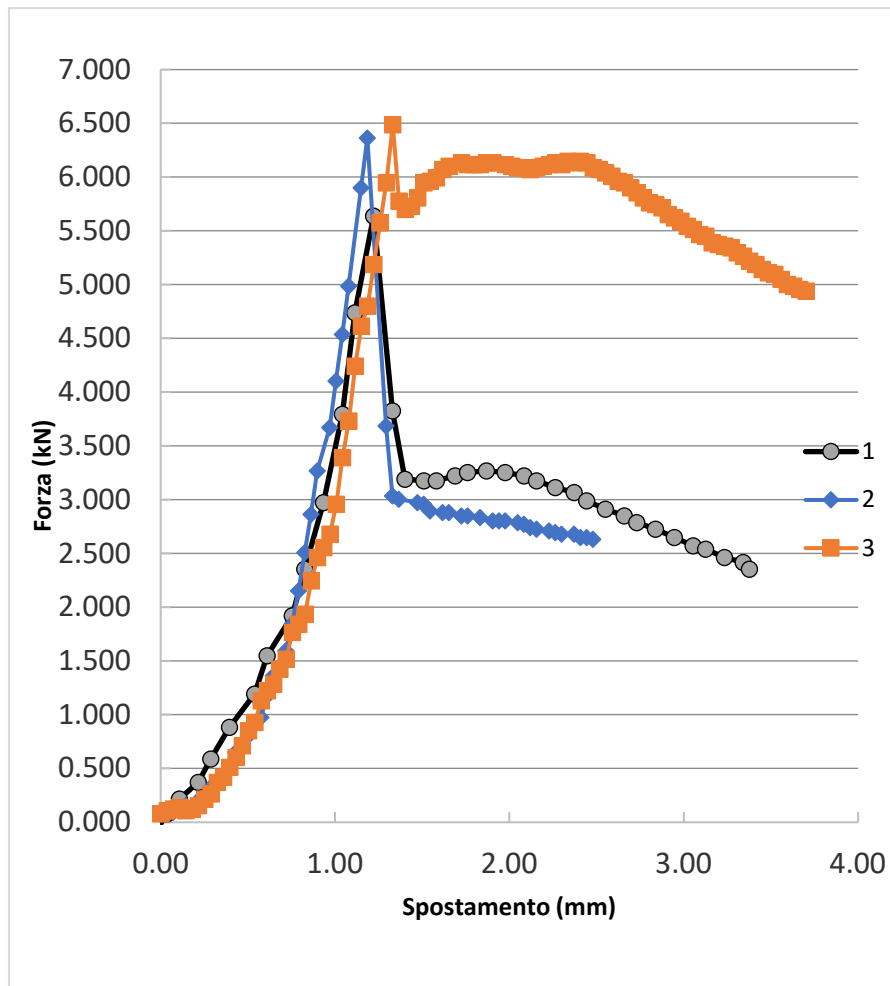
dove F è il valore del carico massimo applicato (in N), b e d sono rispettivamente i valori (in mm) di larghezza e altezza del provino (pari a 40 mm entrambi nel caso specifico) e con l si indica la distanza (in mm) tra gli assi dei supporti (pari a 100 mm nel caso specifico). Di seguito si riportano le curve forza F -spostamento s derivanti dai risultati delle prove a flessione dei tre provini per ogni impasto (1, 2, 3) su tre punti eseguite sui provini $4 \times 4 \times 16$ cm³. 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 e la resistenza a flessione f_{max} in MPa. Le prove a flessione sono state eseguiti su tutti e quattro i dosaggi e sono state effettuate dopo 3, 7, 28 giorni dal getto. Di seguito sono stati riportati i risultati:

FLESSIONE 4X4X16 (3gg)				
Numero provino	1	2	3	Media
Forza max [kN]	5.42	6.07	5.78	8.06
Resistenza a flessione max [Mpa]	12.70	14.23	13.54	13.49



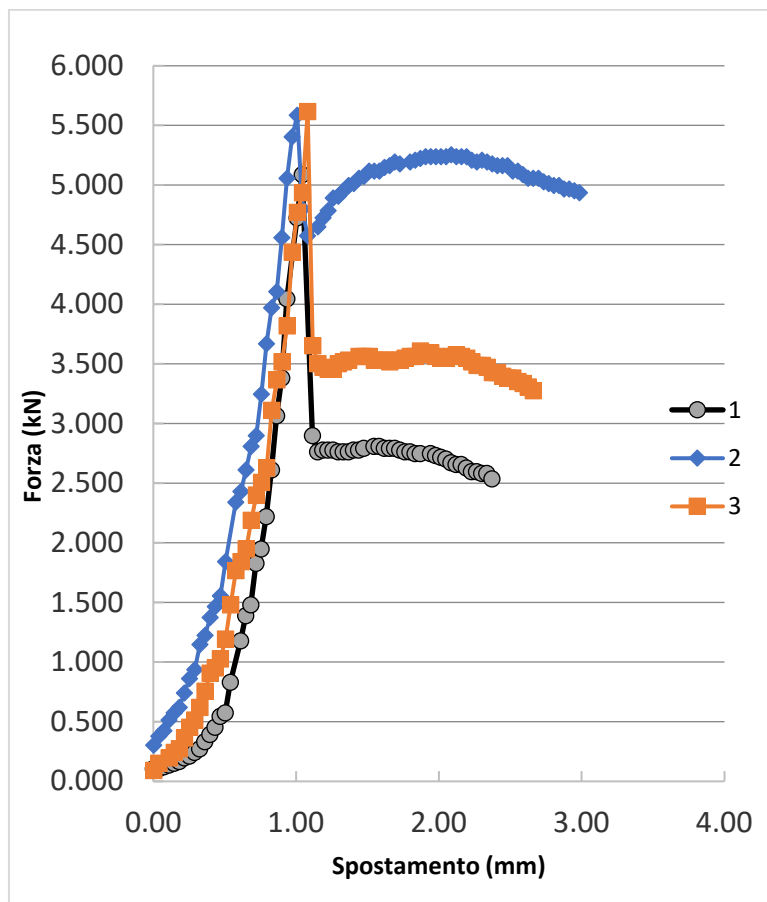
Curva Forza-Spostamento a flessione 3 giorni 25 kg/m³

FLESSIONE 4X4X16 (3gg)				
Numero provino	1	2	3	Media
Forza max [kN]	5.64	6.36	6.49	6.16
Resistenza a flessione max [Mpa]	13.21	14.92	15.20	14.44



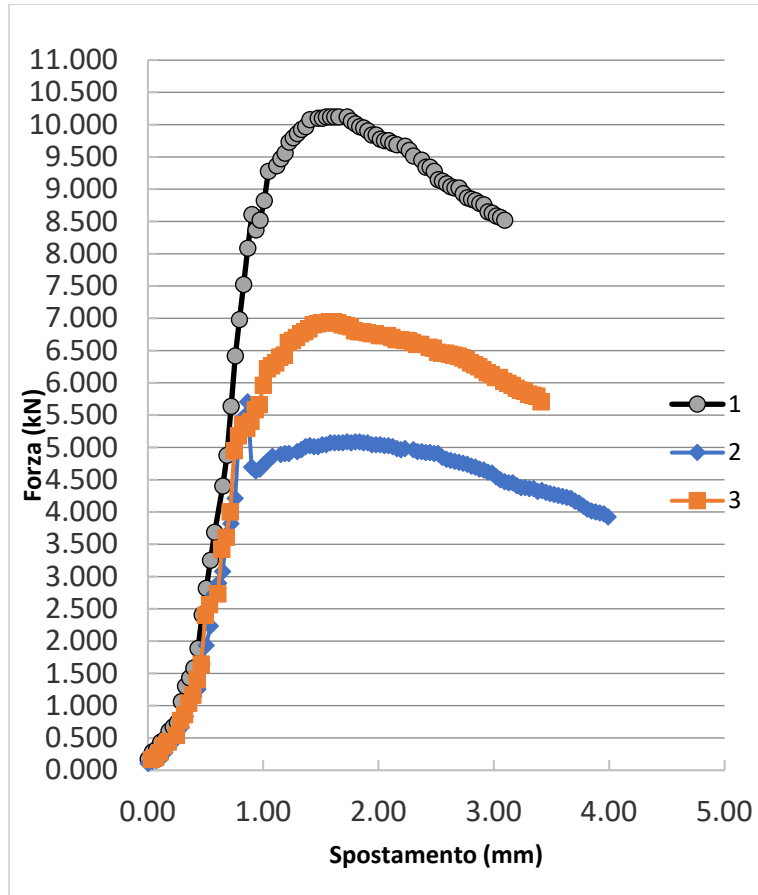
Curva Forza-Spostamento a flessione 3 giorni 30 kg/m³

FLESSIONE 4X4X16 (3gg)				
Numero provino	1	2	3	Media
Forza max [kN]	5.09	5.58	5.62	5.43
Resistenza a flessione max [Mpa]	11.92	13.09	13.16	12.72



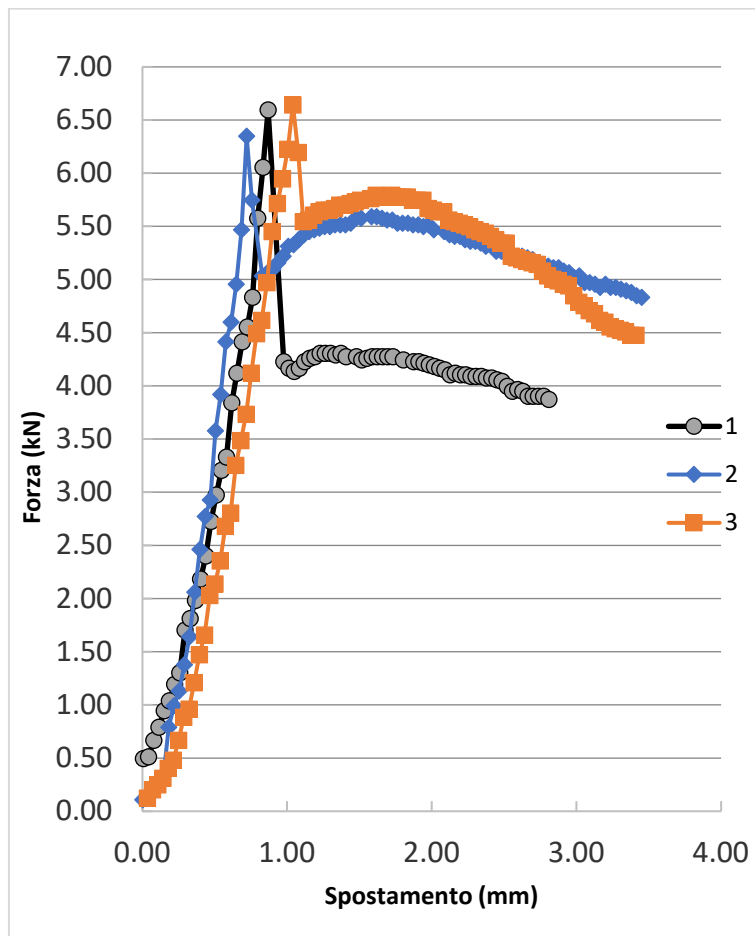
Curva Forza-Spostamento a flessione 3 giorni 35 kg/m³

FLESSIONE 4X4X16 (3gg)				
Numero provino	1	2	3	Media
Forza max [kN]	10.12	5.71	6.94	7.59
Resistenza a flessione max [Mpa]	23.72	13.37	16.27	17.79



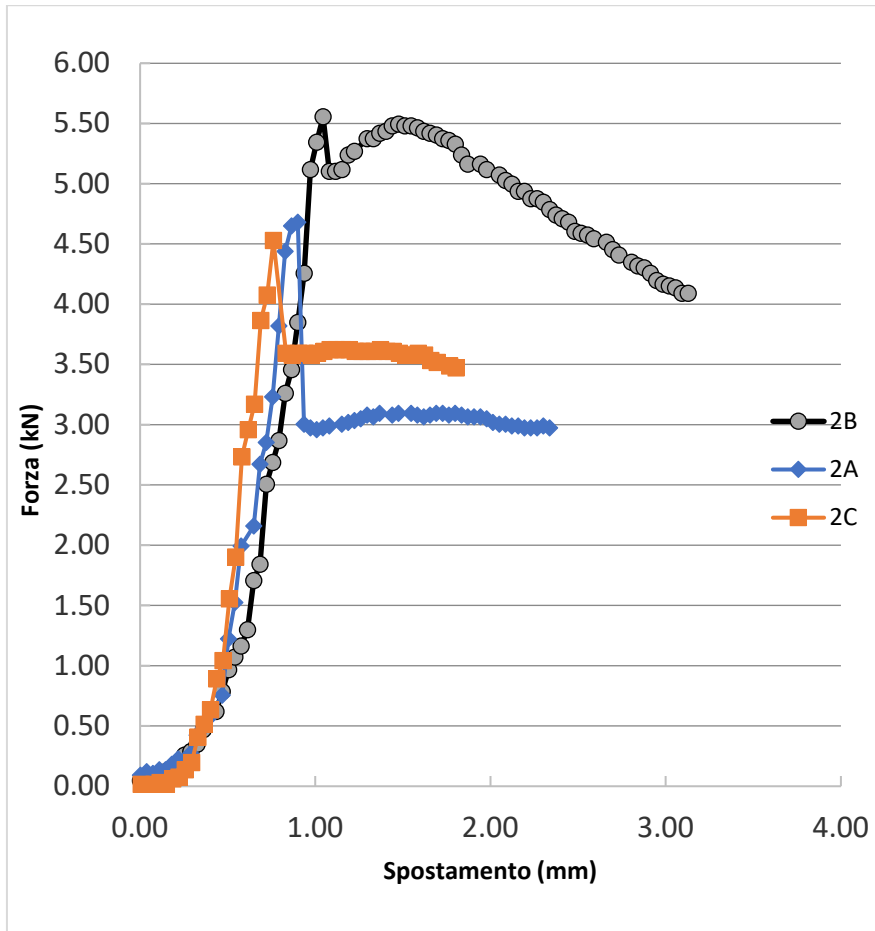
Curva Forza-Spostamento a flessione 3 giorni 40 kg/m³

FLESSIONE 4X4X16 (7gg)				
Numero provino	1	2	3	Media
Forza max [kN]	6.59	6.35	6.64	6.53
Resistenza a flessione max [Mpa]	15.46	14.88	15.56	15.30



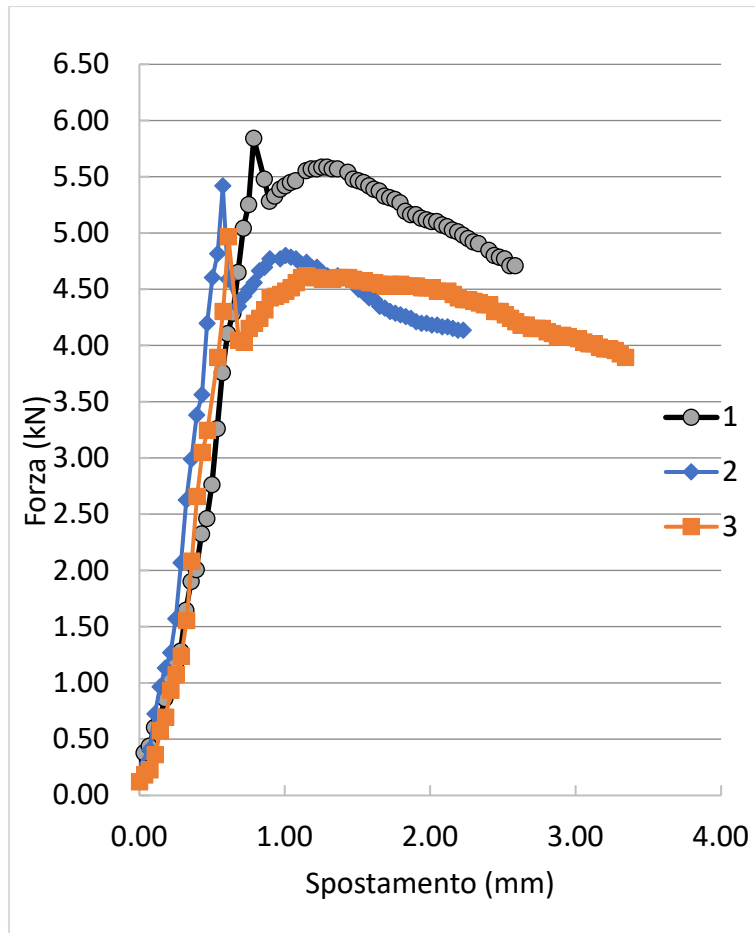
Curva Forza-Spostamento a flessione 7 giorni 25 kg/m³

FLESSIONE 4X4X16 (7gg)				
Numero provino	1	2	3	Media
Forza max [kN]	4.68	5.55	4.53	4.92
Resistenza a flessione max [Mpa]	10.97	13.02	10.61	11.53



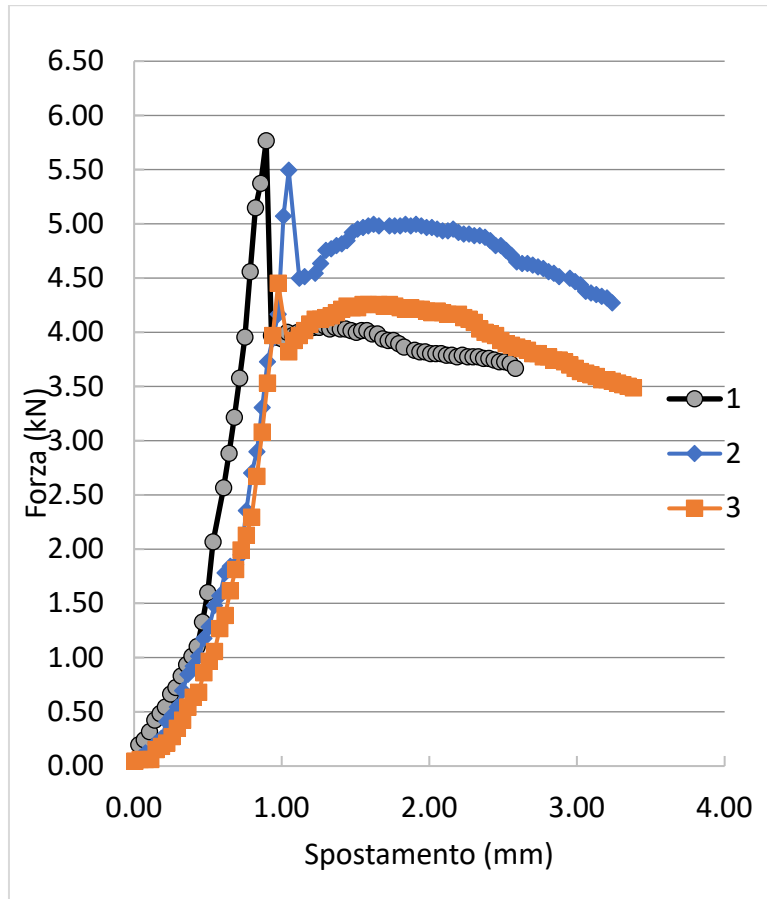
Curva Forza-Spostamento a flessione 7 giorni 30 kg/m³

FLESSIONE 4X4X16 (7gg)				
Numero provino	1	2	3	Media
Forza max [kN]	5.84	5.42	4.97	5.41
Resistenza a flessione max [Mpa]	13.69	12.70	11.64	12.68



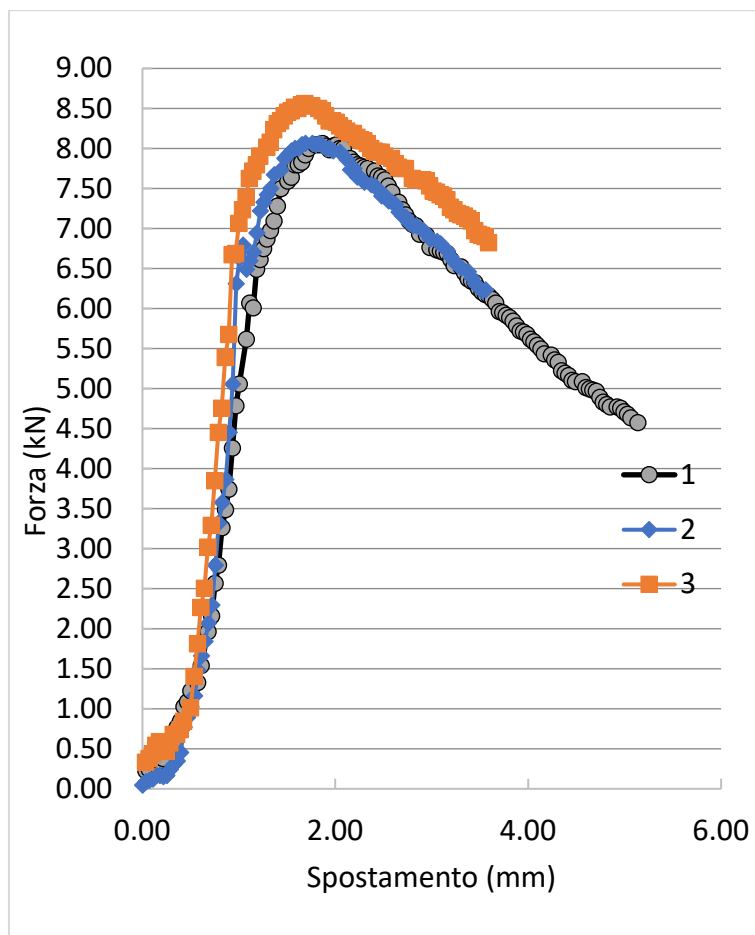
Curva Forza-Spostamento a flessione 7 giorni 35 kg/m³

FLESSIONE 4X4X16 (7gg)				
Numero provino	1	2	3	Media
Forza max [kN]	5.77	5.49	4.45	5.24
Resistenza a flessione max [Mpa]	13.51	12.88	10.44	12.28



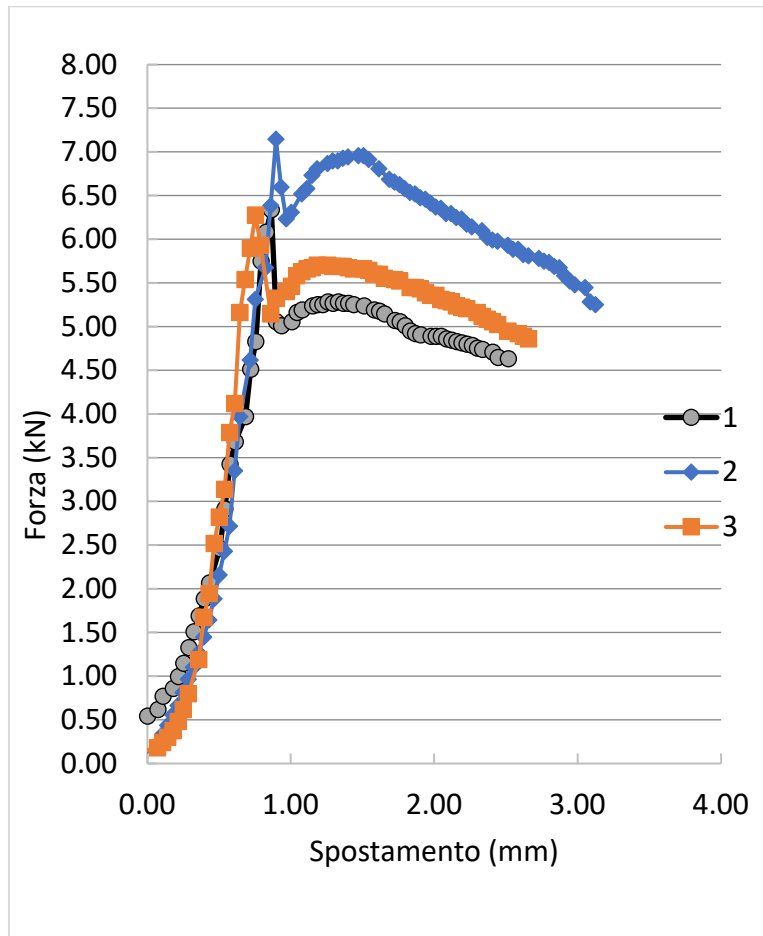
Curva Forza-Spostamento a flessione 7 giorni 40 kg/m³

FLESSIONE 4X4X16 (28gg)				
Numero provino	1	2	3	Media
Forza max [kN]	8.06	8.06	8.56	8.23
Resistenza a flessione max [Mpa]	18.89	18.90	20.07	19.29



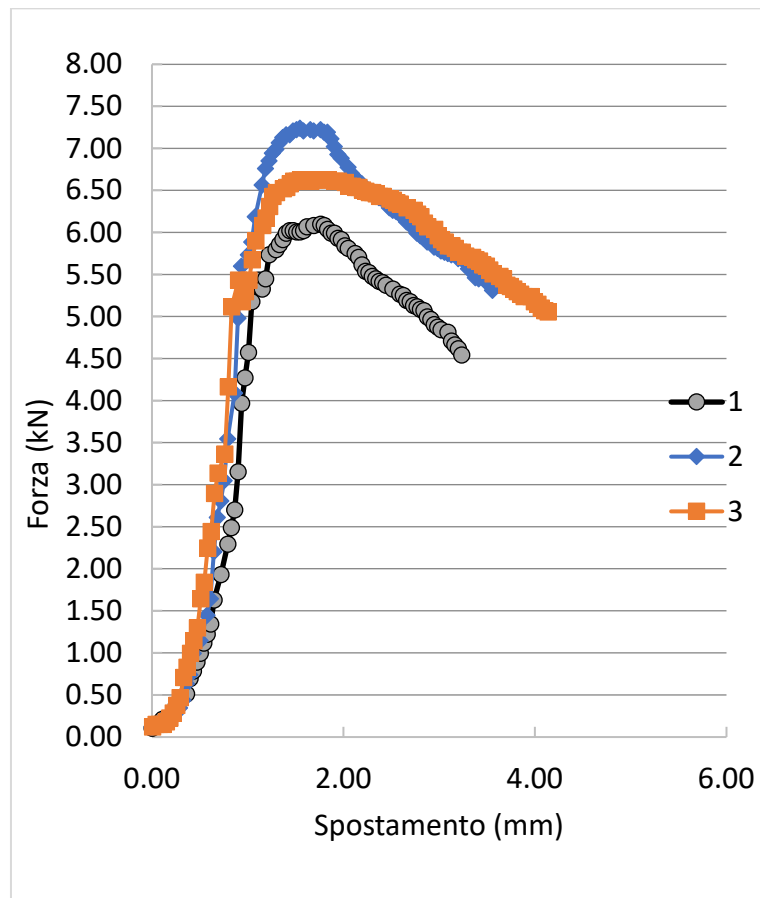
Curva Forza-Spostamento a flessione 28 giorni 25 kg/m³

FLESSIONE 4X4X16 (28gg)				
Numero provino	1	2	3	Media
Forza max [kN]	6.34	7.15	6.28	6.59
Resistenza a flessione max [Mpa]	14.86	16.75	14.72	15.44



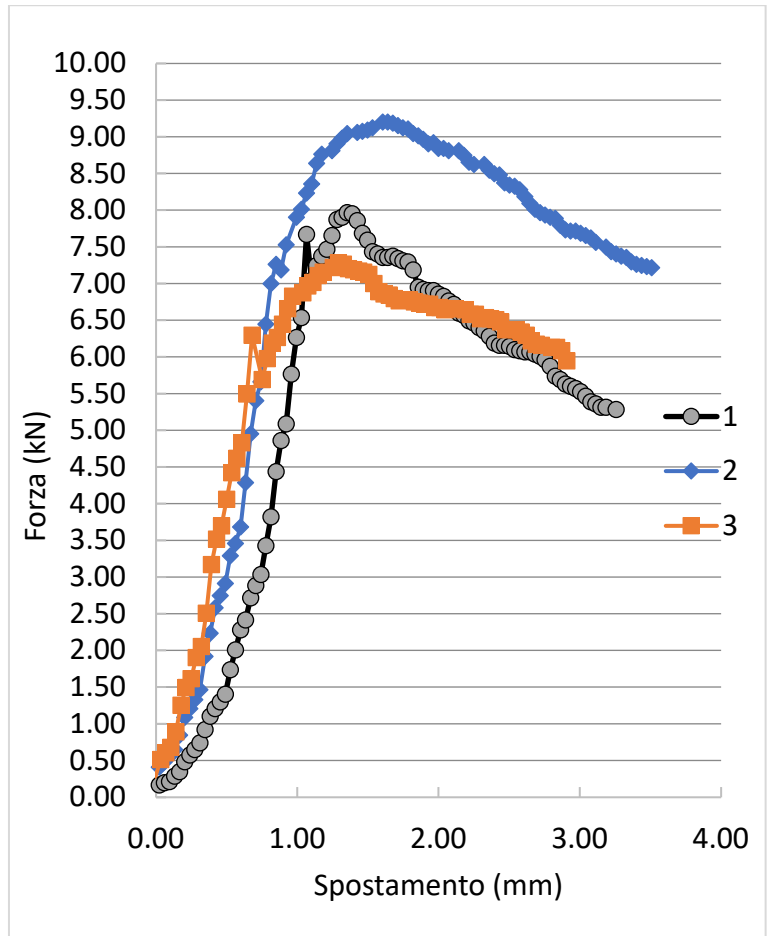
Curva Forza-Spostamento a flessione 28 giorni 30 kg/m³

FLESSIONE 4X4X16 (28gg)				
Numero provino	1	2	3	Media
Forza max [kN]	6.10	7.24	6.63	6.65
Resistenza a flessione max [Mpa]	14.29	16.97	15.53	15.60



Curva Forza-Spostamento a flessione 28 giorni 35 kg/m³

FLESSIONE 4X4X16 (28gg)				
Numero provino	1	2	3	Media
Forza max [kN]	7.97	9.20	7.28	8.15
Resistenza a flessione max [Mpa]	18.67	21.56	17.06	19.10

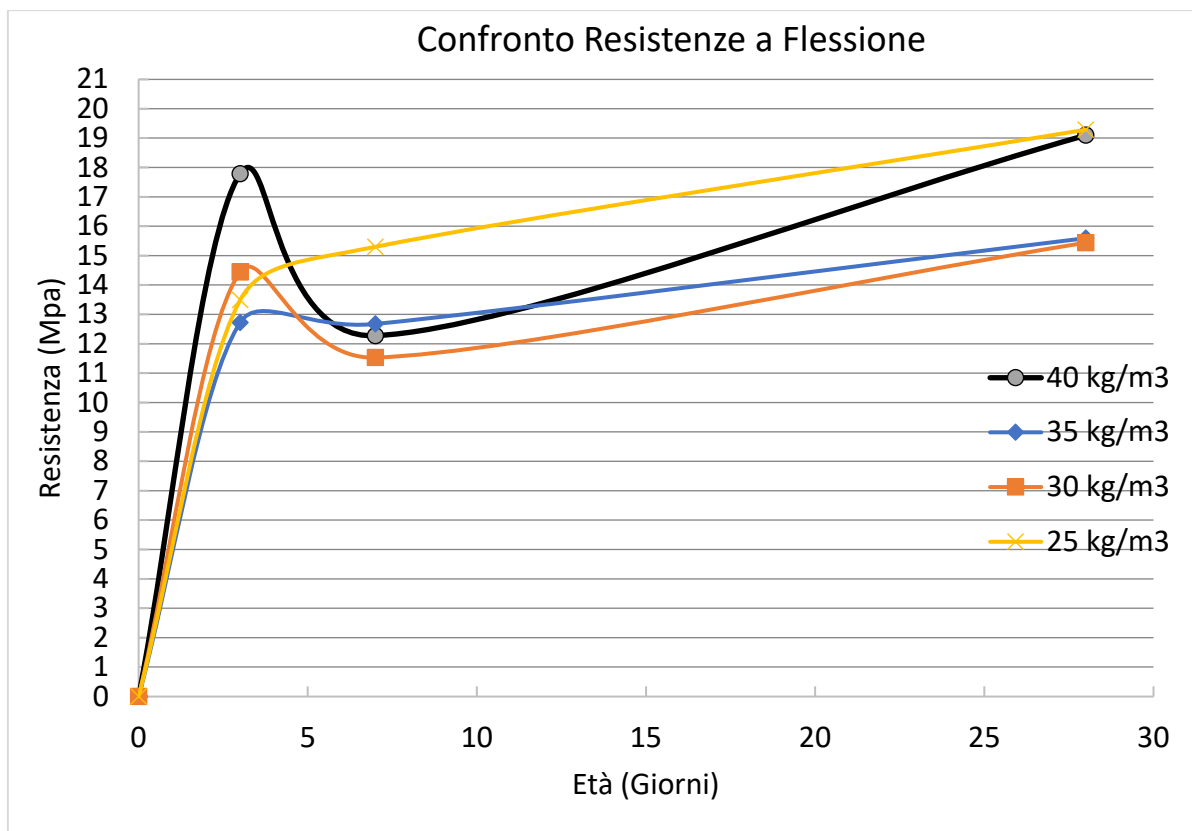


Curva Forza-Spostamento a flessione 28 giorni 40 kg/m³

Discussione dei risultati

Ora si procede al confronto della resistenza a flessione delle quattro miscele, ai diversi periodi di stagionatura. Per ogni mix è stata effettuata la media dei tre provini a disposizione (A, B, C).

MEDIA RESISTENZA A FLESSIONE 4X4X16				
Miscela	25 kg/m ³	30 kg/m ³	35 kg/m ³	40 kg/m ³
Età [giorni]	Resistenza a flessione [Mpa]			
3	13.49	14.44	12.72	17.79
7	15.30	11.53	12.68	12.28
28	19.29	15.44	15.60	19.10



Confronto tra la resistenza a flessione dei provini

Analizzando i risultati ottenuti si può evincere che la resistenza a flessione non varia al variare della quantità di espansivo.

L'andamento del grafico forza spostamento a flessione per tutte le miscele (e quasi per ogni provino sottoposto alla prova), come si può vedere dai grafici, è uno Strain hardening (effetto incrudente) dimostrando che la variazione dell'espansivo non genera variazioni nemmeno sull'andamento.

Anche l'andamento della resistenza a flessione al variare dell'età di stagionatura non subisce variazioni sostanziali e rimane uguale.

Risultati prove di compressione 4x4x16 cm3

I provini di dimensioni 4x4x16 cm³ sono stati caratterizzati meccanicamente con prove a compressione 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).

La cella di carico utilizzata è collegata ad una centralina di acquisizione e rielaborazione che ci ha permesso di ottenere i valori relativi alla forza applicata (kN). Successivamente la forza è stata trasformata in una tensione espressa in MPa dividendo la forza F, espressa in N, per la superficie S sulla quale essa è stata applicata pari a 40x40 mm² secondo la formula:

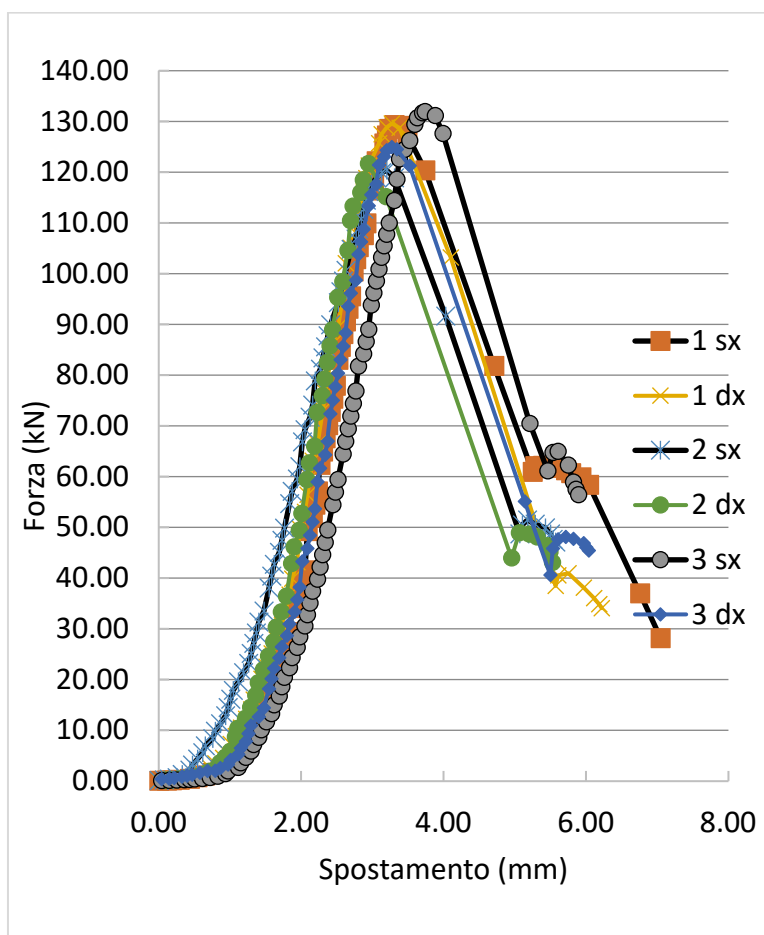
$$\sigma = \frac{F}{S} [\text{MPa}]$$

Di seguito si riportano le curve forza (F) - spostamento (s) derivanti dai risultati delle prove a compressione eseguite sui provini 4x4x16 cm³. 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 da una tabella nella quale per tutti i provini, indicati con le lettere 1, 2, 3, e parte DX, SX appartenenti al medesimo impasto, sono indicati il valore di carico massimo a rottura, espresso in kN, e la tensione σ_{\max} in MPa.

COMPRESSIONE 4X4X16 (3gg)

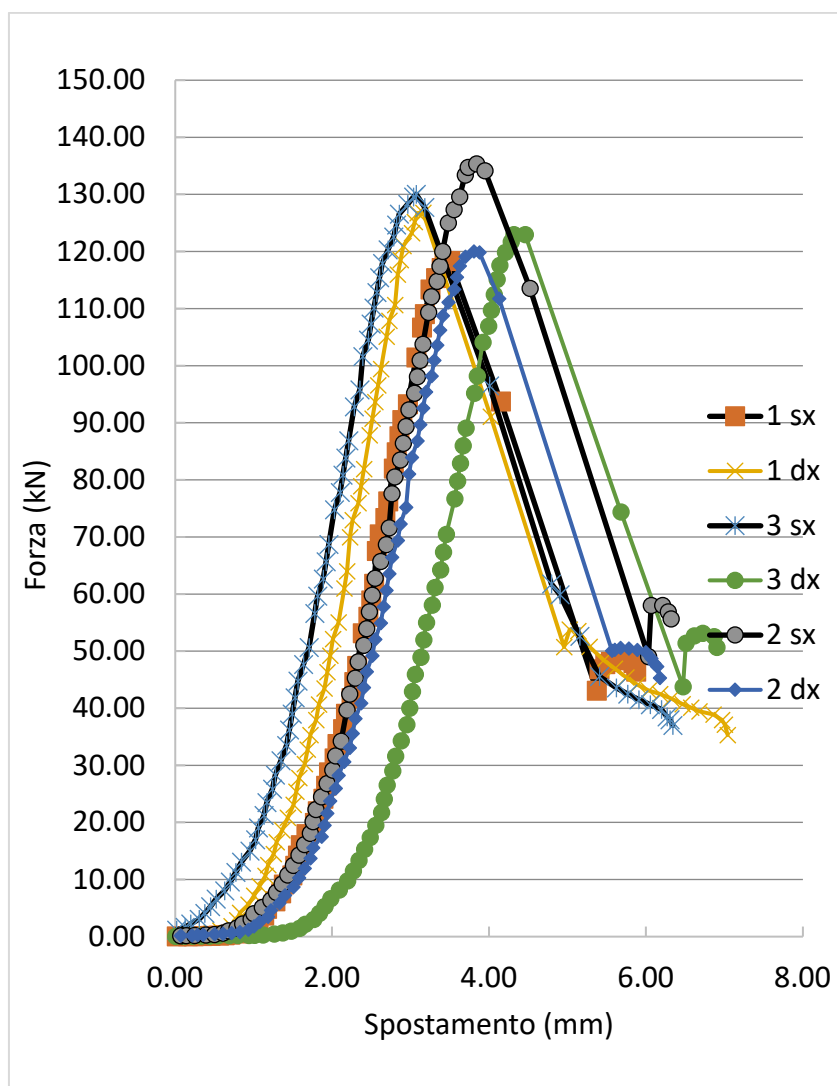
Numero provino	1 SX	1 DX	2 SX	2 DX	3 SX	3 DX	Media
Forza max [kN]	129.30	129.60	120.39	121.69	131.97	124.95	126.32
Resistenza a compressione max [Mpa]	80.82	81.00	75.25	76.05	82.48	78.09	78.95



Curva Forza-Spostamento a compressione 3 giorni 25 kg/m³

COMPRESSIONE 4X4X16 (3gg)

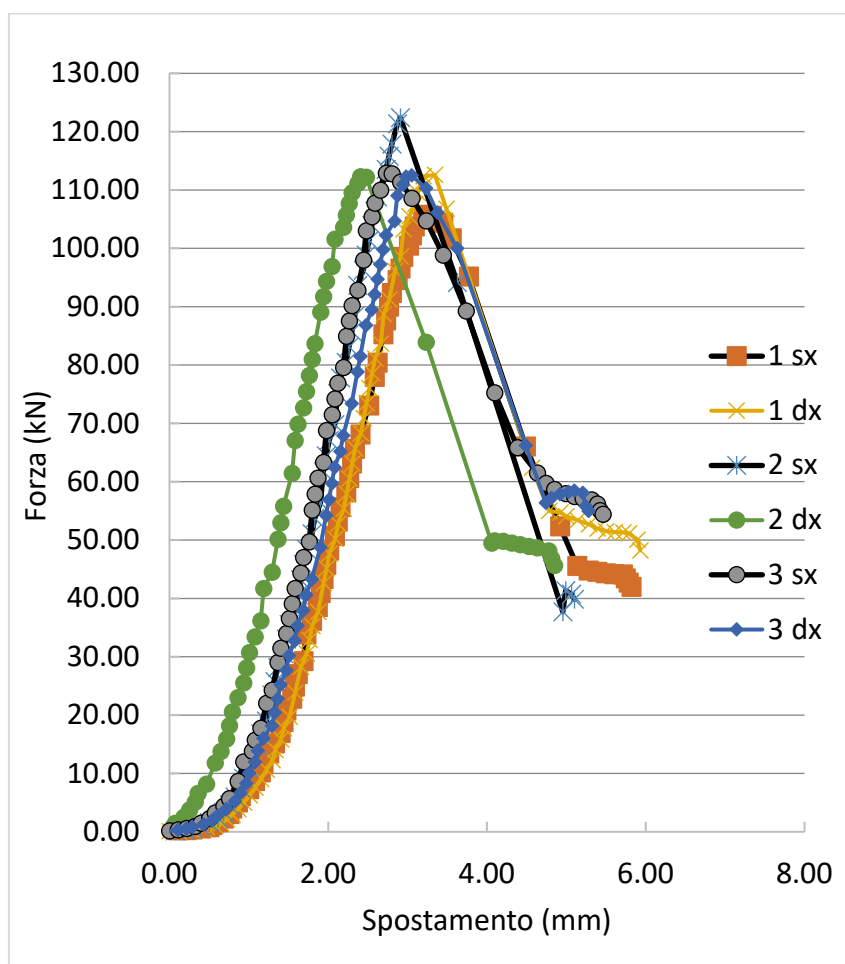
Numero provino	1 SX	1 DX	2 SX	2 DX	3 SX	3 DX	Media
Forza max [kN]	118.39	126.78	135.37	120.02	130.04	122.96	125.59
Resistenza a compressione max [Mpa]	74.00	79.24	84.60	75.02	81.28	76.85	78.50



Curva Forza-Spostamento a compressione 3 giorni 30 kg/m³

COMPRESSIONE 4X4X16 (3gg)

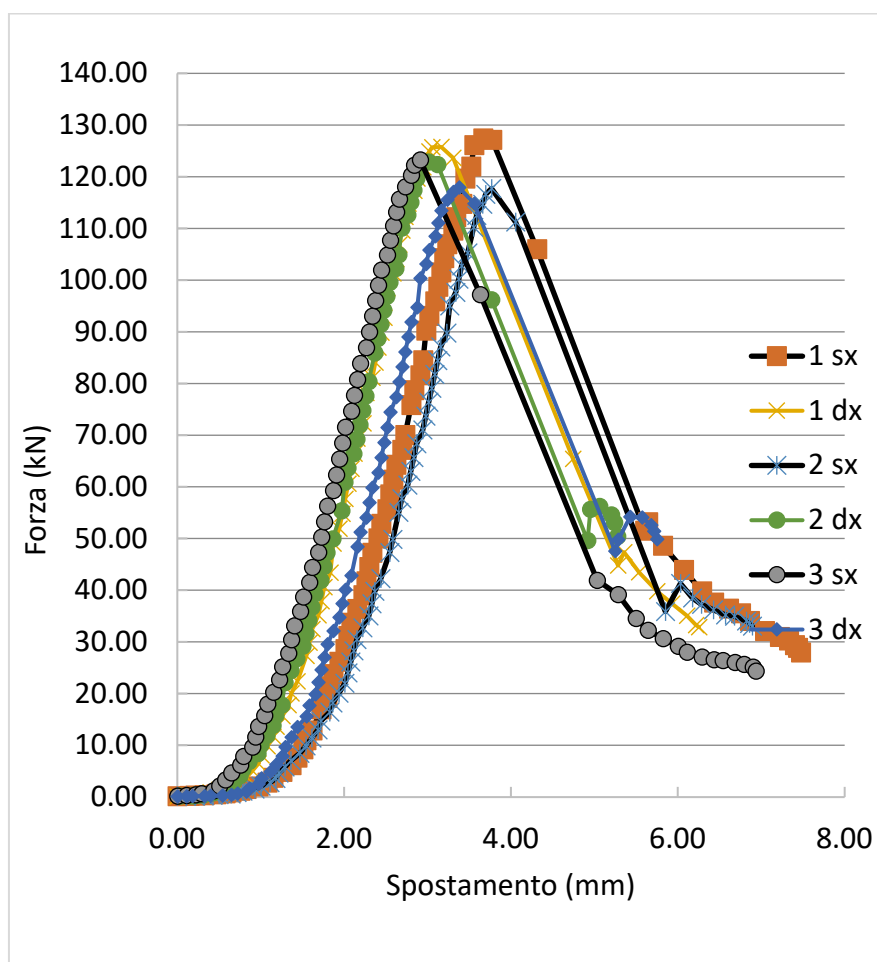
Numero provino	1 SX	1 DX	2 SX	2 DX	3 SX	3 DX	Media
Forza max [kN]	105.76	112.59	122.40	112.29	112.88	112.53	113.07
Resistenza a compressione max [Mpa]	66.10	70.37	76.50	70.18	70.55	70.33	70.67



Curva Forza-Spostamento a compressione 3 giorni 35 kg/m³

COMPRESSIONE 4X4X16 (3gg)

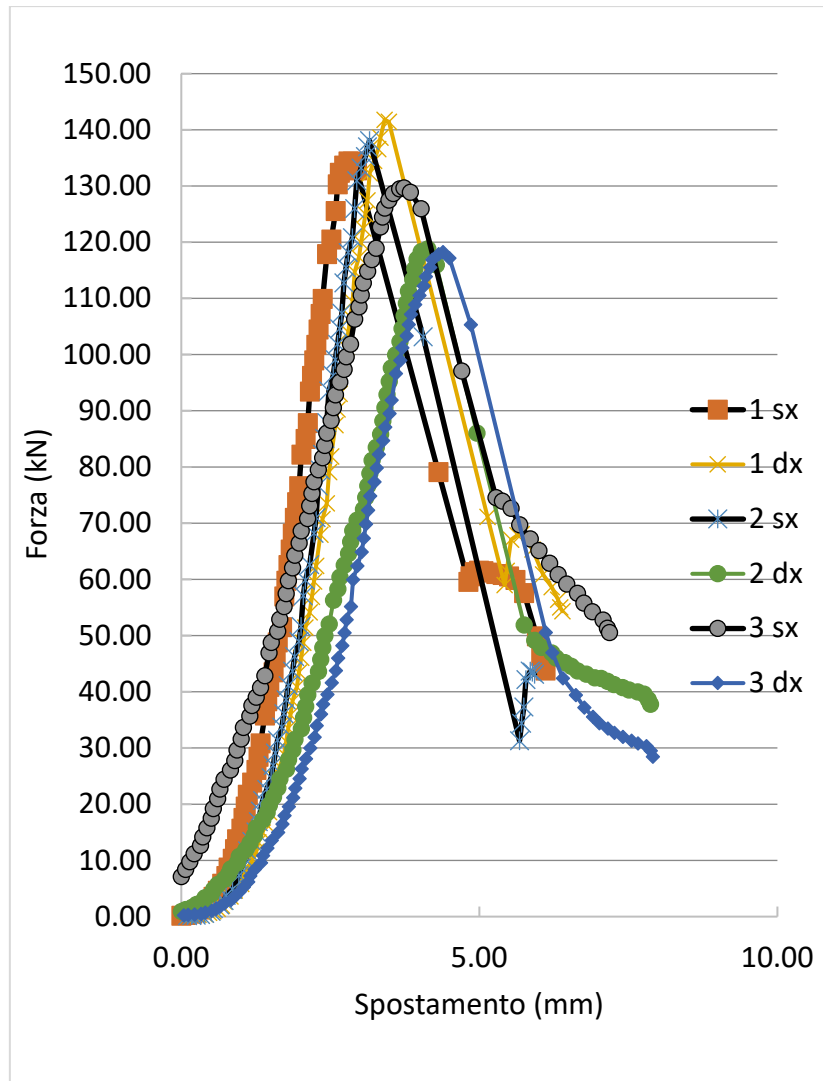
Numero provino	1 SX	1 DX	2 SX	2 DX	3 SX	3 DX	Media
Forza max [kN]	127.43	125.76	117.73	122.84	123.23	117.91	122.48
Resistenza a compressione max [Mpa]	79.64	78.60	73.58	76.77	77.02	73.69	76.55



Curva Forza-Spostamento a compressione 3 giorni 40 kg/m³

COMPRESSIONE 4X4X16 (7gg)

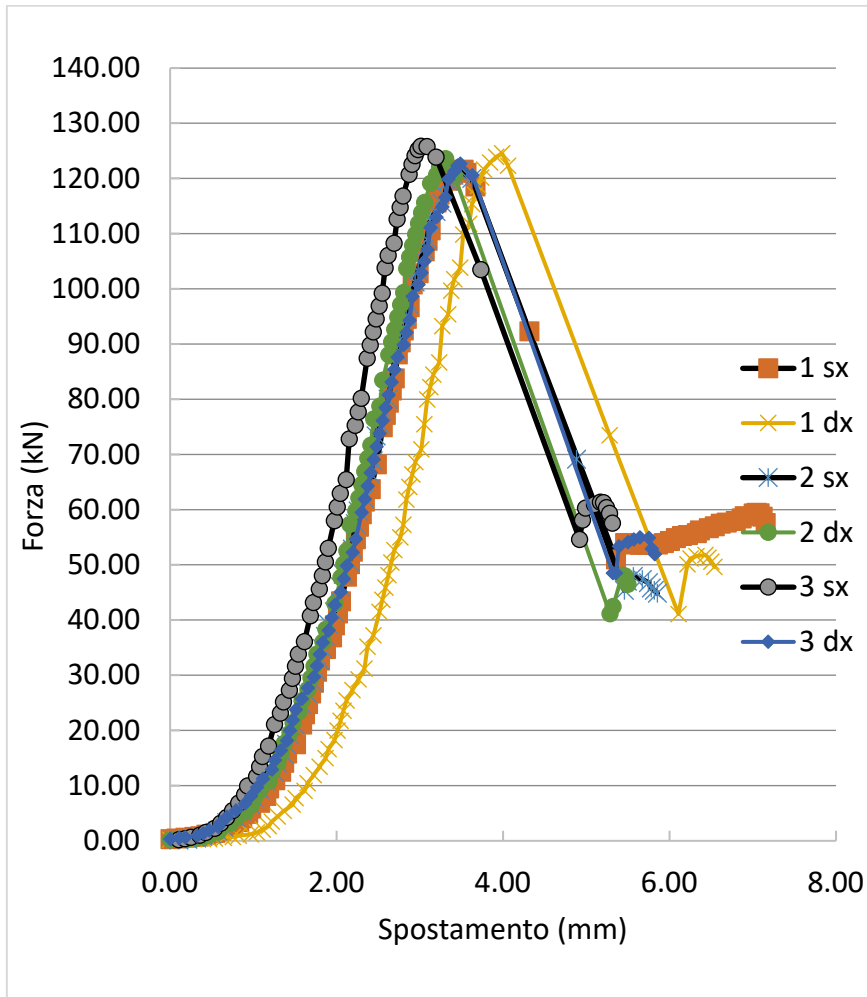
Numero provino	1 SX	1 DX	2 SX	2 DX	3 SX	3 DX	Media
Forza max [kN]	134.38	141.76	138.09	118.81	129.64	118.22	130.15
Resistenza a compressione max [Mpa]	83.99	88.60	86.30	74.25	81.02	73.89	81.34



Curva Forza-Spostamento a compressione 7 giorni 25 kg/m³

COMPRESSIONE 4X4X16 (7gg)

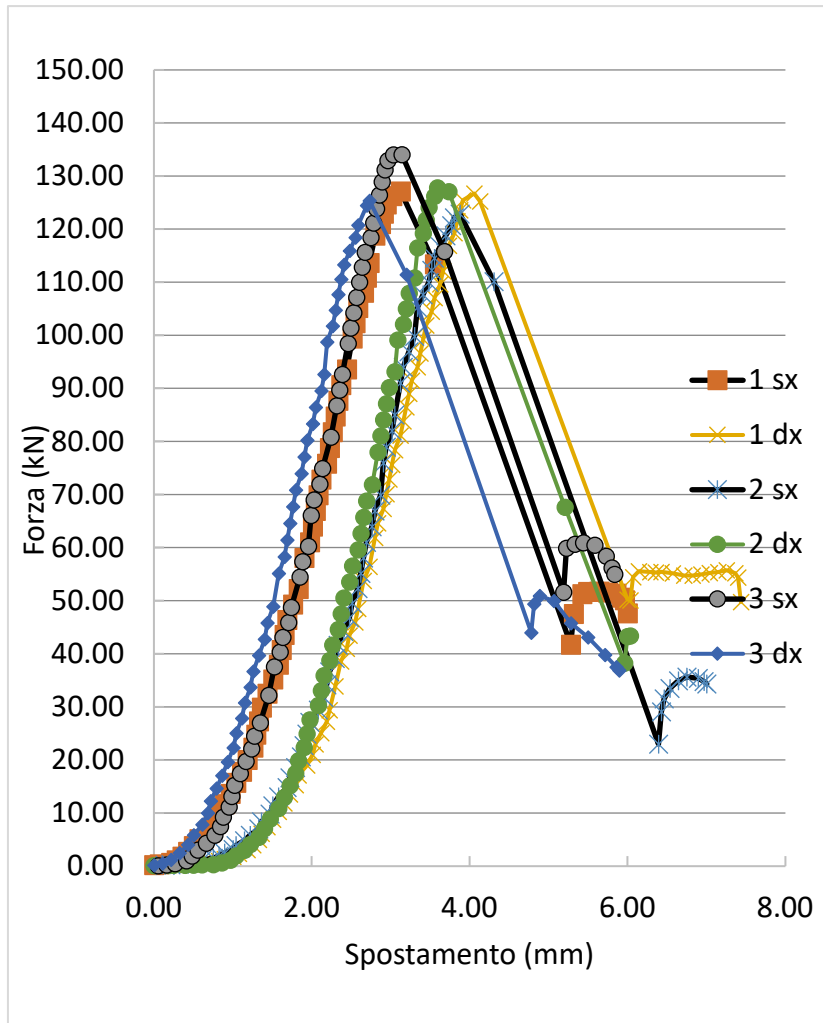
Numero provino	1 SX	1 DX	2 SX	2 DX	3 SX	3 DX	Media
Forza max [kN]	121.59	124.55	121.37	123.58	125.84	122.67	123.27
Resistenza a compressione max [Mpa]	76.00	77.84	75.85	77.24	78.65	76.67	77.04



Curva Forza-Spostamento a compressione 7 giorni 30 kg/m³

COMPRESSIONE 4X4X16 (7gg)

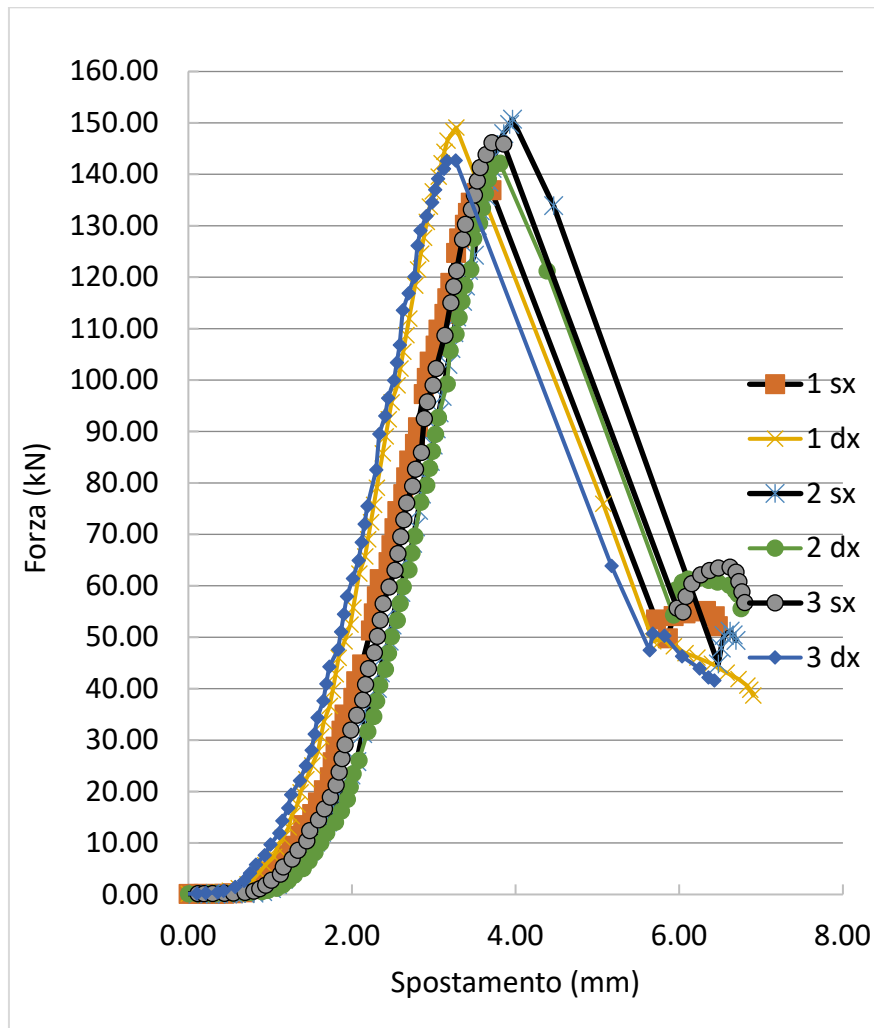
Numero provino	1 SX	1 DX	2 SX	2 DX	3 SX	3 DX	Media
Forza max [kN]	127.12	126.72	122.84	127.78	134.02	125.34	127.30
Resistenza a compressione max [Mpa]	79.45	79.20	76.77	79.86	83.76	78.34	79.56



Curva Forza-Spostamento a compressione 7 giorni 35 kg/m³

COMPRESSIONE 4X4X16 (7gg)

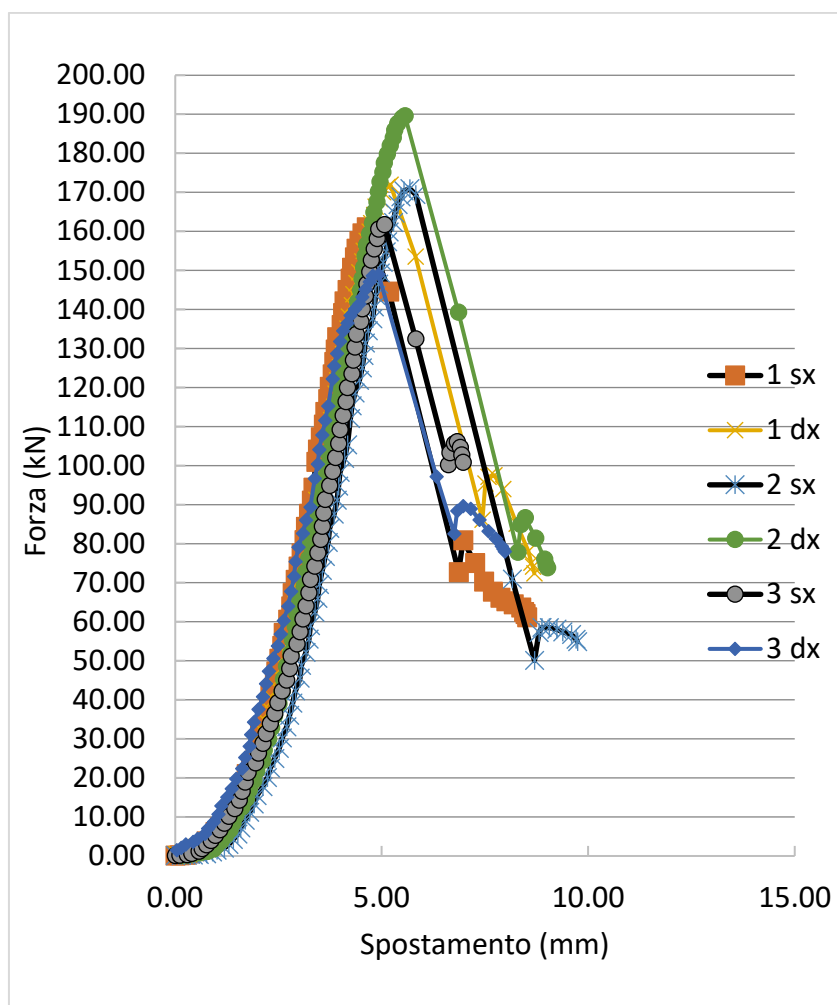
Numero provino	1 SX	1 DX	2 SX	2 DX	3 SX	3 DX	Media
Forza max [kN]	137.96	149.11	150.72	142.17	146.15	142.70	144.80
Resistenza a compressione max [Mpa]	86.22	93.19	94.20	88.86	91.35	89.19	90.50



Curva Forza-Spostamento a compressione 7 giorni 40 kg/m³

COMPRESSIONE 4X4X16 (28gg)

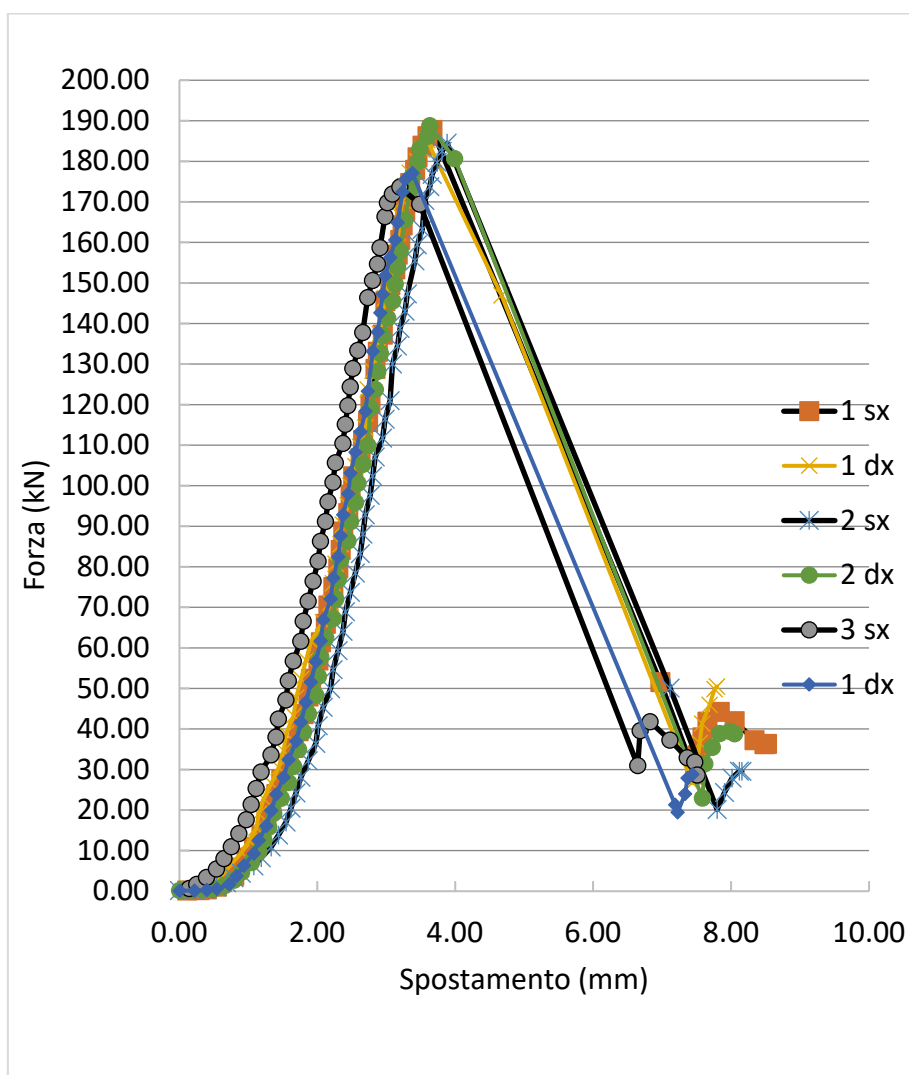
Numero provino	1 SX	1 DX	2 SX	2 DX	3 SX	3 DX	Media
Forza max [kN]	161.06	171.94	170.94	189.62	161.72	148.94	167.37
Resistenza a compressione max [Mpa]	100.66	107.47	106.84	118.51	101.08	93.09	104.61



Curva Forza-Spostamento a compressione 28 giorni 25 kg/m³

COMPRESSIONE 4X4X16 (28gg)

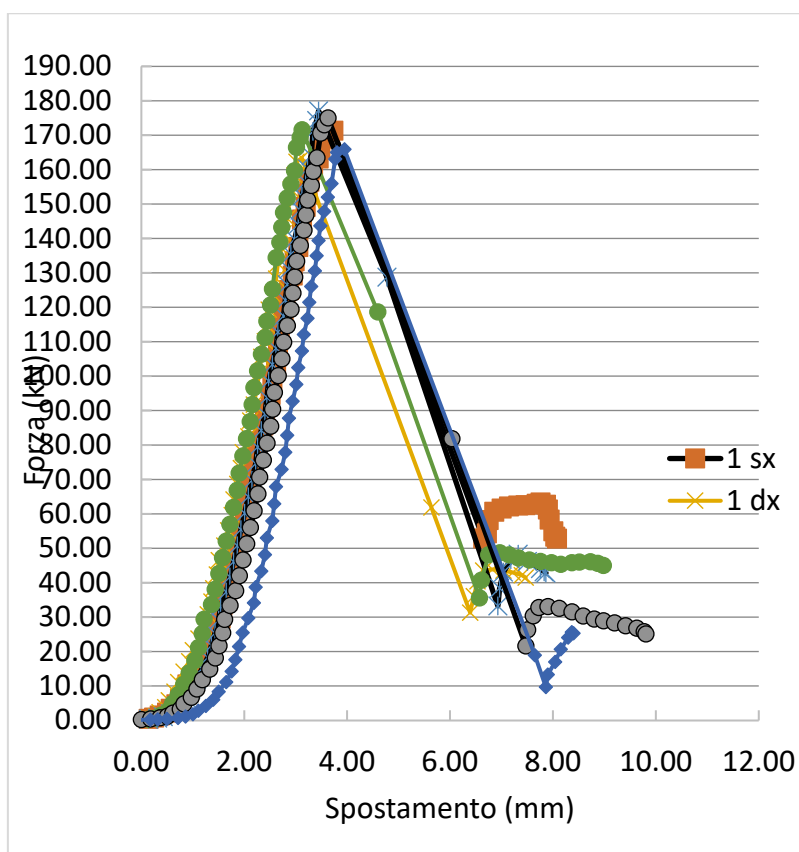
Numero provino	1 SX	1 DX	2 SX	2 DX	3 SX	3 DX	Media
Forza max [kN]	187.74	185.20	184.48	188.78	173.67	177.08	182.83
Resistenza a compressione max [Mpa]	117.34	115.75	115.30	117.99	108.55	110.68	114.27



Curva Forza-Spostamento a compressione 28 giorni 30 kg/m³

COMPRESSIONE 4X4X16 (28gg)

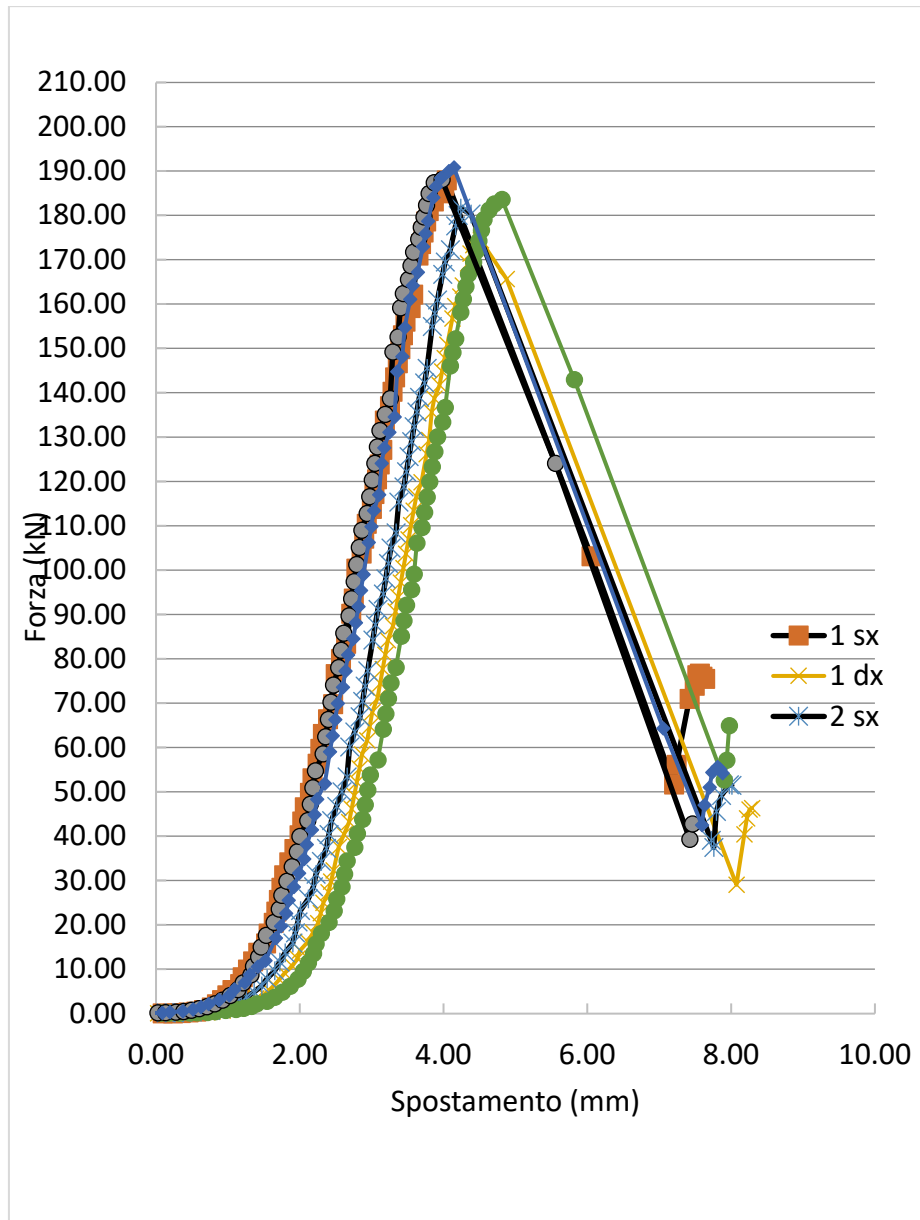
Numero provino	1 SX	1 DX	2 SX	2 DX	3 SX	3 DX	Media
Forza max [kN]	171.52	163.36	177.06	171.58	174.98	165.87	170.73
Resistenza a compressione max [Mpa]	107.20	102.10	110.66	107.24	109.36	103.67	106.71



Curva Forza-Spostamento a compressione 28 giorni 35 kg/m³

COMPRESSIONE 4X4X16 (28gg)

Numero provino	1 SX	1 DX	2 SX	2 DX	3 SX	3 DX	Media
Forza max [kN]	187.92	174.36	181.62	183.59	188.06	190.79	184.39
Resistenza a compressione max [Mpa]	117.45	108.98	113.52	114.75	117.54	119.25	115.25

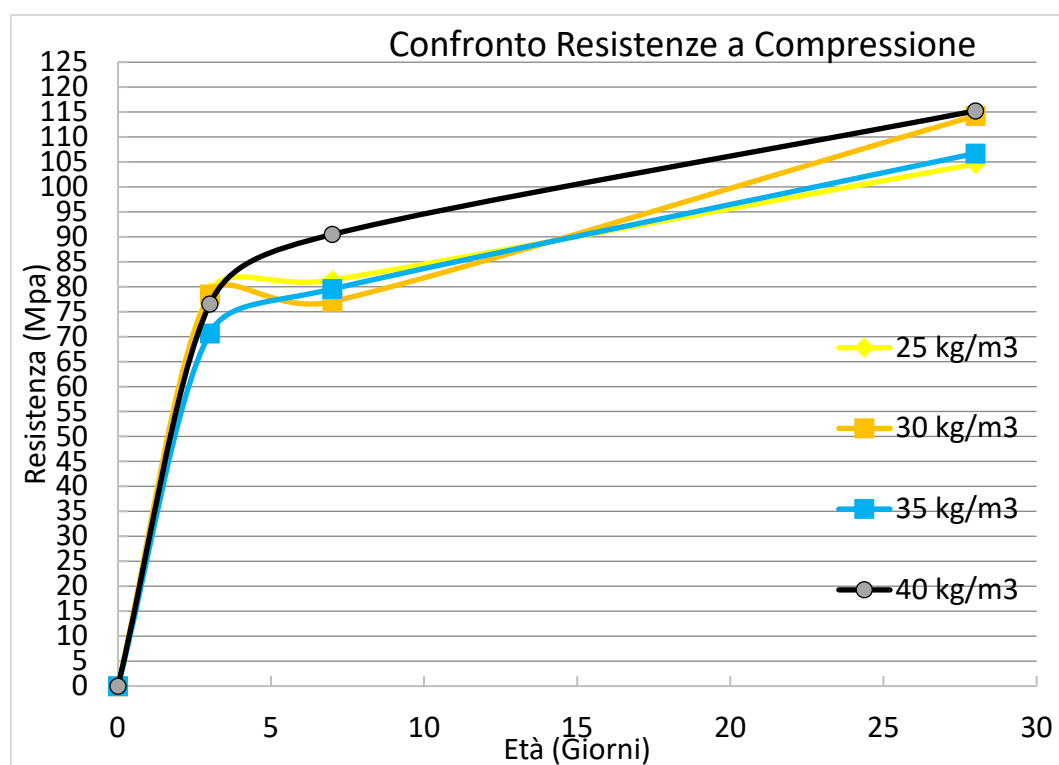


Curva Forza-Spostamento a compressione 28 giorni 40 kg/m³

Discussione dei risultati

Ora si procede al confronto della resistenza a compressione delle quattro miscele, ai diversi periodi di stagionatura. Per ogni mix è stata effettuata la media dei tre provini a disposizione (A, B, C) ed entrambe le parti (SX, DX).

RISULTATI COMPRESSIONE 4X4X16				
Miscela	25 kg/m ³	30 kg/m ³	35 kg/m ³	40 kg/m ³
Età [giorni]	Resistenza a compressione [Mpa]			
3	78.95	78.50	70.67	76.55
7	81.34	77.04	79.56	90.50
28	104.61	114.27	106.71	115.25



Confronto tra la resistenza a compressione dei provini

Analizzando i risultati ottenuti si può evincere che la resistenza a compressione dei provini al variare dell'espansivo non cambia. Nemmeno l'andamento del grafico forza-spostamento a compressione risulta variare.

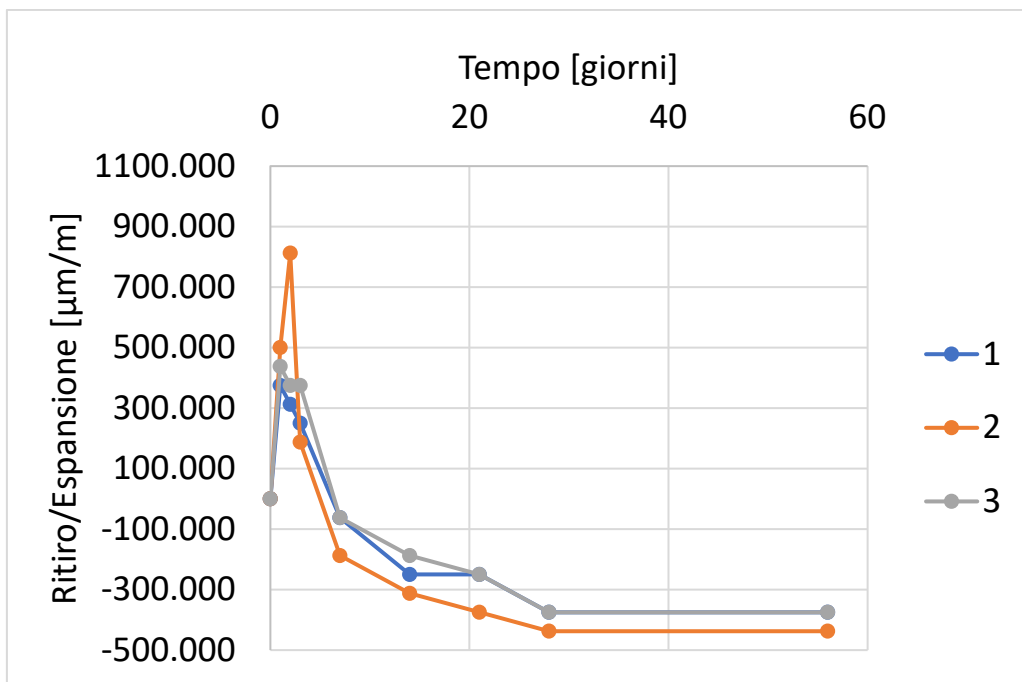
Non ci sono particolari variazioni nell'andamento dei grafici resistenza-età di stagionatura al variare della quantità di espansivo, risultando coerente con quanto presente in letteratura.

Risultati prove di determinazione del ritiro/espansione assiale

I provini di dimensioni $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ sono stati sottoposti a prove di ritiro in accordo alla norma UNI 6687:1973. Il valore ricavato per differenza tra una misura di riferimento e la misura effettiva è stato espresso in $[\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}]$.

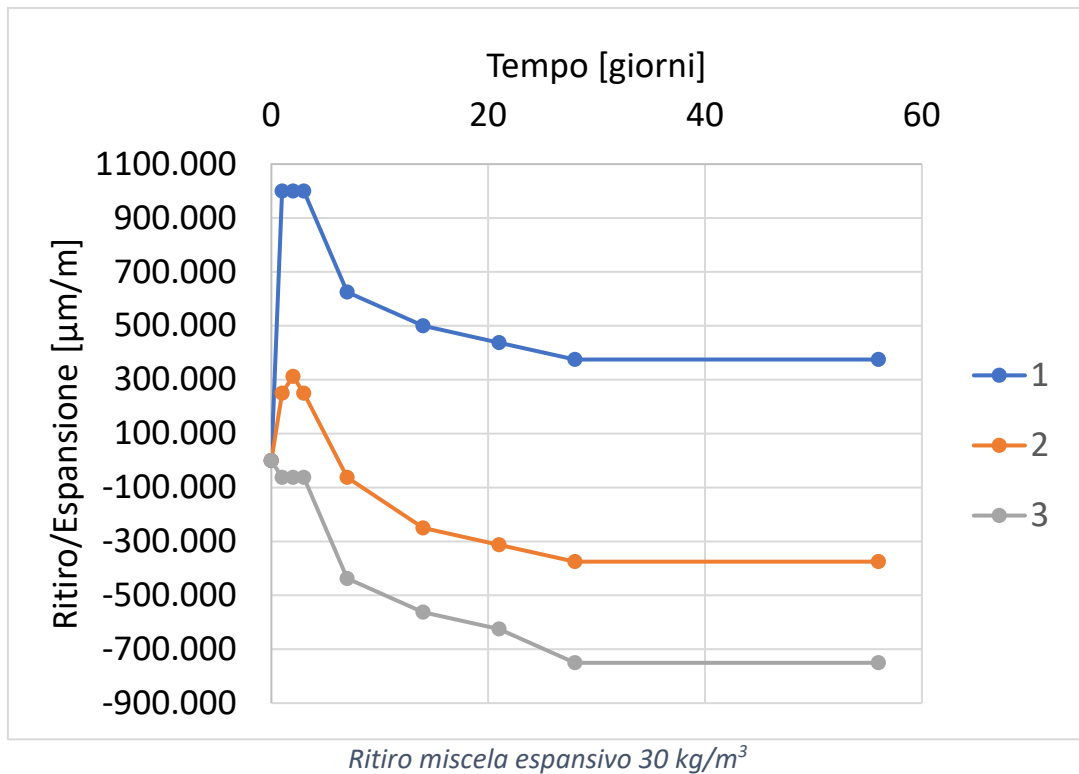
I risultati ottenuti sono tabellati e riportati in grafici $[\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}]$, ovvero una deformazione da ritiro autogeno per la stagionatura avvenuta in camera climatica ad UR=50% e una deformazione/espansione per la stagionatura a UR>95% in funzione del tempo espresso in secondi. Le misure sono state effettuate al termine della presa (7h), dopo 1, 2, 3, 7, 14, 21, 28, 56 giorni dal getto. Fino al terzo giorno la maturazione è stata umida, poi in camera climatica. Per ogni dosaggio di espansivo si hanno 3 provini (1, 2, 3).

25 EXP [kg/m ³]												
Tempo	1	Rif.	Δ	Ritiro [μm/m]	2	Rif.	Δ	Ritiro [μm/m]	3	Rif.	Δ	Ritiro [μm/m]
7 h	2.040	5.510	3.470	0.000	1.860	5.510	3.650	0.000	2.930	5.510	2.580	0.000
1 gg	2.080	5.490	3.410	375.000	1.920	5.490	3.570	500.000	2.980	5.490	2.510	437.500
2 gg	2.060	5.480	3.420	312.500	1.960	5.480	3.520	812.500	2.960	5.480	2.520	375.000
3 gg	2.060	5.490	3.430	250.000	1.870	5.490	3.620	187.500	2.970	5.490	2.520	375.000
7 gg	2.000	5.480	3.480	-62.500	1.800	5.480	3.680	-187.500	2.890	5.480	2.590	-62.500
14 gg	1.970	5.480	3.510	-250.000	1.780	5.480	3.700	-312.500	2.870	5.480	2.610	-187.500
21 gg	1.990	5.500	3.510	-250.000	1.790	5.500	3.710	-375.000	2.880	5.500	2.620	-250.000
28 gg	1.980	5.510	3.530	-375.000	1.790	5.510	3.720	-437.500	2.870	5.510	2.640	-375.000
56 gg	1.980	5.510	3.530	-375.000	1.790	5.510	3.720	-437.500	2.870	5.510	2.640	-375.000

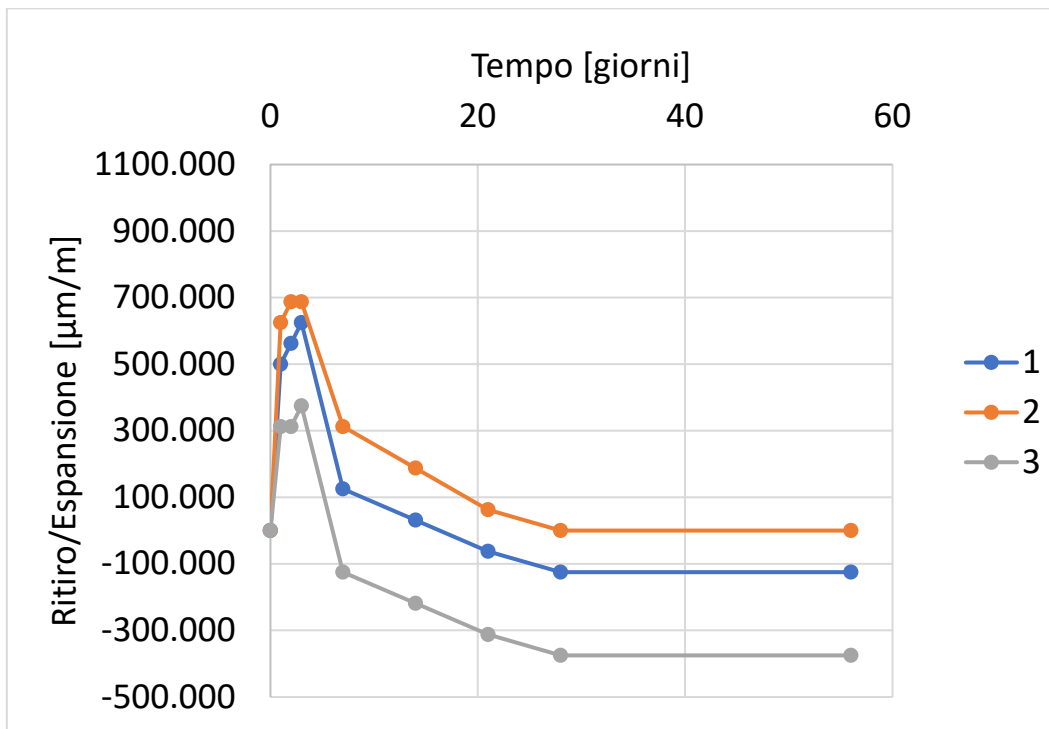


Ritiro miscela espansivo 25 kg/m³

30 EXP [kg/m ³]												
Tempo	1	rif	Δ	Ritiro [μm/m]	2	rif	Δ	Ritiro [μm/m]	3	rif	Δ	Ritiro [μm/m]
7 h	3.350	5.510	2.160	0.000	3.450	5.510	2.060	0.000	3.570	5.510	1.940	0.000
1 gg	3.490	5.490	2.000	1000.000	3.470	5.490	2.020	250.000	3.540	5.490	1.950	-62.500
2 gg	3.480	5.480	2.000	1000.000	3.470	5.480	2.010	312.500	3.530	5.480	1.950	-62.500
3 gg	3.490	5.490	2.000	1000.000	3.470	5.490	2.020	250.000	3.540	5.490	1.950	-62.500
7 gg	3.420	5.480	2.060	625.000	3.410	5.480	2.070	-62.500	3.470	5.480	2.010	-437.500
14 gg	3.400	5.480	2.080	500.000	3.380	5.480	2.100	-250.000	3.450	5.480	2.030	-562.500
21 gg	3.410	5.500	2.090	437.500	3.390	5.500	2.110	-312.500	3.460	5.500	2.040	-625.000
28 gg	3.410	5.510	2.100	375.000	3.390	5.510	2.120	-375.000	3.450	5.510	2.060	-750.000
56 gg	3.410	5.510	2.100	375.000	3.390	5.510	2.120	-375.000	3.450	5.510	2.060	-750.000

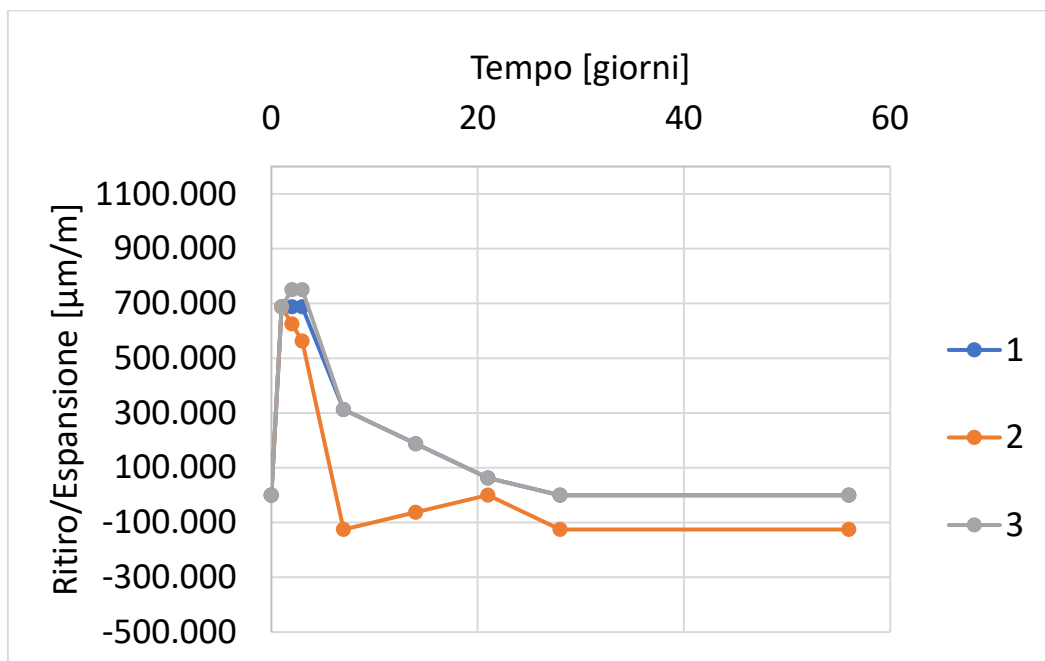


35 EXP [kg/m ³]												
Tempo	1	rif	Δ	Ritiro [μm/m]	2	rif	Δ	Ritiro [μm/m]	3	rif	Δ	Ritiro [μm/m]
7 h	3.600	5.510	1.910	0.000	3.620	5.510	1.890	0.000	3.480	5.510	2.030	0.000
1 gg	3.680	5.510	1.830	500.000	3.720	5.510	1.790	625.000	3.530	5.510	1.980	312.500
2 gg	3.690	5.510	1.820	562.500	3.730	5.510	1.780	687.500	3.530	5.510	1.980	312.500
3 gg	3.700	5.510	1.810	625.000	3.730	5.510	1.780	687.500	3.540	5.510	1.970	375.000
7 gg	3.610	5.500	1.890	125.000	3.660	5.500	1.840	312.500	3.450	5.500	2.050	-125.000
14 gg	3.600	5.505	1.905	31.250	3.645	5.505	1.860	187.500	3.440	5.505	2.065	-218.750
21 gg	3.590	5.510	1.920	-62.500	3.630	5.510	1.880	62.500	3.430	5.510	2.080	-312.500
28 gg	3.590	5.520	1.930	-125.000	3.630	5.520	1.890	0.000	3.430	5.520	2.090	-375.000
56gg	3.590	5.520	1.930	-125.000	3.630	5.520	1.890	0.000	3.430	5.520	2.090	-375.000



Ritiro miscela espansivo 35 kg/m³

40 EXP [kg/m ³]												
Tempo	1	rif	Δ	Ritiro [μm/m]	2	rif	Δ	Ritiro [μm/m]	3	rif	Δ	Ritiro [μm/m]
7 h	3.570	5.510	1.940	0.000	4.030	5.510	1.480	0.000	3.860	5.510	1.650	0.000
1 gg	3.680	5.510	1.830	687.500	4.140	5.510	1.370	687.500	3.970	5.510	1.540	687.500
2 gg	3.680	5.510	1.830	687.500	4.130	5.510	1.380	625.000	3.980	5.510	1.530	750.000
3 gg	3.680	5.510	1.830	687.500	4.120	5.510	1.390	562.500	3.980	5.510	1.530	750.000
7 gg	3.610	5.500	1.890	312.500	4.000	5.500	1.500	-125.000	3.900	5.500	1.600	312.500
14 gg	3.595	5.505	1.910	187.500	4.015	5.505	1.490	-62.500	3.885	5.505	1.620	187.500
21 gg	3.580	5.510	1.930	62.500	4.030	5.510	1.480	0.000	3.870	5.510	1.640	62.500
28 gg	3.580	5.520	1.940	0.000	4.020	5.520	1.500	-125.000	3.870	5.520	1.650	0.000
56gg	3.580	5.520	1.940	0.000	4.020	5.520	1.500	-125.000	3.870	5.520	1.650	0.000



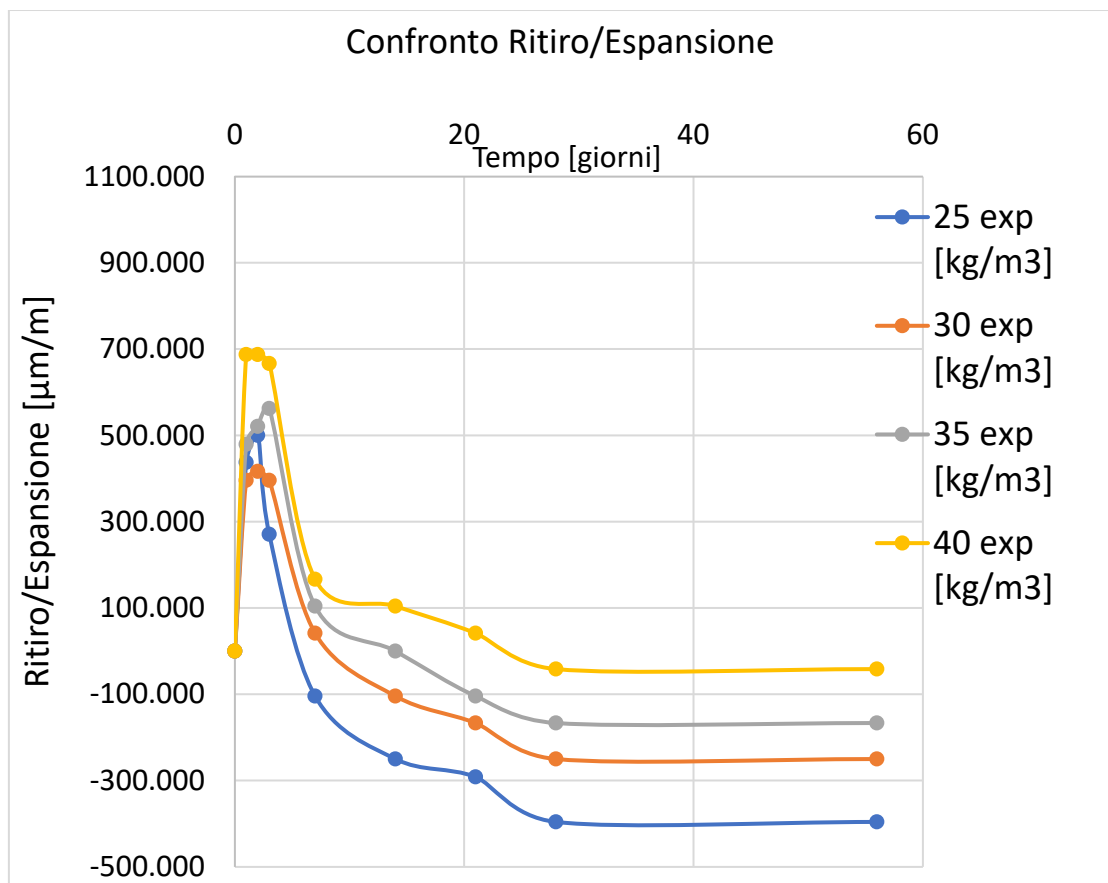
Ritiro miscela espansivo 40 kg/m³

Discussione dei risultati

Ora si procede al confronto del ritiro/espansione delle quattro miscele. Per ognuna di esse è stata effettuata la media dei tre provini a disposizione (1, 2, 3); si hanno i risultati fino al 56° giorno dal getto.

Valori medi ritiro/espansione

Tempo	25 exp [kg/m ³]	30 exp [kg/m ³]	35 exp [kg/m ³]	40 exp [kg/m ³]
7 h	0.000	0.000	0.000	0.000
1 gg	437.500	395.833	479.167	687.500
2 gg	500.000	416.667	520.833	687.500
3 gg	270.833	395.833	562.500	666.667
7 gg	-104.167	41.667	104.167	166.667
14 gg	-250.000	-104.167	0.000	104.167
21 gg	-291.667	-166.667	-104.167	41.667
28 gg	-395.833	-250.000	-166.667	-41.667
56gg	-395.833	-250.000	-166.667	-41.667



La curva di ritiro/espansione delle differenti miscele segue lo stesso andamento; nei primi tre giorni in cui i provini sono stati stagionati in ambiente umido, si nota un'espansione iniziale fino al 2° giorno per poi mantenersi costante fino al 3°. Come riportato in letteratura (M. Collepardi, M. Corradi e M. Valente, "Superplasticized shrinkage compensating concrete", Proceedings of the 2nd International Conference on Superplasticizers in Concrete, Canada Centre for Mineral and Energy Technology and American Concrete Institute, Ottawa, Giugno, (1981)) per gli espansivi a base di ossido di calcio ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$) la variazione di volume avviene entro i primi 2 giorni dal getto. La massima efficacia si ha quando la stagionatura dei provini avviene in ambiente umido (come nel nostro caso).

L'unica imperfezione dell'andamento si riscontra tra i provini con quantità di espansivo di 25 e 30 kg/m^3 , probabilmente dovuto alla preparazione delle miscele.

Nei successivi giorni, fino al 28°, quando i provini sono stati inseriti nella camera climatica (25°C, U.R. 50%), è iniziata la fase di ritiro, in cui i provini hanno raggiunto al massimo una contrazione di 400 $\mu\text{m/m}$. Dal 28° giorno in poi il ritiro si è mantenuto costante fino al termine della prova.

A differenza delle prove meccaniche in questo caso è stato riscontrato un aumento dell'espansione nei provini contenenti più espansivo.

Capitolo 6

Conclusioni

I principali effetti negativi sulle costruzioni del ritiro sono vari e dipendono dall'ambiente e dal tipo di struttura; perdita di precompressione nelle strutture precomprese, deformazioni permanenti delle strutture e formazione di fessure a seguito dell'incremento di tensioni di trazione nel cls.

A seguito di quest'ultimo effetto si potrebbero creare delle vie preferenziali per l'ingresso di sostanze degradanti che potrebbero portare ad un rapido degrado dell'elemento e della struttura.

A seguito dello studio svolto in laboratorio si è potuto constatare che utilizzando la giusta dose di espansivo è possibile ridurre al minimo l'espansione/ritiro del UHPFRC, dimostrando che questo materiale, grazie anche all'estrema compattezza e densità, risulta difficilmente aggredibile da agenti degradanti con conseguente aumento della durabilità del materiale. A dimostrazione di ciò si nota all'interno dei provini sottoposti alla prova un'elevata quantità di cemento anidro, nemmeno l'acqua è riuscita ad entrare nelle zone più interne dei provini.

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 Collepari, Silvia Collepari, Roberto Troli. Il nuovo calcestruzzo, sesta edizione. ENCO 2015.
25. Mario Collepari. 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

Se ripenso alla prima volta che sono entrato in aula e al termine delle lezioni di Analisi e Geometria aver pensato “ma io cosa sto facendo qui? ...” e vedere dove sono arrivato ora dopo questo lungo percorso, non mi sembra nemmeno vero, un sogno.

Per questo motivo vorrei ringraziare i miei genitori, mio fratello e i miei nonni, senza di loro probabilmente non avrei avuto l’opportunità di intraprendere questo percorso.

Un ringraziamento anche ai miei amici che durante tutto questo cammino un sorriso me l’hanno sempre strappato, anche quando sembrava impossibile.

Ringrazio Alessia che grazie alla sua enorme pazienza mi ha sempre supportato e incoraggiato a non mollare.

Vorrei in fine ringraziare la Professoressa Valeria Corinaldesi e il Dottorando Nicola Generosi per avermi dato la possibilità di svolgere con passione questo studio.