



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
Facoltà di Ingegneria

---

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Valutazione del comportamento meccanico e deformativo di  
miscele Ultra High Performance Concrete

Evaluation of the mechanical and strain behavior of Ultra  
High Performance Concrete mixtures

*Relatore:*  
Prof.ssa Ing. Valeria Corinaldesi

*Tesi di Laurea di:*  
Luca Cordisco

---

Anno Accademico 2018-2019

*Ai miei genitori*

*A mio fratello*

*Alle mie sorelle*

# Indice

<b>Sommario.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Introduzione .....</b>	<b>2</b>
1.1 L'evoluzione del materiale: dal calcestruzzo ordinario ai UHPC.....	2
1.2 Scopi e finalità del materiale cementizio innovativo .....	4
1.3 Benefici degli UHPC.....	5
1.4 Principali applicazioni degli UHPC .....	7
1.5 Normativa di riferimento.....	13
<b>2. Tecnologia degli UHPC .....</b>	<b>16</b>
2.1 Composizione generale .....	16
2.2 Cemento .....	17
2.3 Aggregati.....	19
2.4 Il ruolo dei superfluidificanti .....	20
2.5 Fumi di silice.....	23
2.6 Fibre .....	25
2.6.1 Fibre in acciaio ottonate.....	29
<b>3. Prestazioni meccaniche e chimico-fisiche degli UHPC.....</b>	<b>30</b>
3.1 Comportamento a compressione .....	30
3.2 Comportamento a trazione .....	32
3.3 Durabilità.....	34
3.4 Cambi di volume e fenomeni di ritiro .....	34
3.4.1 Stagionatura .....	38
<b>4. Fase sperimentale.....</b>	<b>42</b>
4.1 Materiali impiegati .....	43

4.2	Mix design.....	47
4.3	Fasi operative .....	49
4.4	Classificazione dei provini .....	52
4.5	Prove eseguite .....	54
4.5.1	Prova a flessione .....	54
4.5.2	Prova a compressione .....	56
4.5.3	Prova determinazione ritiro assiale.....	57
<b>5.</b>	<b>Risultati sperimentali .....</b>	<b>58</b>
5.1	Prova flessione a tre punti .....	58
5.2	Prova a compressione.....	84
5.3	Prova di determinazione del ritiro assiale .....	108
<b>6.</b>	<b>Conclusioni .....</b>	<b>119</b>

## Sommario

Il termine UHPC sta per calcestruzzo fibrorinforzato ad altissime prestazioni (Ultra High Performance Concrete). Non è apparso dal nulla, ma da decenni di evoluzione sulla tecnologia concreta e il duro e approfondito lavoro della comunità scientifica internazionale e delle società private. Questo termine comprende diverse proprietà e tecnologie che sono nascoste al di là del significato letterale di ogni parola. L'acronimo UHPC è stato coniato per la prima volta nel 1994 in riferimento ad un materiale ottimizzato con l'impiego di particelle fini e ultrafine che permettono di garantire una microstruttura a bassa porosità, priva di imperfezioni e autocompattante. Esso nasce, infatti, per migliorare le risposte del materiale da un punto di vista meccanico e parallelamente risolvere i problemi relativi ai calcestruzzi ordinari, caratterizzati da scarsa duttilità e durabilità. Tutto ciò, ha portato ad una riduzione drastica dei costi di manutenzione delle strutture ed un minore impatto ambientale rispetto al normale ciclo vitale di un calcestruzzo ordinario. Tale calcestruzzo UHPC mostra una notevole resistenza meccanica a compressione, con valori anche superiori a 150 Mpa. Questa notevole resistenza, richiede una minima duttilità del materiale, che è fornita dall'impiego di fibre, conferenti buona resistenza a trazione.

Presso il Laboratorio di Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU) nell'Università Politecnica delle Marche di Ancona, abbiamo condotto uno studio volto ad esaminare il comportamento di UHPC da un punto di vista meccanico e deformativo, realizzando una serie di provini. L'obiettivo del presente studio è quello di valutare il diverso comportamento dei provini a diverse stagionature e a differenti volumi di fibre in acciaio ottonate.

# 1. Introduzione

## 1.1 L'evoluzione del materiale: dal calcestruzzo ordinario ai UHPC

Più di 2.000 anni fa, i Romani iniziarono a realizzare opere in calcestruzzo che aveva però una composizione diversa da quello utilizzato oggi. Era un calcestruzzo più debole rispetto a quelli moderni ma aveva la caratteristica di mantenere inalterata, per lunghissimo tempo, la sua resistenza; infatti ancora oggi possiamo ammirare molte strutture Romane, tra le più importanti il Pantheon. Una delle differenze tra i calcestruzzi moderni e il calcestruzzo romano era il diverso legante utilizzato, al posto del cemento nell'epoca Romana si usava la calce, ottenuta dall'estrazione di rocce calcaree, frantumate e sottoposte a cottura ad elevate temperature. Da questo processo si otteneva calce viva; successivamente con l'aggiunta di acqua avveniva la reazione di spegnimento che dava origine alla calce spenta o calce idrata ( $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$ ), una polvere fine impiegata come legante nei calcestruzzi.

A partire dalle prime applicazioni di Monier e Hennebique fino agli esperimenti più arditi di Nervi e Utzon, il materiale è riuscito nell'intento di conciliare le esigenze funzionali degli edifici moderni con i problemi connessi alla loro progettazione, garantendo ad ogni singolo progettista la possibilità di plasmare il materiale in una varietà di edifici e strutture mai vista in precedenza nella storia dell'architettura e dell'ingegneria. Da più di cent'anni dalla sua invenzione, accanto ai vantaggi che tale materiale offre, quali facilità di esecuzione, costo ridotto dei componenti, versatilità di utilizzo, si evidenziano diversi svantaggi, sia dal punto di vista prestazionale sia della sostenibilità ambientale, che spesso fanno preferire al suo utilizzo quello dell'acciaio, maggiormente eco-compatibile e dal miglior comportamento strutturale nonché antisismico. Degno di attenzione sono le problematiche legate alla durabilità delle strutture in c.a. Negli anni 90 in Italia, una

serie di studi hanno evidenziato che circa il 70% di queste strutture presenta condizioni di degrado avanzato. Le cause sono svariate tra cui l'impiego di materiali facilmente degradabili dagli agenti ambientali, il confezionamento scadente del calcestruzzo, l'insufficiente copriferro e le modalità di posa in opera scadente. Nasce così un settore di ricerca volto all'implementazione delle caratteristiche proprie del materiale ed, in modo peculiare, all'ottimizzazione delle prestazioni meccaniche, al miglioramento della durabilità delle strutture nonché alla riduzione delle emissioni inquinanti. Il lavoro di ricerca ha portato allo sviluppo di nuovi additivi e di aggiunte minerali e non, accanto allo studio attento dei processi di stagionatura e del mix-design, si è giunti a calcestruzzi "high-tech" con prestazioni sempre più avanzate. Vengono alla luce i cosiddetti calcestruzzi DSP (Densified with Small Particle) in cui viene sperimentato il binomio fumo di silice-superfluidificante. L'aggiunta del Fumo di Silice porta ad un aumento della densità del conglomerato, vista la capacità delle particelle ultra-fini di riempire i vuoti interstiziali tra i granuli di cemento. La riduzione della porosità, così ottenuta, favorisce l'impenetrabilità agli agenti corrosivi, oltre ad un aumento delle resistenze rispetto ai calcestruzzi ordinari a discapito di un notevole aumento di acqua, necessaria per il confezionamento del conglomerato. La soluzione a tale inconveniente arriva, dunque, con l'utilizzo dei superfluidificanti, che favoriscono un basso rapporto a/c in favore di un miglior comportamento microstrutturale. Questo binomio ideale da origine ad una pasta cementizia più resistente degli aggregati che diventano il punto debole del materiale, assieme a quella sottilissima area posta a confine tra aggregato e matrice, detta "zona di transizione".

Tra gli studi scientifici a riguardo, spiccano quelli di Mario Collepardi, nei quali si evidenzia l'importanza dell'interfaccia aggregato-matrice cementizia attraverso la sostituzione di rocce calcaree con rocce di migliori prestazioni meccaniche.

Nonostante le ottime prestazioni meccaniche e di resistenza alle aggressioni ambientali, anche il calcestruzzo DSP, denota limiti prestazionali nel comportamento deformativo proveniente dalla natura estremamente fragile del materiale, con brusca perdita di resistenza in fase post-picco. In caso di incendio,

l'impermeabilità della matrice cementizia, risulta un limite. Essa, infatti si oppone alla fuoriuscita del vapore acqueo generato dal surriscaldamento dell'acqua in esso contenuta, causando un aumento di pressione interna, con esplosione delle parti corticali del calcestruzzo (spalling).

La cura a tali limiti, si ha negli anni '90, con l'avvento dei calcestruzzi RPC (Reactive Powder Concrete) ottenuti aggiungendo al calcestruzzo DSP, fibre di diverso materiale; tra le più diffuse in acciaio e polimeriche. Le prime aumentano la duttilità e riducono i fenomeni di rottura con assorbimento degli sforzi. Le seconde, efficaci in caso di incendio, perché consentono di mitigare sensibilmente il fenomeno dello spalling.

Fonte di ispirazione sono stati gli studi effettuati in Francia da Richard e Cheyrezy, capisaldi in materia; gli esiti sono stati materiali con ultra-prestazioni meccaniche e resistenze elevate a compressione ( $>200$  MPa), migliorando radicalmente la resistenza flessionale (50 MPa) e soprattutto la duttilità del materiale (energia di frattura di 10000-30000 J/m<sup>2</sup>).

Sulla scia degli studi effettuati soprattutto in ambito francese, negli anni sono state sviluppate e brevettate varie tipologie di RPC (l'RPC200 e l'RPC800), che si configurano per la loro natura come veri e propri materiali compositi, e che sono stati contraddistinti, con svariate sigle: HSC, HPC, FRC, UHPC, UHFRC.

## **1.2 Scopi e finalità del materiale cementizio innovativo**

L'interesse nei confronti di nuovi materiali per l'edilizia, scaturisce dalla consapevolezza che il settore delle costruzioni è responsabile di notevoli impatti ambientali, legati sostanzialmente all'elevato consumo di energia e di risorse naturali, nonché alla produzione di rifiuti e allo sfruttamento del territorio. In un'ottica del costruire indirizzata verso l'ottimizzazione e l'affidabilità delle prestazioni di prodotti, sistemi e componenti, i materiali innovativi, infatti,



sembrano poter contribuire alla realizzazione di soluzioni più efficienti ed orientate al risparmio di risorse energetiche e naturali nell'intero ciclo di vita.

Un materiale innovativo deve essere progettato, realizzato e applicato con lo scopo primario di contenere i consumi energetici, le emissioni di inquinanti ed i quantitativi di rifiuti, garantendo, contestualmente, eccellenti prestazioni meccaniche ed elevati requisiti di sicurezza e di comfort abitativo. Tra i calcestruzzi innovativi, gli UHPC nascono dalla necessità di “migliorare” i calcestruzzi tradizionali al fine di rispondere alle esigenze che il moderno settore edile riscontra sia in termini di sicurezza strutturale, sia di durabilità. In particolare, rispetto ai calcestruzzi tradizionali, presentano migliori proprietà meccaniche in termini di resistenza, durabilità e stabilità.

Tipicamente tali proprietà sono garantite da:

- impiego di un elevato contenuto di cemento a basso tenore di celite (oltre  $700 \text{ kg/m}^3$ );
- un ridotto rapporto a/c (acqua/cemento) per l'impiego di additivi superfluidificanti;
- impiego di aggiunte minerali (es: fumo di silice) prive di incombusti;
- aggregati di frantumazione di alta qualità (basalto, granito, quarzite, ecc.) capaci di assicurare un'elevata resistenza meccanica ed un'ottima adesione all'interfaccia tra aggregato e matrice cementizia;
- aggiunta di fibre che conferiscono al materiale un comportamento duttile.

### **1.3 Benefici degli UHPC**

L'Ultra High Performance Concrete viene considerato un materiale estremamente costoso rispetto al calcestruzzo ordinario ma ha molti vantaggi da un punto di vista prestazionale:

- resistenza a flessione e a trazione nettamente superiore 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 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;
- 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);
- completa assenza di fenomeni fessurativi (anche in ambiente caldo/secco) e impiego di aggiunte minerali ad attività pozzolanica (resistenza in ambienti aggressivi), con positive ricadute in termini di durabilità (vita utile oltre i 200 anni) e, conseguentemente, con un notevole risparmio in termini di costi di manutenzione (vantaggio economico notevolissimo in termini di Life Cycle Costs);
- minore impiego di armature metalliche, quindi risparmio economico, in particolare per l'eliminazione delle staffe (minori costi nell'acquisto del materiale ma anche processo produttivo semplificato, con ulteriori risparmi di manodopera e di tempi di realizzazione);
- 'eco-innovation' grazie all'impiego di sottoprodotti industriali per promuovere l'attivazione chimica della matrice cementizia. L'utilizzo di aggiunte minerali, come fumo di silice, rifiuti solidi recuperati da processi industriali, ceneri volanti e loppa, che scaturisce in un progresso significativo verso l'obiettivo dello sviluppo sostenibile riducendo l'impatto delle nostre modalità produttive sull'ambiente.

## 1.4 Principali applicazioni degli UHPC

Nella seconda metà degli anni '90, accanto agli studi in merito alle caratteristiche meccaniche del materiale, iniziano già a realizzarsi alcune applicazioni pratiche nel settore dell'ingegneria civile, volte a sfruttare a pieno le proprietà di leggerezza, resistenza e durabilità degli UHPC. La prima opera al mondo è la "Passerelle" di *Sherbrooke*, in Canada (Figura 1) che ha garantito una elevata durabilità in condizioni di esercizio gravose (sali marini, acqua di condensa, cicli gelo-disgelo, elevati sbalzi termici, ecc) rendendo possibile una straordinaria libertà architettonica ed estetica per il progettista.

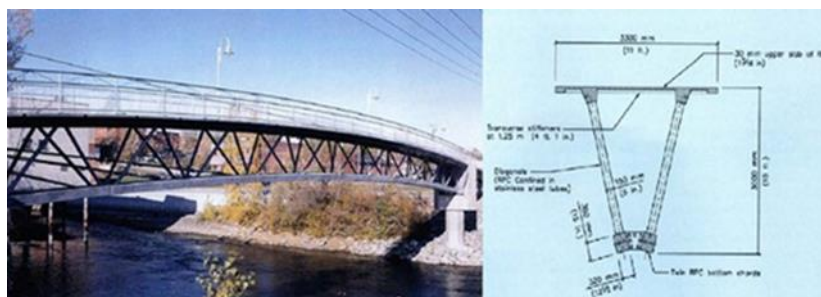


Figura 1-Ponte pedonale di Sherbrooke (Canada)

Il ponte pedonale è costituito da sei elementi prefabbricati assemblati in opera mediante post-tensione, con campata di 60 m. Gli elementi prefabbricati sono costituiti da una struttura reticolare spaziale la cui soletta superiore, realizzata in calcestruzzo a polvere reattiva, ha uno spessore di soli 3 cm, larghezza di 330 cm ed è priva di armatura. La soletta superiore è collegata a due travi gemelle disposte sulla parte inferiore dell'elemento prefabbricato anch'esse realizzate da elementi tubolari in acciaio riempiti con RPC privo di fibre. La realizzazione di questi elementi è avvenuta in un normale stabilimento di produzione di manufatti prefabbricati in cemento armato e cemento armato precompresso. Sia il mescolamento dell'impasto che il getto all'interno degli stampi, è stato realizzato,

quindi, con un normale impianto di betonaggio e con i sistemi classici di posa in opera e compattazione del calcestruzzo ordinario.

A seguito di questa prima realizzazione sono iniziati diversi studi, ad opera principalmente delle industrie francesi Bouygues e Lafarge, sulle differenti sezioni possibili da utilizzare nella realizzazione di ponti pedonali e ciclabili in grado di sfruttare al meglio le proprietà e approfondire sia l'influenza dell'orientamento delle fibre al momento del getto sia la facilità delle operazioni di prefabbricazione. Tali risultati hanno condotto alla realizzazione della sezione a Pi, utilizzata per la prima volta nel "Peace Footbridge" (Figura 2) costruito a Seoul, in Corea del Sud nel 2002.



*Figura 2-Ponte pedonale Peace Footbridge (Corea del Sud)*

Si tratta di un ponte pedonale che collega la capitale coreana all'isola di Seonyu. Il cantiere è stato realizzato dalla VSL-Intrafor, filiale della Bouygues Construction specializzata in precompressi e fondazioni con calcestruzzo Ductal® fornito da Lafarge; si tratta di un calcestruzzo innovativo messo a punto dagli specialisti della Bouygues Construction, Lafarge e Rhodia. La passerella, progettata dall'architetto Rudy Ricciotti, comprende un arco di 120 m di portata (costituito da sei conci

prefabbricati assemblati e post-tesi in opera lunghi 20 metri ed alti 1,3 metri) su cui posa un cassero di soli 3 cm di spessore. Quest'opera presenta proporzioni estremamente slanciate, impossibili da realizzare con calcestruzzo tradizionale. Il calcestruzzo utilizzato in quest'opera possiede proprietà eccezionali: l'altissima resistenza alla compressione ed alla flessione ne fanno un materiale duttile. Alla capacità di sopportare sforzi rilevanti si aggiunge la resistenza all'abrasione, all'aggressione dell'inquinamento, alle intemperie ed alle scalfitture.

Tali realizzazioni hanno aperto la strada a nuovi progetti di passerelle e ponti pedonali realizzati di recente e che utilizzano differenti tipologie strutturali (sistemi scatolari, sezioni a Pi, a T ed a U). Tra questi segnaliamo il Papatoe footbridge in Nuova Zelanda, il Sakata Mirai footbridge in Giappone e più recentemente, nel 2009, l'Angels Footbridge in Francia, progettato sempre da Rudy Ricciotti e con campata di 70 m.

Gli UHPC poi sono stati utilizzati anche per la realizzazione di ponti stradali e ferroviari. In Francia, un gruppo di industrie ha portato avanti il progetto in stretta collaborazione con le autorità statali, riuscendo a definire importanti valori in merito all'orientamento delle fibre ed alla loro capacità di sopportare gli sforzi taglianti, sviluppando una trave tipo prefabbricata e con cavi precompressi. A seguito di tale opera si sono costruiti diversi ponti nel mondo, soprattutto in Francia, Nord America, Australia e Giappone.

Uno dei progetti più importanti, è quello del *Wapello County Bridge* nell'Iowa (Figura 3). Si tratta infatti del primo ponte autostradale realizzato nel Nord America, a seguito di una stretta collaborazione tra la FHWA (Federal Highway Administration), il Dipartimento dei Trasporti e l'Università dell'Iowa e Lafarge Nord-America. La sua realizzazione è avvenuta nel 2006, dopo quattro anni di studi, e nonostante la sua semplicità ha fornito un grande apporto nel programma.



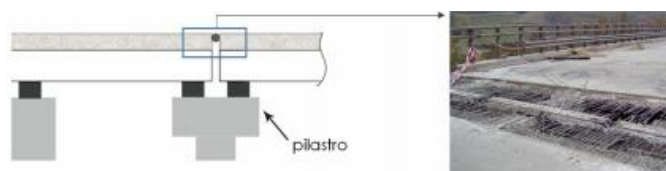
*Figura 3- Wapello Country Bridge (Iowa, USA)*

In modo particolare trattasi di un ponte a campata unica di 33.5 m che utilizza 3 travi prefabbricate a doppio T, con cavi precompressi e senza armatura di rinforzo passivo. Le travi sono state testate con prove a larga scala sia in laboratorio, testando a flessione e taglio travi di 23 m, sia in-situ, utilizzando una motrice per simulare il carico mobile da traffico. Tutti i test hanno fornito risultati in termini di curva carichi-inflessione migliori dei valori utilizzati in fase progettuale.

Ulteriori applicazioni, vanno dalla realizzazione di giunti strutturali alla ristrutturazione di tunnel e dalla realizzazione di solette prefabbricate e precomprese all'uso del materiale senza alcun tipo di rinforzo o armatura (precompressa o passiva) come nel caso della realizzazione di scale. Uno dei casi più importanti di prima applicazione in Italia, è stato il risanamento dei giunti su impalcati dell'autostrada del Brennero A22, con l'impiego di calcestruzzo fibrorinforzato a basso modulo elastico ed elevata duttilità. Il degrado riscontrato, era dovuto alla presenza di elevati giunti di dilatazione che non riuscivano, con il passare del tempo, a garantire un'efficace tenuta all'acqua, contenente cloruri.

Dalle immagini (4a, 4b, 4c, 4d) riportate, possiamo notare il forte degrado prima del ripristino, causato dall'accesso dei sali decongelanti alle selle d'appoggio delle

travi ed al successivo percolamento sui pilastri con attacchi da cloruri alle armature lente.



*Figura 4a-Condizione prima del ripristino*



*Figura 4b-Ripristino del giunto tramite solette duttili*



*Figura 4c-Getto del giunto*

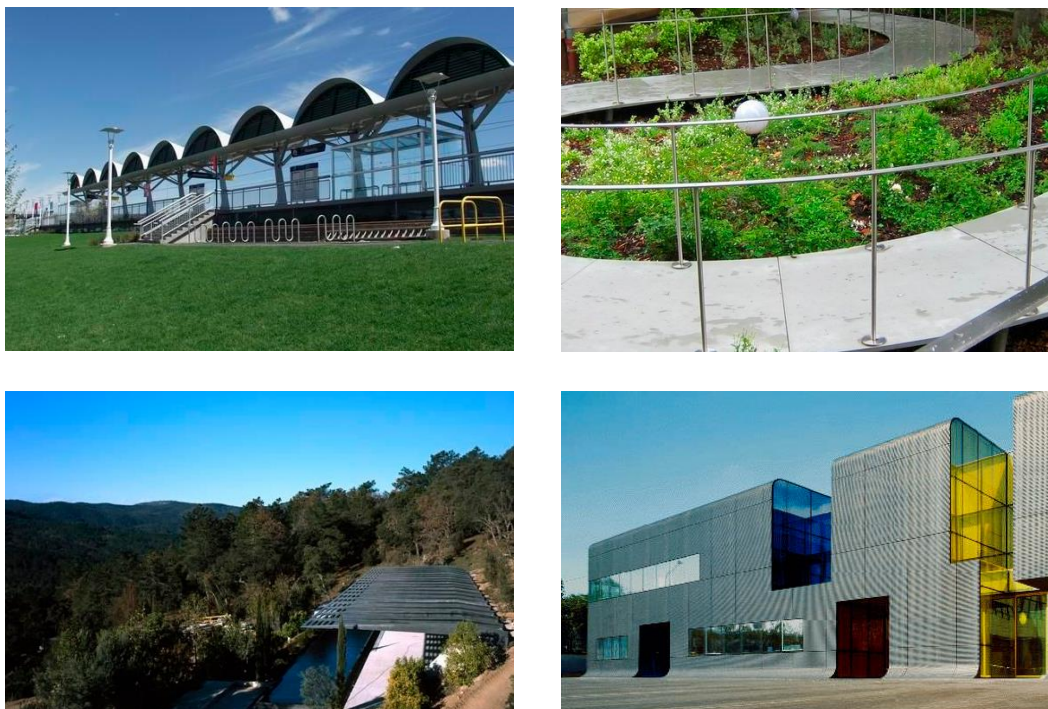


*Figura 4d-Rifinitura della superficie*

La tecnologia impiegata in questi interventi di ripristino è l'HFE-tec (High Fracture Energy Technologies) è volta all' applicazione di prodotti e sistemi a vasto spettro applicativo. Essa è in grado di assorbire grosse deformazioni, come nei casi conseguenti a sollecitazioni sismiche, senza cedimenti strutturali con il controllo della formazione di microfessurazioni, evitando così il "collasso fragile". La possibilità di avere un materiale altamente resistente, modellabile e con dimensioni



in sezione notevolmente ridotte, ha reso realizzabile per gli architetti e i designer una nuova serie di forme e volumi precedentemente inaspettati, con una grande varietà estetica. Si ricordano tra le altre le pensiline 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 Thiasis in Francia (Figura 5).



*Figura 5-Esempi di applicazioni non strutturali*



## 1.5 Normativa di riferimento

La tecnologia del calcestruzzo ha messo a disposizione negli ultimi anni materiali sempre più performanti dal punto di vista della resistenza, della lavorabilità, della durabilità e, ora, anche della tenacità con il calcestruzzo fibrorinforzato. Le conoscenze sulle potenziali applicazioni strutturali del FRC si sono progressivamente diffuse negli ultimi anni in tutto il mondo, facendo sorgere la necessità di disporre di Linee Guida o Istruzioni tecniche in grado di orientare e disciplinare l'impiego strutturale di tali materiali. Dopo la pubblicazione di alcuni documenti da parte del CEN (UNI EN 14651), UNI (UNI U73041440-2004, UNI 11039-2003), RILEM (RILEM-2000, RILEM-2001), ACI (ACI Committee 544-1999 e 1996) JCI (JCI-1984)9], il Codice Modello del fib (fib Bulletin 55-56, Model Code 2010) ha recentemente introdotto il FRC che entra a pieno titolo tra i materiali da costruzione fornendo indicazioni per la sua classificazione, in aggiunta alle principali regole di progettazione. Il Codice Modello del fib classifica il materiale in base alle prestazioni del composito, come succede ormai da anni per i materiali strutturali. Nel caso specifico, per la caratteristica peculiare del FRC, cioè la tenacità, si basa sulla resistenza residua che il materiale è in grado di offrire durante una prova di flessione su 3 punti, in accordo con la UNI EN 14651. un materiale per impieghi strutturali può essere preso in considerazione da un Progettista nella misura in cui può essere prescritto in forma prestazionale all'Impresa che dovrà poi garantirla sotto la sorveglianza della Direzione Lavori. Ciò non è possibile quando ci si limita a prescrivere il solo dosaggio di fibra in quanto questo non rappresenta alcuna garanzia sul raggiungimento delle prestazioni del materiale in fase di calcolo, in quanto queste non dipendono solo dalla fibra ma anche dalla matrice cementizia. Per i motivi sopraelencati, serviva quindi classificare il materiale, oltre che per la resistenza, la consistenza e la classe di esposizione, anche per la tenacità. La classificazione ha poi maggior valore se consente al Progettista di determinare i valori di progetto utili per il dimensionamento, come succede per la prova di compressione (si raggiungono così due obiettivi con una sola prova). Questo è stato

il principio che ha ispirato il Model Code 2010 nel proporre la classificazione del FRC. La pubblicazione del nuovo Codice Modello del fib, ha favorito certamente l'introduzione del FRC nelle principali normative europee e consentito un notevole sviluppo dei campi di applicazione strutturali. In conclusione, si vuole sottolineare che non tutte le fibre sono in grado di garantire al composito i valori minimi che il Codice Modelle del fib richiede per gli impieghi strutturali del FRC, requisito necessario affinché il FRC possa sostituire, anche parzialmente, l'armatura convenzionale.

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 1).

*Tabella 1-Parametri da riportare sulla confezione delle fibre*

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

Un'altra novità riguarda il fatto che le Linee Guida ammettano 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 dimostrato in Figura 6.

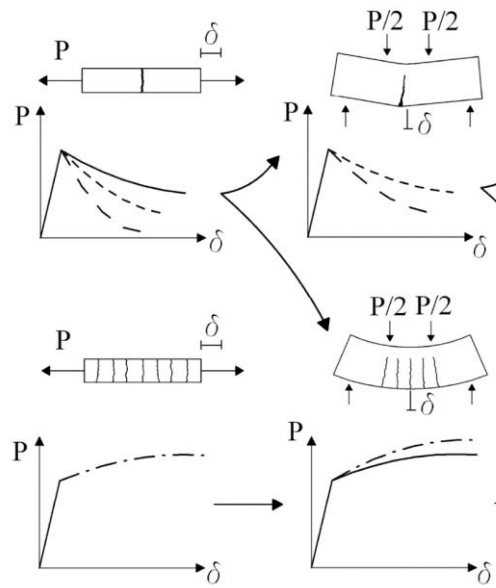


Figura 6-Risposta meccanica di strutture caratterizzate da capacità redistributive differenti: trazione uniassiale e flessione

## 2. Tecnologia degli UHPC

### 2.1 Composizione generale

La definizione di Ultra High Performance Concrete deriva dagli studi del passato e anni di ricerche. Le sue proprietà sono decisamente superiori in termini di resistenza, durabilità e stabilità sul lungo periodo, rispetto ai calcestruzzi ordinari ed a quelli ad alta resistenza. Le sue caratteristiche derivano dai suoi principali componenti: la matrice cementizia, le fibre e dalla loro interazione.

I principali componenti che costituiscono una miscela di UHPC, differiscono in maniera sensibile da quella di un calcestruzzo ordinario (Tabella 2) per l'alto contenuto di cemento, per scelta degli aggregati e per il bassissimo rapporto a/c.

Si raggruppano principalmente in tre parti:

- un premix, che comprende la miscela granulare composta da cemento, fumo di silice, vari aggregati (basalto, granito, ecc) e sabbia. La finezza degli aggregati rende omogeneo l'impasto, il fumo di silice riduce la porosità con conseguente incremento delle resistenze meccaniche e incremento dell'impermeabilità;
- parte liquida, ovvero l'acqua e i superfluidificanti usati per garantire una lavorabilità accettabile dell'impasto, poiché gli inerti, a causa della ridotta dimensione, tendono ad aggregarsi;
- le fibre metalliche per aumentare resistenza a trazione e duttilità e fibre in polivinilcol o in polipropilene per ottenere una resistenza al fuoco migliorata.

Il Mix-design è letteralmente il "progetto della miscela"; più estesamente è il calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle:

- proprietà ingegneristiche del materiale indurito (resistenza meccanica, modulo elastico, ritiro, scorrimento viscoso, durabilità);

- esigenze esecutive (lavorabilità, organizzazione del cantiere, modalità di getto, densità dei ferri);
- materie prime disponibili (cemento, inerti, additivi).

Il risultato finale del Mix-design è la composizione del calcestruzzo in una tabella dove si riportano i dosaggi, in  $\text{kg/m}^3$ , dei vari ingredienti.

*Tabella 2- Esempio di composizione di un calcestruzzo ordinario, di un HPC e di un UHPC (Spasojevic, 2008)*

<b>Componenti [<math>\text{kg/m}^3</math>]</b>	<b>Calcestruzzo ordinario</b>	<b>HPC</b>	<b>UHPC</b>
Cemento Portland	<400	410	700-1000
Aggregato grosso	$\approx$ 1000	920	0-200
Aggregato fine, sabbia	$\approx$ 700	620	1000-2000
Fumi di silice	-	40	200-300
Superfluidificanti	-	5	10-40
Acqua	>200	100-150	110-200
Fibre	-	-	>150
Rapporto a/c	>0.35	0.28-0.38	<0.24
Rapporto a/legante	-	<0.38	<0.22
Densità	2000-2800	2000-2800	>2500

## 2.2 Cemento

Il cemento impiegato per il confezionamento di calcestruzzi ad alta resistenza, deve essere conforme all'ottenimento delle caratteristiche di resistenza a compressione; viene richiesto dunque l'uso di cementi ad alta resistenza meccanica.

La normativa vigente distingue i leganti idraulici con tre classi di resistenza a compressione (Tabella 3), tratta dalla UNI EN 197-1 (2011), aggiornamento della norma UNI EN 197-1 (2006).

Tabella 3-Classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici

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

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 e mezzi di posa in opera. 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 monoliticità 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) o alluminato tricalcico che è, infatti, uno dei costituenti

mineralogici del cemento Portland ed è anche il composto caratterizzato dal maggior sviluppo di calore in assoluto.

## 2.3 Aggregati

In merito alle considerazioni precedenti, un UHPC 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.

La ricerca e le sperimentazioni passate (Kýlýc et al., 2008), hanno dimostrato come varie tipologie di aggregato influenzino diversamente le caratteristiche meccaniche di un UHPC. 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 aggregati con un alto valore di resistenza all'abrasione producono un calcestruzzo con alta resistenza all'abrasione. I risultati ottenuti hanno affermato che la migliore resistenza a compressione è 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. Il calcestruzzo realizzato con il basalto invece è limitato dalla resistenza a compressione della pasta e non attinge a tutto il potenziale dell'aggregato. 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.

Altri parametri connessi alla natura degli aggregati presenti nel premiscelato, vanno ad influenzare il comportamento degli UHPC. Innanzitutto si è visto che la resistenza a compressione migliora quando il rapporto tra aggregati (in modo particolare sabbie) e cemento è pari a 1.1 e che l'utilizzo combinato di aggregati di granulometria differente migliora notevolmente le prestazioni di un UHPC rispetto all'uso di un solo componenti (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  $\mu\text{m}$ ) 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.

## **2.4 Il ruolo dei superfluidificanti**

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

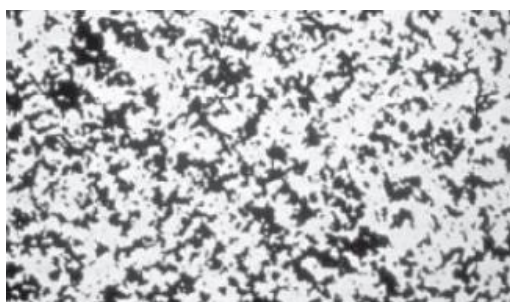


a discapito del contenuto d'acqua, l'uso dei superfluidificanti richiede l'impiego di una quantità direttamente proporzionale al contenuto dei fumi.

L'uso di questi additivi porta a dei vantaggi, tra cui:

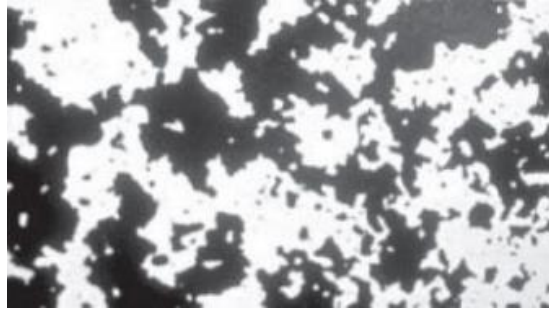
- l'aumento della lavorabilità, prefissata la composizione della miscela, al fine di migliorare la messa in opera;
- la riduzione del rapporto a/c e quindi aumentano la resistenza e la durabilità;
- la riduzione del creep, il ritiro e le deformazioni indotte dal calore di idratazione, riducendo il contenuto di cemento sia quello d'acqua, prefissata la lavorabilità e la resistenza.

Il principale beneficio di questi additivi, basati su polimeri sintetici idrosolubili, è l'effetto deflocculante sui granuli di cemento nel mezzo acquoso; ovvero causare la dispersione degli agglomerati in granuli più piccoli (Figura 7a).



*Figura 7a- Osservazione al microscopio di una pasta di cemento dispersa per la presenza di superfluidificante*

Il fenomeno della flocculazione, si verifica quando la miscela di cemento è molto diluita in acqua presentandosi in grossi agglomerati tenuti distanti tra loro (Figura 7b). Tutto ciò, deriva dall'attrazione di natura elettrostatica tra i vari granuli di cemento a seguito delle cariche elettrostatiche di segno opposto che si sono formate sulle superfici dei granuli per effetto della macinazione (e della rottura dei legami ionici presenti nei costituenti del clinker) durante il processo produttivo del cemento.



*Figura 7b-Osservazione al microscopio di una pasta di cemento dispersa per la presenza di superfluidificante*

La deflocculazione può avvenire attraverso due modalità (Figura 8):

- adsorbimento sulla superficie dei granuli di cemento delle molecole di superfluidificante e formazione di cariche elettrostatiche dello stesso segno (negative) che provoca una repulsione elettrostatica tra i granuli di cemento
- adsorbimento sulla superficie dei granuli di cemento delle molecole di superfluidificante PA che grazie alla ingombrante presenza delle catene laterali, impedisce ai granuli di cemento di avvicinarsi e di flocculare.

Un corretto uso dell'additivo superfluidificante comporta anche miglioramenti a parità di resistenza e fluidità, come conseguenza di una contemporanea riduzione dell'acqua e del cemento, ovvero:

- la riduzione del ritiro igrometrico;
- la riduzione dei gradienti termici;
- la riduzione del creep e delle altre deformazioni differite nel tempo.

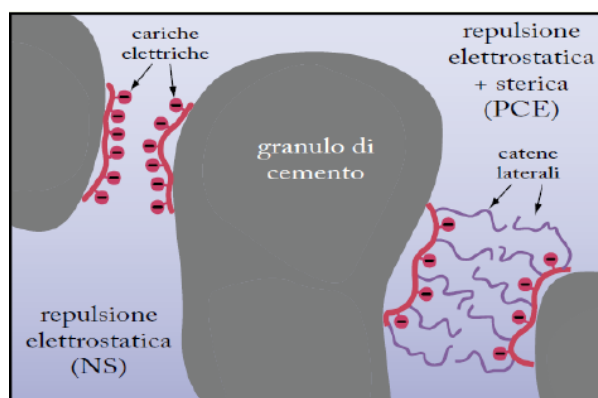


Figura 8-Repulsione elettrostatica e impedimento sterico

## 2.5 Fumi di silice

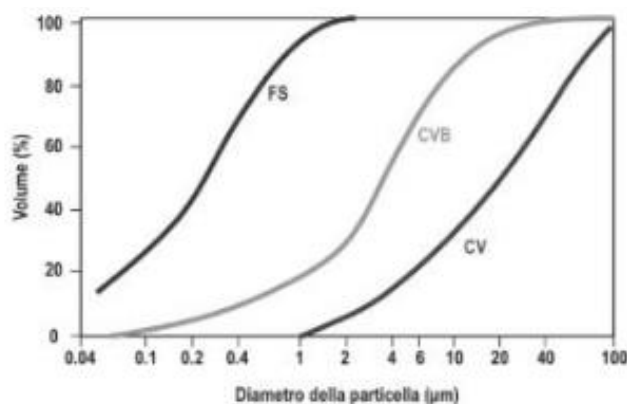
Il fumo di silice (Silica Fume, o SF) è una polvere formata da particelle in gran parte al di sotto di 1  $\mu\text{m}$  e costituita quasi esclusivamente da silice amorfa. Il fumo di silice si ottiene come sottoprodotto dell'industria di produzione al forno elettrico del silicio o delle leghe ferro-silicio. L'elevata complessità delle reazioni chimiche per la produzione, oltre ad una scarsa disponibilità, unitamente alla forte richiesta per le eccellenti caratteristiche ottenibili nei calcestruzzi, spiegano le ragioni per le quali il prezzo del fumo di silice ha raggiunto valori che superano di molto il prezzo del cemento (da due a otto volte di più).

I primi esperimenti sull'impiego del fumo di silice nel calcestruzzo sono stati fatti in Norvegia all'inizio degli anni '50 del secolo scorso. Solo a metà degli anni '70, però, sono iniziate le prime applicazioni pratiche sull'uso del fumo di silice nelle malte e nei calcestruzzi.

Chimicamente il fumo di silice è in prevalenza costituito da silice ( $\text{SiO}_2$ ) la cui percentuale può variare da circa l'85% fino al 98%, più costituenti minori (ossidi di alluminio, ferro, calcio, magnesio, ecc.) possono essere presenti in quantità più o meno trascurabili a seconda del tipo di lega al silicio. I colori del fumo di silice, (solitamente grigio scuro), dipendono dai residui di particelle carboniose

(nettamente minori, però, a quelle presenti nella cenere volante) e dalle tracce di ferro. Rispetto alla cenere volante, il fumo di silice si presenta come un materiale molto più ricco in silice (circa il doppio) e quindi, da questo punto di vista, più efficace come materiale pozzolanico.

Come già detto in precedenza, si tratta di un materiale in polvere molto più fine sia del cemento che della cenere volante. Nel grafico che segue, si mettono a confronto le distribuzioni granulometriche ottenute conteggiando una per una le dimensioni delle particelle osservate al microscopio SEM (Scanning Electronic Microscopy): del fumo di silice (SF), della cenere volante da carbone (CV) e della cenere volante beneficata (CVB).



*Figura 9-Distribuzione granulometrica mediante osservazione al SEM del fumo di silice (SF), della cenere volante da carbone (CV) e della cenere volante beneficata (CVB)*

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 micro-particelle 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 e acqua, 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, ad esso corrisponde anche un'elevatissima area superficiale che tende a richiedere un aumento dell'acqua di impasto, compensata con maggiore dosaggio di additivi superfluidificanti.

## 2.6 Fibre

Tra le innovazioni di maggior rilievo dei materiali cementizi, spicca il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC Fiber Reinforced Concrete). Con l'impiego di fibre è, infatti, possibile modificare alcune proprietà del calcestruzzo dando vita a materiali nuovi con caratteristiche non presenti nei calcestruzzi ordinari. Esistono diversi tipi di fibre impiegate nel rinforzo dei sistemi cementizi. Trovano maggior impiego quelle di tipo metallico, polimerico, in vetro, in carbonio, in kevlar o materiale naturale (legno, cellulosa).

L'influenza delle fibre sulle proprietà meccaniche di un conglomerato cementizio dipende dalle proprietà del materiale di cui sono costituite (tenacità, modulo elastico a trazione) e da parametri geometrici quali:

- la lunghezza;
- la forma;
- il diametro equivalente;
- il rapporto d'aspetto.

Per *lunghezza* delle fibre  $l_f$ , si intende la distanza tra le due estremità. Essa può differire dalla lunghezza della linea d'asse del filamento nel caso di fibre non rettilinee (ondulate, uncinata, ecc...); generalmente compresa tra i 6 mm e 70 mm. La resistenza a trazione raggiunge normalmente i 2400 MPa e talvolta supera i 3000 Mpa. La *forma* può variare anche in funzione dei differenti produttori presenti nel

mercato: schiacciate o deformate all'estremità presentando o un uncino o una piccola testa atta a migliorare il legame tra fibre e matrice cementizia (Figura 10).

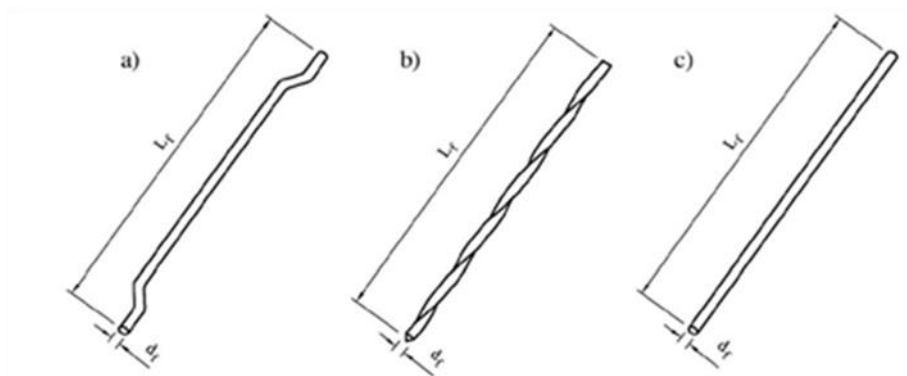


Figura 10-Principali tipologie di fibre d'acciaio: a) fibra d'acciaio uncinata; b) fibra d'acciaio ondulata; c) fibra d'acciaio dritta e liscia

Il *diametro equivalente* è il diametro del cerchio di area equivalente alla sezione media della fibra,  $d_f$ , compreso tra 0,1 mm e 1,20 mm. Il *rapporto d'aspetto* viene definito come il rapporto tra la lunghezza della fibra e il suo diametro equivalente. Funzione di quest'ultimo è l'aderenza, da cui dipende principalmente l'azione di cucitura delle fibre.

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  $25 \text{ kg/m}^3$  (0,32% in volume).

L'aggiunta di fibre di qualsiasi tipo e forma non è in grado di influenzare apprezzabilmente la resistenza meccanica a compressione dei materiali cementizi. Ad ogni modo, un adeguato dosaggio di fibre, soprattutto se di tipo metallico, può influenzare il comportamento sforzo-deformazione di un provino in calcestruzzo sottoposto ad una prova di schiacciamento rendendo più lunga e meno ripida la fase discendente (il cosiddetto ramo degradante o "softening") della curva sforzo-

deformazione per l'azione di cucitura (effetto ponte) esercitata dalle fibre nei confronti delle fessure che si producono in direzione ortogonale a quella di massima compressione. L'aggiunta di fibre non modifica, inoltre, il modulo elastico a compressione ( $E_c$ ) del calcestruzzo (Figura 11).

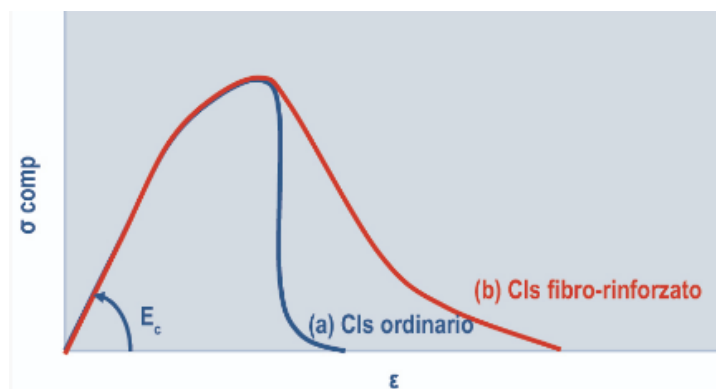


Figura 11-Confronto di diagrammi sforzo-deformazione di calcestruzzo ordinario e fibrorinforzato in una prova di compressione

contrariamente a quanto viene diffusamente ritenuto, l'aggiunta di fibre non migliora la resistenza meccanica a trazione del calcestruzzo intesa come la sollecitazione in corrispondenza della quale si verifica l'innescio della prima (o unica) fessura nella matrice di un elemento sollecitato a trazione. Allo stesso modo, non vengono apprezzabilmente modificate dall'aggiunta delle fibre le grandezze che caratterizzano il comportamento del materiale prima della fessurazione, ossia, il modulo elastico in trazione ( $E_t$ ) e la deformazione in corrispondenza dell'innescio della fessura ( $\epsilon_f$ ).

L'aggiunta di fibre modifica sensibilmente, invece, il comportamento a trazione della matrice cementizia in fase fessurata. A seconda del dosaggio di fibre impiegato, si possono avere due diversi comportamenti post-fessurativi. Per contenuti di fibre non elevati (indicativamente per volumi di fibre inferiori al 2%) il comportamento è di tipo degradante, o anche detto "softening". Questo significa che dopo l'innescio della fessura, il materiale è in grado di sopportare sollecitazioni

di trazione a patto che queste siano inferiori a quella che ha provocato la fessurazione della matrice. In questo caso noteremo un'unica macro-fessura che aumenta di ampiezza fino al collasso (Figura 12a).

Per dosaggi di fibre elevati (indicativamente per volumi di fibre superiori al 2%), il comportamento post-fessurativo dell'UHPC può risultare di tipo incrudente noto anche come "hardening". Ciò significa che, grazie all'efficace azione di cucitura esercitata dalle fibre, nel composito si verifica l'innescò progressivo di una molteplicità di fessure fino al raggiungimento di una tensione di collasso che è maggiore di quella che ha provocato la comparsa della prima lesione (Figura 12b).

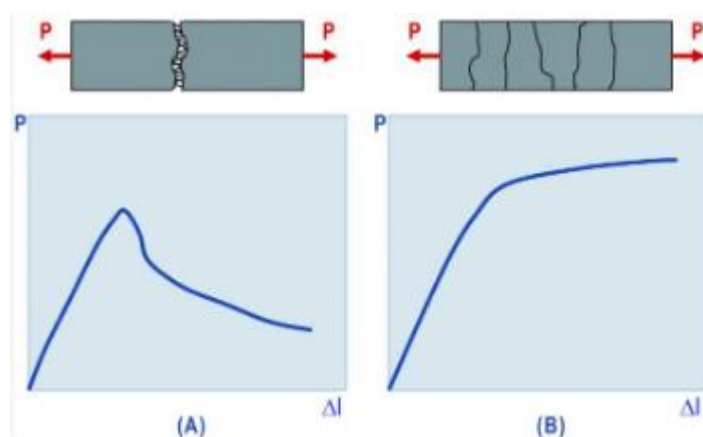


Figura 12-Calcestruzzo fibrorinforzato sottoposto a trazione: comportamento softening (a) e "hardening" (b)

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.

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.

È opportuno tenere sempre presente che tale rapporto non può essere alzato a dismisura proprio perché peggiora la lavorabilità del calcestruzzo in quanto maggiore è la lunghezza delle fibre più esse si intrecciano.

### **2.6.1 Fibre in acciaio ottonate**

Nello studio effettuato è stato scelto l'uso di fibre in acciaio ottonate, in quanto, utilizzando un alto dosaggio di agente espansivo a base di CaO, si ottengono resistenze meccaniche migliori. Il motivo potrebbe essere ricondotto alla formazione di cristalli di idrossido di zinco e calcio (CHZ) all'interfaccia tra fibre e pasta di cemento, promossa dall'ambiente alcalino. Tutto ciò è stato dimostrato nello studio scientifico: "Influence of type of fibers on the properties of high performance cement-based composites" di Valeria Corinaldesi, Alessandro Nardinocchi. Questi cristalli CHZ, osservati al SEM, sono probabilmente in grado di migliorare la qualità dell'interfaccia fibra-matrice aumentando l'adesione.

## **3. Prestazioni meccaniche e chimico-fisiche degli UHPC**

### **3.1 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 13) 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.

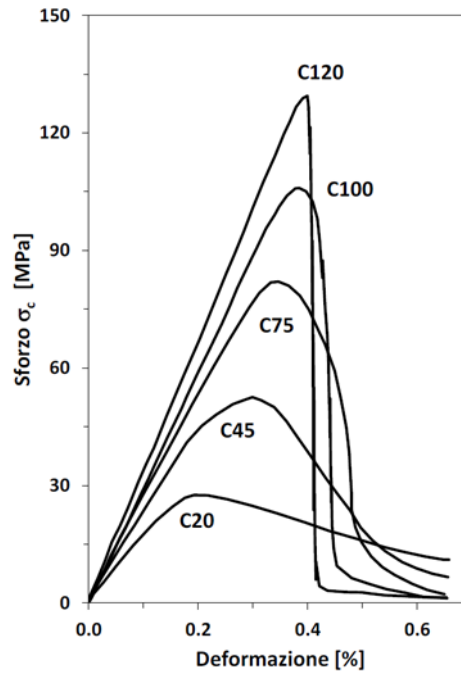


Figura 13-Legame sforzo deformazione in compressione uniassiale per diverse classi di calcestruzzo

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 possono essere assimilati a quelli del materiale non rinforzato.

### **3.2 Comportamento a trazione**

Per quanto riguarda la trazione uniassiale, le numerose evidenze sperimentali hanno 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 14 è riportata una curva ideale, sforzo-deformazione, di un UHPC 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,  $\sigma_{pc}$ , è maggiore dello sforzo di prima fessurazione  $\sigma_{cc}$ .

L'approccio ideale distingue il comportamento a trazione in tre differenti rami:

- Parte 1: ramo elastico, esteso dall'origine fino al valore  $\sigma_{cc}$ , 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  $\sigma_{cc}$  fino al valore di resistenza a trazione  $\sigma_{pc}$ . Tale tratto è caratterizzato dall'aumento dello sforzo  $\sigma$  all'aumentare della deformazione  $\epsilon$ .
- Parte 3: "ramo di softening" avente andamento discendente fino all'annullarsi dello sforzo  $\sigma$ .

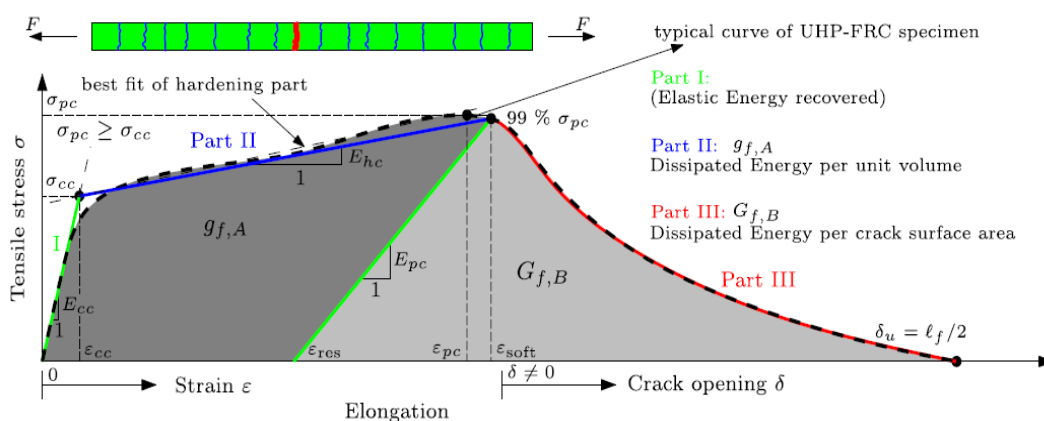


Figura 14 - Comportamento ideale, incrudente positivo di un UHPC sottoposto a carico di trazione (Wille and Naaman 2013)

Secondo il modello ideale, nella seconda parte, 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 uniassiale 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.

### **3.3 Durabilità**

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 Cambi di volume e fenomeni di ritiro**

Come tutti i materiali, il calcestruzzo varia il suo volume al variare della temperatura ed è soggetto al fenomeno del creep. Tale fenomeno, si verifica nella pasta di cemento con l'incremento di deformazione nel tempo, sotto carichi di lunga

durata ed è influenzato dalla sua porosità (direttamente connessa al rapporto acqua/cemento).

Durante l'idratazione la porosità della pasta diminuisce e, quindi, per un dato calcestruzzo, il creep si riduce mentre la resistenza aumenta. Il tipo di cemento è importante; cementi che idratano prima hanno minor creep. Poiché gli aggregati ostacolano il creep, maggior volume di aggregati e maggior rigidità dell'aggregato riducono il fenomeno.

Lo schema seguente (Figura 14) sintetizza i fenomeni principali che influenzano il creep.

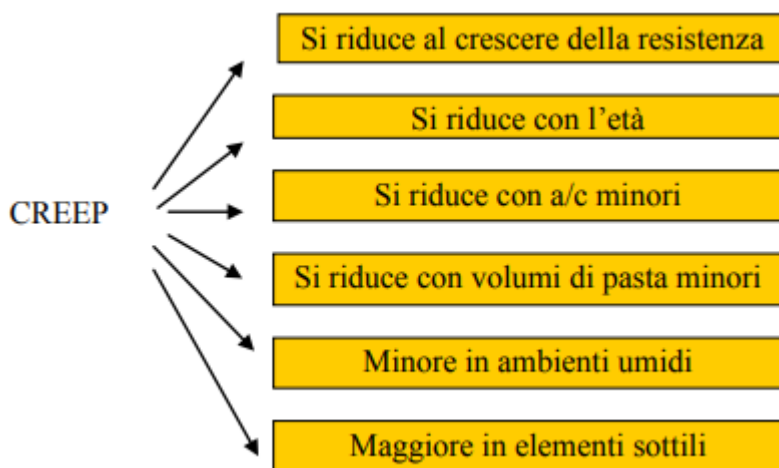


Figura 15-Fenomeni che influenzano il creep

Questa non è l'unica variazione volumetrica che il materiale presenta. A seconda delle condizioni di maturazione, il calcestruzzo di solito si restringe e talvolta si dilata, a causa soprattutto di attacchi di origine chimica, come quelle dovute ai solfati o alla thaumasite.

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  $\Delta L$ =accorciamento dovuto all'essiccazione,  $l_0$ =lunghezza iniziale (Fig.12).

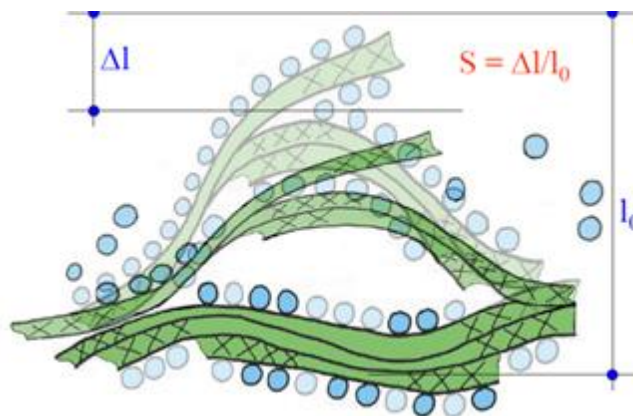


Figura16-Risultato finale essiccamento

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

- *ritiro plastico*: 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 (con una velocità superiore a  $1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2\text{h}}$ ) per fessurare il materiale. La soluzione consiste nel proteggere queste superfici per far in modo che l'acqua che evapora dal  $\text{m}^2$  di superficie sia minore di  $1 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$  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.

### **3.4.1 Stagionatura**

Per assicurare una corretta idratazione del cemento, quindi una buona maturazione che permetta di raggiungere le prestazioni prefissate dal progettista, è necessario uno stretto monitoraggio della sua stagionatura con opportuni accorgimenti.

Le Linee Guida sulla messa in opera del calcestruzzo strutturale, emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Servizio Tecnico Centrale il 27 settembre 2017, affrontano compiutamente anche l'argomento della protezione dei getti dal punto di vista termico. Queste si applicano prevalentemente al calcestruzzo per uso strutturale, armato e non, ordinario e precompresso, usualmente impiegato nelle costruzioni. Restano comunque valide talune disposizioni, laddove applicabili, ai numerosi altri tipi di calcestruzzo conosciuti ed utilizzati che potranno essere oggetto di future specifiche Linee Guida quali ad esempio: calcestruzzo leggero, calcestruzzo ad alta resistenza, calcestruzzo fibrorinforzato, calcestruzzo autocompattante (SCC), calcestruzzo proiettato.

La progettazione e la messa in opera delle casseforme deve tener conto della necessità di evitare durante la fase di getto perdite dannose di matrice cementizia. Le casseforme devono essere classificate e dimensionate a cura dell'impresa esecutrice in funzione della massima pressione caratteristica ammissibile che il calcestruzzo fresco esercita sulle casseforme.

Dopo la messa in opera e la compattazione, il calcestruzzo deve essere maturato e protetto dall'essiccamento. La maturazione comprende i processi durante i quali il

calcestruzzo fresco sviluppa gradualmente le sue proprietà per effetto della progressiva idratazione del cemento. La velocità di idratazione dipende dalle condizioni climatiche d'esposizione e dalle modalità di scambio d'umidità e calore tra il calcestruzzo e l'ambiente. Per consentire una corretta maturazione è necessario mantenere costantemente umida la struttura realizzata.

La sensibilità del calcestruzzo nei riguardi della maturazione può dipendere dalla temperatura del calcestruzzo la cui velocità d'indurimento a 35° C è doppia di quella che si sviluppa a 20° C che, a sua volta, è doppia di quella che si ha a 10° C e dalle condizioni ambientali esterne quindi umidità relativa, temperatura e velocità del vento.

Particolari precauzioni devono essere adottate allorché la temperatura dell'aria misurata in cantiere è inferiore a 5° C (clima freddo) o quando la temperatura del calcestruzzo al momento della sua messa in opera è suscettibile di superare 32° C (clima caldo).

Si definisce "clima freddo" una condizione climatica in cui, per tre giorni consecutivi, si verifica almeno una delle seguenti condizioni:

- la temperatura media dell'aria è inferiore a 5° C
- la temperatura dell'aria non supera 10° C per più di 12 ore

Una temperatura particolarmente rigida può produrre, sulla superficie del calcestruzzo non opportunamente protetta, effetti di sfarinamento o di scagliatura; occorre dunque adottare opportuni sistemi di protezione dei getti.

A causa del rallentamento dello sviluppo della resistenza meccanica dovuto alle basse temperature il calcestruzzo deve stagionare ad una temperatura del conglomerato cementizio sufficientemente elevata (per es. 10° C) per un tempo sufficientemente lungo (per es. 7 giorni) di maturazione parziale affinché sia eliminabile il rischio degli effetti della gelata.

Il clima caldo invece influenza la qualità sia del calcestruzzo fresco che di quello indurito. Infatti, provoca una troppo rapida evaporazione dell'acqua di impasto ed

una velocità di idratazione del cemento eccessivamente elevata che causano perdite di lavorabilità, aumento del fabbisogno d'acqua, formazione di fessure per ritiro, riduzione di resistenze e durabilità attese.

Le condizioni ambientali che caratterizzano il clima caldo sono:

- temperatura ambiente elevata ( $T_a = \geq 32^\circ \text{C} - \leq 45^\circ \text{C}$ );
- bassa umidità relativa dell'ambiente;
- intensità e incremento velocità del vento  $> 5 \text{ km/h}$ ;
- elevato assorbimento del calore dei raggi solari delle superfici (esposizione ai raggi solari);
- temperatura elevata ( $> 30^\circ \text{C}$ ) del calcestruzzo al momento della sua messa in opera;
- un tasso di evaporazione che supera  $1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2\text{h}}$ .

La stagionatura di un UHPC è alquanto differente rispetto a quella di un calcestruzzo ordinario a causa, del differente comportamento di ritiro. Se l'UHPC 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'UHPC 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.

## 4. Fase sperimentale

Il lavoro sperimentale condotto presso il Laboratorio di Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU) nell'Università Politecnica delle Marche di Ancona, si pone l'obiettivo di caratterizzare dal punto di vista meccanico (con riferimento alla norma UNI EN 1051-11) provini di materiale UHPC, con differenti dosaggi di fibre in acciaio ottonate.

Lo scopo successivo è stato quello di capire come l'andamento di deformazione da ritiro nel tempo, variasse al variare della stagionatura. Le stagionature attuate sono:

- stagionatura all'aria (UR=80%);
- stagionatura umida (UR>95%).

Gli effetti del ritiro autogeno e i relativi parametri meccanici sono stati valutati con la stagionatura all'aria. La stagionatura umida, è stata impiegata per comprendere come la nebulizzazione del getto abbia influenzato le prestazioni meccaniche prefissate e di conseguenza diminuito il ritiro autogeno.

## 4.1 Materiali impiegati

Vengono descritti di seguito i materiali utilizzati per il confezionamento dei provini.

- Il cemento utilizzato (Fig.13), 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 4.

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%



Figura 17-CEM I 52,5 R  
(COLACEM S.p.A)

- Gli additivi utilizzati (Figura 18) sono: DRACRIL P16S della ditta DRACO Italiana S.p.A., additivo superfluidificante policarbossilico di ultima generazione per migliorare la lavorabilità dell'impasto ed evitare i rischi di segregazione della miscela; ANTISCHIUMA della ditta DRACO Italiana S.p.A., additivo chimico che riduce e ostacola la formazione di schiuma durante la miscelazione.



*Figura 18-Additivo superfluidificante e antischiuma (DRACO Italiana S.p.A)*

- Gli aggregati utilizzati sono di due tipologie: Sabbia 0/1 Po (Figura 19a) della ditta ESINCALCE S.r.l., di granulometria compresa tra 0-1 mm al 30% e sabbia BC 00 con granulometria compresa tra 0-2mm (Figura 19b) al 70%; la curva granulometrica ottimale è riportata in (Figura 19c).

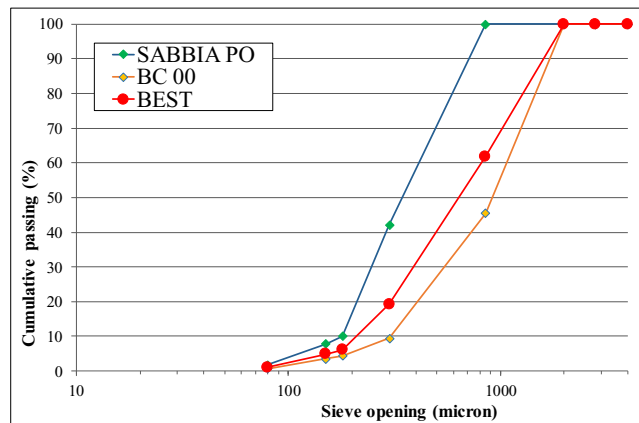


*Figura 19a-Sabbia 0/1 Po*



*Figura 19b-Sabbia BC 00*





*Figura 19c-Curva granulometrica*

- Il Fumo di silice utilizzato (Figura 20), FILLCRETE della ditta DRACO Italiana S.p.A., 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 m<sup>2</sup>/g), altissima attività pozzolanica e grandi proprietà fillerizzanti. Le particelle, di dimensioni ridottissime (0,05-0,5mm), 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.

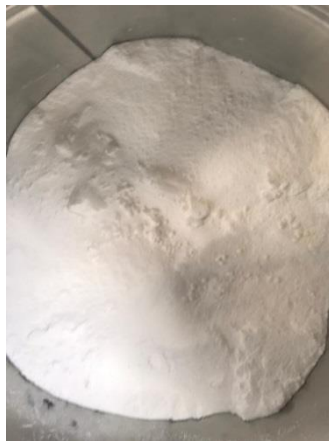


*Figura 20-Fumo di silice*

- Agente espansivo CaO (Figura 21) e additivo antiritiro (SRA, shrinkage reducing admixture, Figura 22) 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 21-Agente espansivo*



*Figura 22-Additivo antiritiro*

- Per questo lavoro sono state utilizzate fibre in acciaio rivestite di ottone “La Gramigna Gold” (la Matassina s.r.l.), di dimensioni  $l=13$  mm, diametro  $\Phi=0,2$  mm e tipologia dritta (Fig.19) . 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).

La Gramigna Gold Micro sono ottenute mediante trafilatura a freddo del filo d'acciaio, di prima qualità ad alta resistenza.



*Figura 23-Fibra in acciaio rivestita di ottone*

## **4.2 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 8 impasti con proporzioni dei componenti differenti, diverso dosaggio di fibre e diversa stagionatura. Per i primi 4 provini, il tipo di stagionatura scelta è stata quella all'aria (UR=80%); per i restanti impasti è stata scelta la stagionatura umida (UR>95%).

Per ogni impasto sono stati realizzati 12 provini di cui 9 per le prove meccaniche a 3, 7, 28 giorni, i restanti 3 provini sono stati utilizzati per calcolo misure da ritiro a 7h, 1 ,2 ,3 ,7 ,14 ,21 ,28 giorni.

Per contraddistinguere le due stagionature si usano per la prima d=dry (asciutto), per la seconda w=wet (bagnato). Nelle tabelle di seguito riportate, sono identificate le proporzioni dei diversi componenti impiegati nelle miscele, a diversa stagionatura. Le miscele ottenute sono pressoché identiche; all'aumentare del dosaggio di fibre, è stato aggiunto un maggior quantitativo di acqua e di additivo superfluidificante, per garantire lavorabilità all'impasto senza che si verifichino fenomeni di segregazione.

*Tabella 5-Proporzioni componenti UHPC (kg/m<sup>3</sup>) stagionati in ambiente UR=80%*

	REFd	50BRASSd	100BRASSd	Materiali
Cemento	720	720	720	720
Fumo di silice	100	100	100	100
Agente espansivo	25	25	25	25
Sabbia BC 00	945	945	945	945
Sabbia Po	410	410	410	410
Acqua	240	235	225	225
Superfluidificante	9	9	10	10
Antibolle	3	3	3	3
SRA (antiritiro)	9	9	9	9
<b>Fibre</b>	<b>0</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>150</b>
Fibre in Vol.%	0	0,64	1,28	1,92

Tabella 6-Proporzioni componenti UHPC stagionati in ambiente UR>95% (kg/m<sup>3</sup>)

Materiali	REF <sub>w</sub>	50BRASS <sub>w</sub>	100BRASS <sub>w</sub>	150BRASS <sub>w</sub>
Cemento	720	720	720	720
Fumo di silice + Agente espansivo	125	125	125	125
Sabbia BC 00	945	945	945	945
Sabbia Po	410	410	410	410
Acqua	235	240	240	240
Superfluidificante	9	9	10	10
Antibolle	3	3	3	3
SRA (antiritiro)	9	9	9	9
<b>Fibre</b>	<b>0</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>150</b>
Fibre in Vol.%	0	0,64	1,28	1,92

### 4.3 Fasi operative

I provini sono stati realizzati secondo la seguente procedura:

- in funzione delle componenti presenti nelle Tabella 4 e Tabella 5 sono stati pesati i vari componenti;
- una volta pesati tutti i componenti a meno di acqua e fibre (aggiunte successivamente), il tutto è stato miscelato con l'ausilio di una miscelatrice da 5l fino al raggiungimento di un impasto omogeneo. Le fibre, aggiunte come ultime componenti, devono presentare una distribuzione omogenea all'interno dell'impasto. Il raggiungimento di tale condizione può essere ostacolato dalla formazione di accumuli di fibre, comunemente indicati con in termini di "grumi", "ciuffi" o "grovigli".



*Figura 24-Pesatura componenti UHPC e successiva miscelazione*

- getto all'interno degli appositi casseri precedentemente rivestiti con disarmante per facilitare la successiva scasseratura dei provini (Figura 25).



*Figura 25- Getto della miscela negli appositi casseri*

- rasatura e compattazione tramite tavola vibrante;

- per limitare il fenomeno di essudazione nei provini, è stato posto uno strato di pellicola impermeabile;
- disarmo dei provini dopo 24 ore del getto per le prove meccaniche, per le prove da ritiro il disarmo è avvenuto dopo 7 ore del getto.
- maturazione in ambiente UR=80% per i primi 4 getti, maturazione in ambiente UR>95% per i successivi 4; per quanto riguarda il calcolo del ritiro la maturazione dei provini stagionati in ambiente UR>95% è avvenuta per 3 giorni, nei successivi giorni la stagionatura è avvenuta a UR=50%. (Figura 21, Figura 22)



*Figura 26- Stagionatura provini UR=80% e UR=50%*

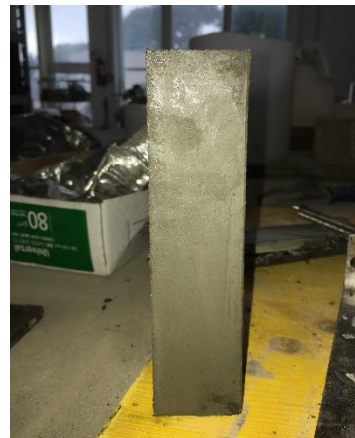
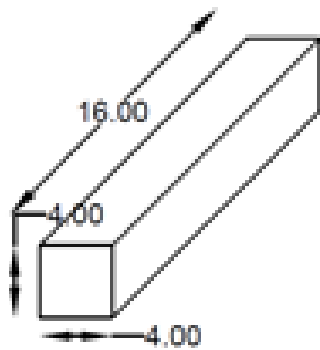


*Figura 27-Stagionatura provini UR>95%*



#### 4.4 Classificazione dei provini

Come già detto in precedenza, per ogni impasto sono stati realizzati 12 provini, con getti dei conglomerati in giorni differenti per un totale di 8 impasti. Le dimensioni di ogni cassero ci ha permesso di ottenere provini  $4 \times 4 \times 16$  cm<sup>3</sup>, 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. Per maggiore chiarezza si riporta la forma e la geometria delle tre tipologie di provini realizzati (Figura 28). Un'ulteriore distinzione è stata quella di suddividere i provini in funzione della diversa stagionatura asciutta (d=dry) e bagnata (w=wet) rispettivamente in Tabella 7 e Tabella 8.



*Figura 28-Schematizzazione provini*



Tabella 7- Denominazione provini stagionatura UR=80%

<b>Denominazione</b>	<b>Dimensione (cm<sup>3</sup>)</b>
REFd-A	4x4x16 cm <sup>3</sup>
REFd-B	4x4x16 cm <sup>3</sup>
REFd-C	4x4x16 cm <sup>3</sup>
50BRASSd-A	4x4x16 cm <sup>3</sup>
50BRASSd-B	4x4x16 cm <sup>3</sup>
50BRASSd-C	4x4x16 cm <sup>3</sup>
100BRASSd-A	4x4x16 cm <sup>3</sup>
100BRASSd-B	4x4x16 cm <sup>3</sup>
100BRASSd-C	4x4x16 cm <sup>3</sup>
1500BRASSd-A	4x4x16 cm <sup>3</sup>
150BRASSd-B	4x4x16 cm <sup>3</sup>
150BRASSd-C	4x4x16 cm <sup>3</sup>

Tabella 8- Denominazione provini stagionatura UR>95%

<b>Denominazione</b>	<b>Dimensione (cm<sup>3</sup>)</b>
REFw-A	4x4x16 cm <sup>3</sup>
REFw-B	4x4x16 cm <sup>3</sup>
REFw-C	4x4x16 cm <sup>3</sup>
50BRASSw-A	4x4x16 cm <sup>3</sup>
50BRASSw-B	4x4x16 cm <sup>3</sup>
50BRASSw-C	4x4x16 cm <sup>3</sup>
100BRASSw-A	4x4x16 cm <sup>3</sup>
100BRASSw-B	4x4x16 cm <sup>3</sup>
100BRASSw-C	4x4x16 cm <sup>3</sup>
1500BRASSw-A	4x4x16 cm <sup>3</sup>
150BRASSw-B	4x4x16 cm <sup>3</sup>
150BRASSw-C	4x4x16 cm <sup>3</sup>

## 4.5 Prove eseguite

Nel presente capitolo sono descritte la strumentazione e le modalità di esecuzione delle prove.

### 4.5.1 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 29).



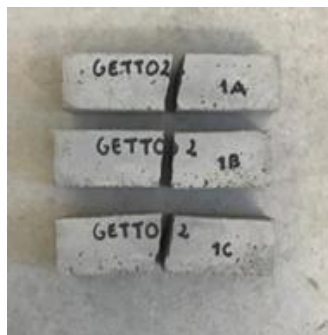
*Figura 29-Pressa idraulica*

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 30).

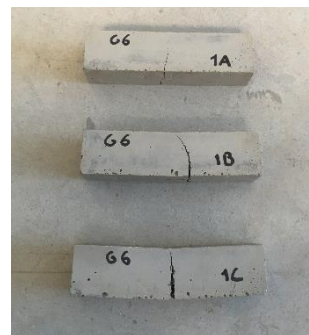


*Figura 30- Setup di prova "4x4x16 cm<sup>3</sup>"*

Nelle immagini sotto allegate, si mostrano provini con differenti comportamenti a flessione. Nel primo caso provini UHPC senza l'aggiunta di fibre (Figura 31a) con conseguente rottura di tipo fragile; nel secondo caso (figura 31b) l'aggiunta di fibre genera una rottura di tipo duttile con formazione dell'effetto "bridging".



*Figura 31a-Rottura a flessione di tipo fragile*



*Figura 31b-Rottura di tipo duttile*

#### 4.5.2 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).

Anche in questa prova si evidenziano la rottura di un provino privo di fibre e con fibre, notando su quest'ultima che le fibre contrastano la propagazione della fessura.



Figura 32-Setup di prova a compressione “ $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ”

### 4.5.3 Prova determinazione ritiro assiale

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 (Figura 33).



*Figura 33-Prova determinazione ritiro assiale*

## 5. Risultati sperimentali

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

### 5.1 Prova flessione a tre punti

Nella prova a flessione la procedura d'intervento attuata secondo la seguente modalità: il campioni prismatici da testare sono stati poggiati singolarmente su due rulli paralleli a distanza  $e$ , e, quindi, sottoposti ad un carico nel punto di mezzeria (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*). Il carico, inserito perpendicolarmente al piano di appoggio, è stato esercitato con una progressione graduale, in modo da poter registrare le deformazioni del materiale a campione mettendole in relazione ai carichi esercitati fino a rottura.

In particolare, le prove a flessione sono state eseguite su ognuno dei tre provini indicati con le lettere A, B, C, appartenenti al medesimo impasto (Figura 34).

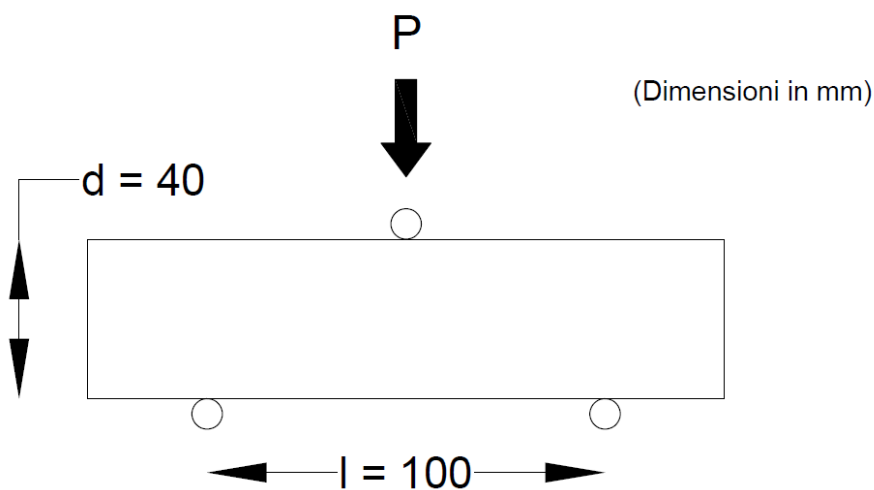


Figura 34-Schema di carico della prova a flessione

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

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

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  $F$  (forza) –  $s$  (spostamento) derivanti dai risultati delle prove a flessione su tre punti eseguite sui provini 4x4x16 cm<sup>3</sup>. 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 seguito da una tabella nella quale sono riassunti i valori di carico massimo a rottura, espresso in kN, lo spostamento al carico massimo, in mm e la resistenza a flessione  $f_{max}$  in MPa.

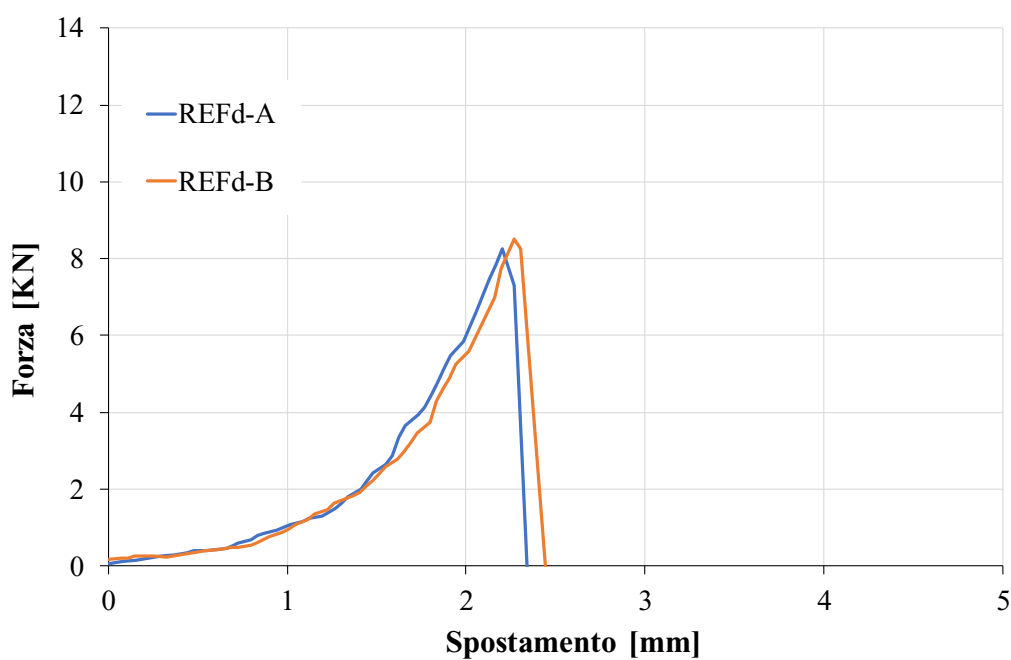


Figura 35-Curva Forza-Spostamento a flessione REFd 7 giorni

Tabella 9-Risultati prova a flessione REFd 7 giorni

<b>Risultati prova a flessione REFd 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$f_{\max}$ (MPa)
REFd-A	8,26	2,20	19,36
REFd-B	8,50	2,27	19,92
Media	8,38	2,23	19,64



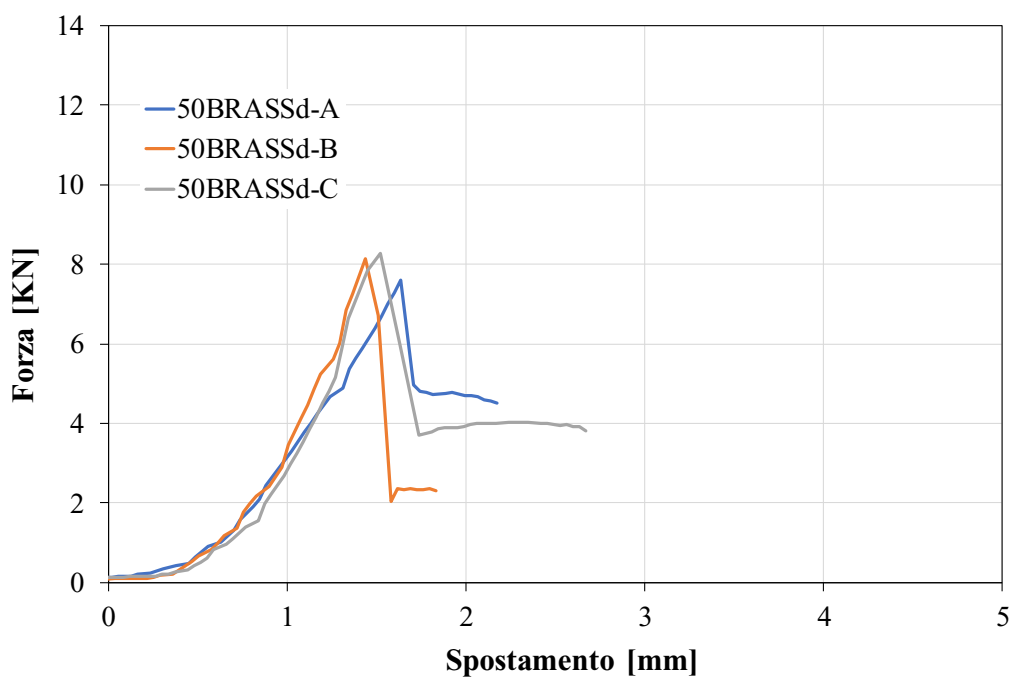


Figura 36-Curva Forza-Spostamento a flessione 50BRASSd 7 giorni

Tabella 10-Risultati prova a flessione 50BRASSd 7 giorni

<b>Risultati prova a flessione 50BRASSd-7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$f_{\max}$ (MPa)
50BRASSd-A	7,61	1,63	17,84
50BRASSd-B	8,15	1,44	19,11
50BRASSd-C	8,28	1,52	19,41
Media	8,01	1,53	18,78

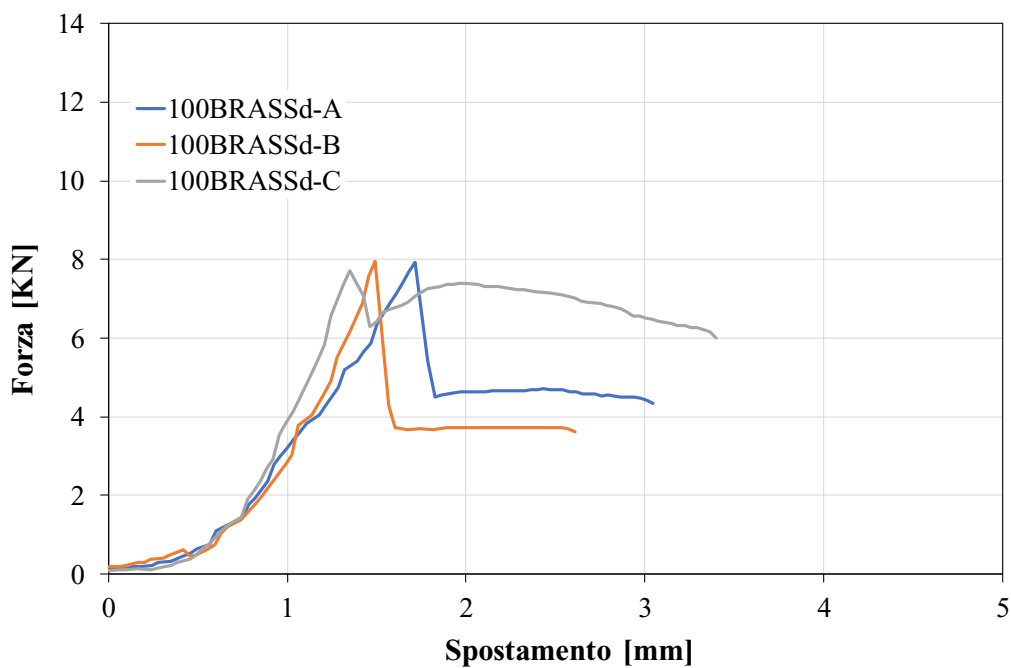


Figura 37-Curva Forza-Spostamento a flessione 100BRASSd 7 giorni

Tabella 11-Risultati prova a flessione 100BRASSd 7 giorni

<b>Risultati prova a flessione 100BRASSd 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$f_{max}$ (MPa)
100BRASSd-A	7,93	1,72	18,60
100BRASSd-B	7,96	1,49	18,65
100BRASSd-C	7,72	1,35	18,09
Media	7,87	1,52	18,45

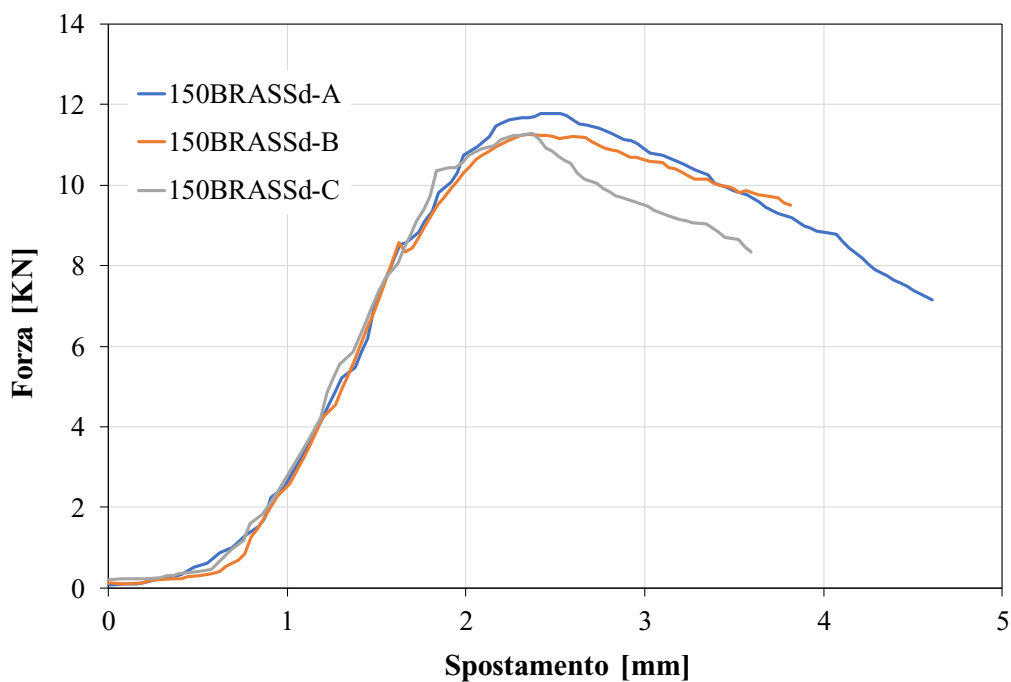


Figura 38-Curva Forza-Spostamento flessione 150BRASSd 7 giorni

Tabella 12-Risultati prova a flessione 150BRASSd 7 giorni

<b>Risultati prova a flessione 150BRASSd 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$f_{max}$ (MPa)
150BRASSd-A	11,79	2,49	27,62
150BRASSd-B	11,27	2,34	26,41
150BRASSd-C	11,29	2,37	26,46
Media	11,45	2,40	26,83

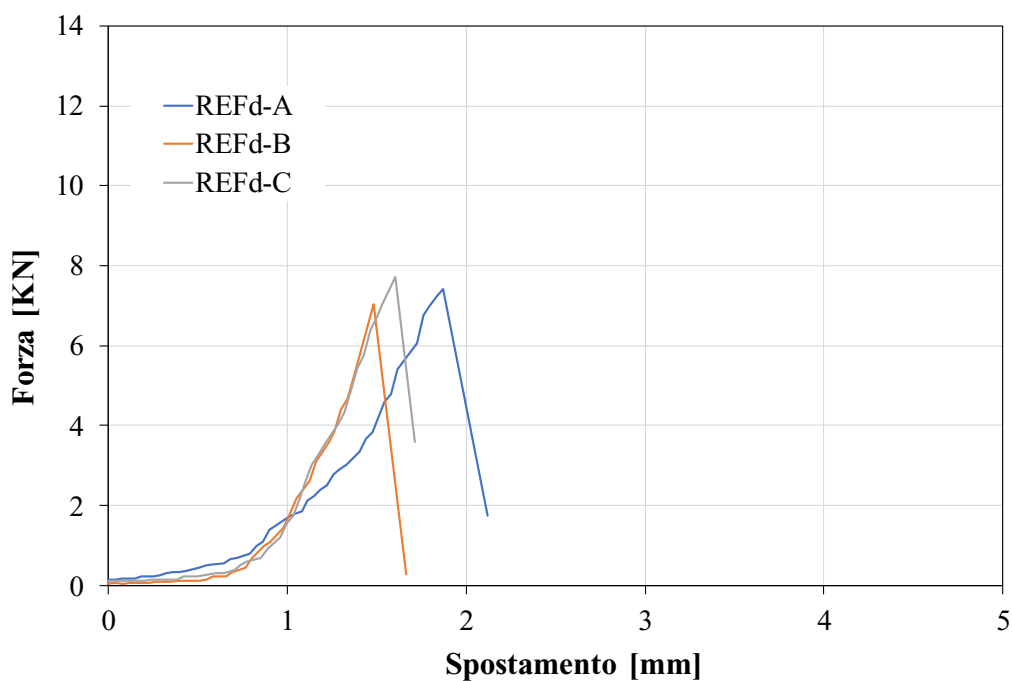


Figura 39-Curva Forza-Spostamento a flessione REFd 28 giorni

Tabella 13-Risultati prova a flessione REFd 28 giorni

<b>Risultati prova a flessione REFd 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$f_{\max}$ (MPa)
REFd-A	7,41	1,87	17,38
REFd-B	7,05	1,48	16,51
REFd-C	7,72	1,61	18,09
Media	7,39	1,65	17,33

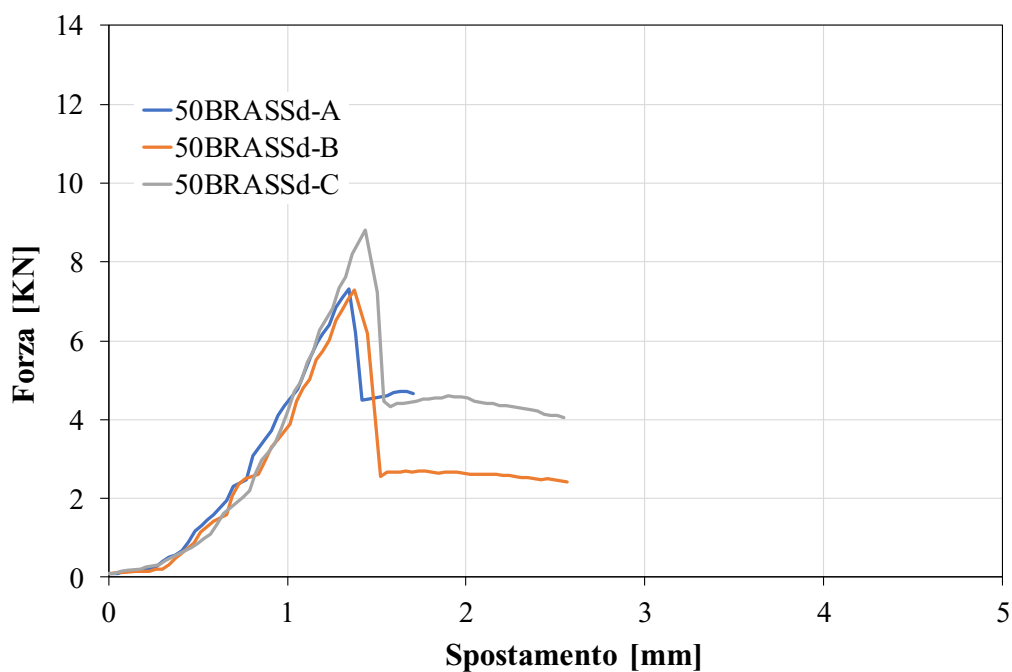


Figura 40-Curva Forza-Spostamento a flessione 50BRASSd 28 giorni

Tabella 14-Risultati prova a flessione 50BRASSd 28 giorni

<b>Risultati prova a flessione 50BRASSd 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$f_{max}$ (MPa)
50BRASSd-A	7,33	1,34	17,17
50BRASSd-B	7,28	1,38	17,07
50BRASSd-C	8,80	1,43	20,63
Media	7,80	1,39	18,29

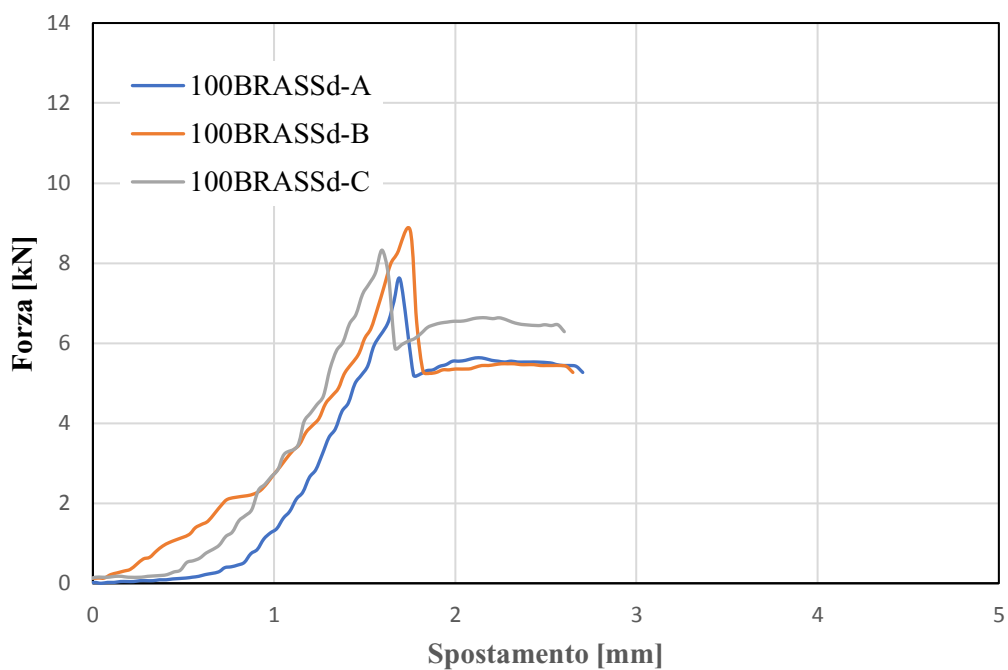


Figura 41-Curva Forza-Spostamento a flessione 100 BRASSd 28 giorni

Tabella 15-Risultati prova a flessione 100BRASSd 28 giorni

<b>Risultati prova a flessione 100BRASSd 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$f_{max}$ (MPa)
100BRASSd-A	7,57	1,70	17,73
100BRASSd-B	8,82	1,55	20,68
100BRASSd-C	8,33	1,60	19,51
Media	8,24	1,61	19,31

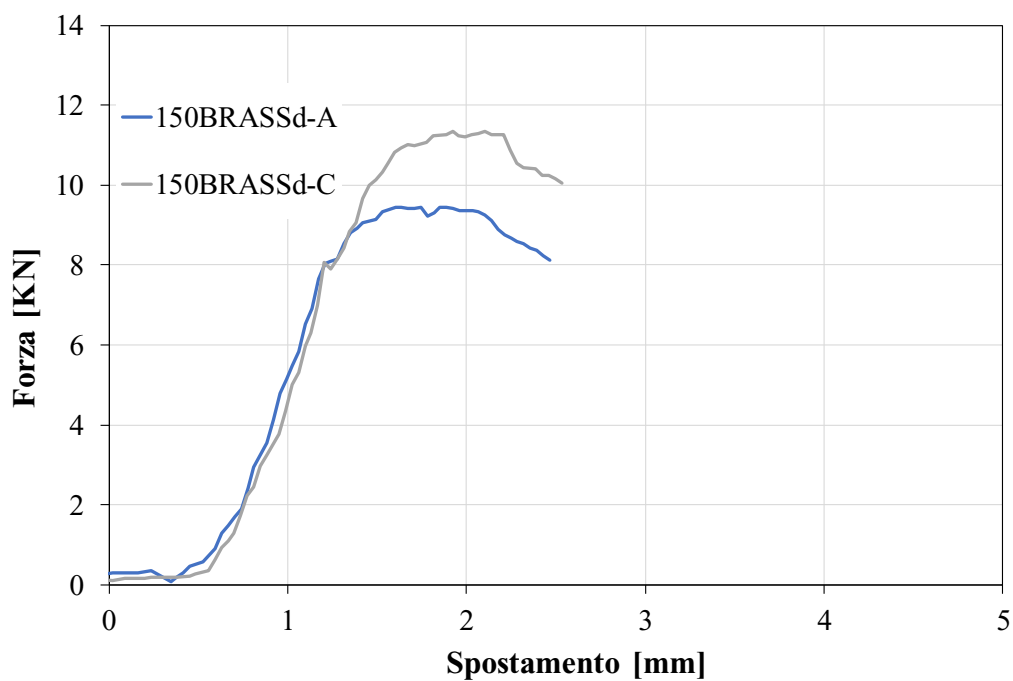


Figura 42-Curva Forza-Spostamento 150BRASSd 28 giorni

Tabella 16-Risultati prova a flessione 150 BRASSd 28 giorni

<b>Risultati prova a flessione 150BRASSd 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$f_{\max}$ (MPa)
150BRASSd-A	9,45	1,89	22,15
150BRASSd-C	11,33	1,10	26,56
Media	10,39	2,00	24,36

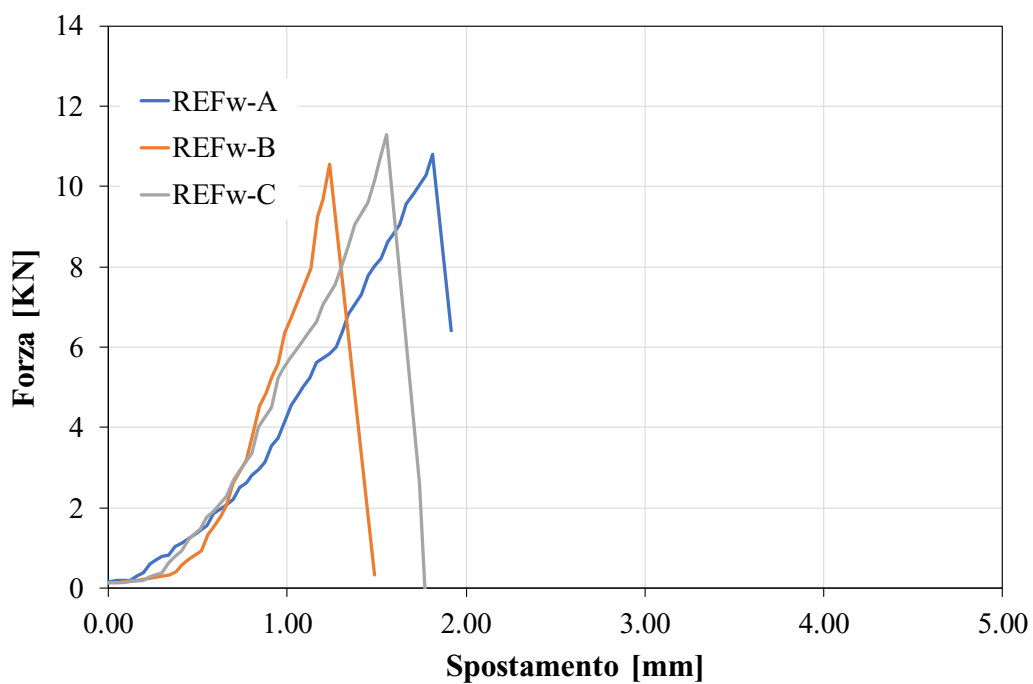


Figura 43-Curva Forza-Spostamento a flessione REFw 7 giorni

Tabella 17-Risultati prova a flessione REFw 7 giorni

<b>Risultati prova a flessione REFw 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$f_{\max}$ (MPa)
REFw-A	10,81	1,81	25,35
REFw-B	10,56	1,24	24,74
REFw-C	11,29	1,56	26,46
Media	10,89	1,54	25,52



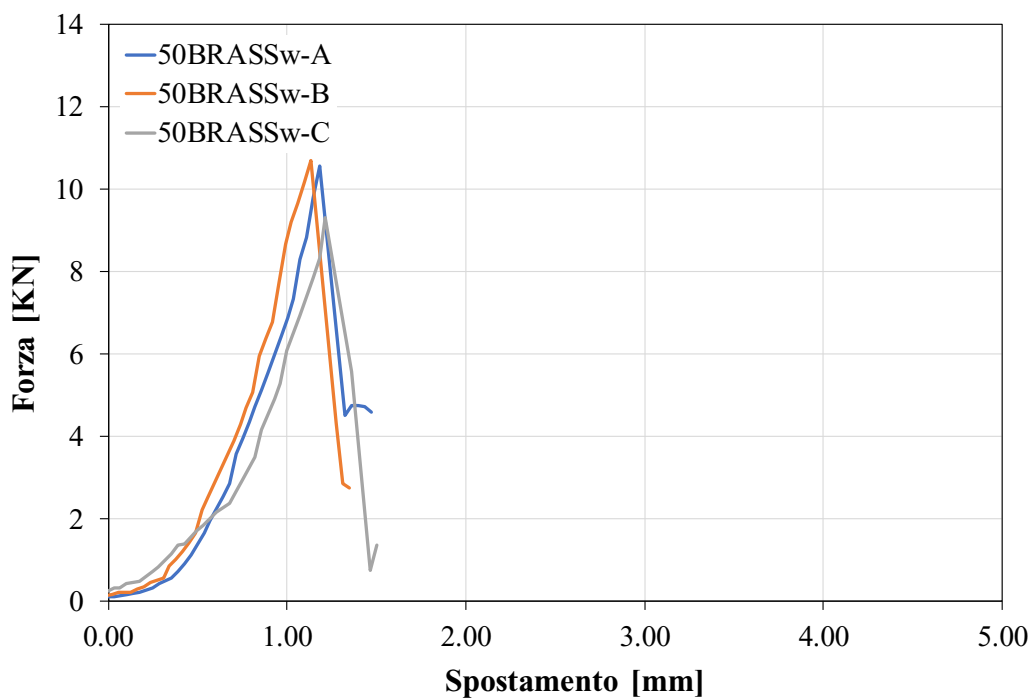


Figura 44-Curva Forza-Spostamento a flessione 50BRASSw 7 giorni

Tabella 18-Risultati prova a flessione 50BRASSw 7 giorni

<b>Risultati prova a flessione 50BRASSw 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$f_{\max}$ (MPa)
50BRASSw-A	10,58	0,88	24,79
50BRASSw-B	10,68	1,13	25,04
50BRASSw-C	9,30	1,81	21,80
Media	10,19	1,28	23,88

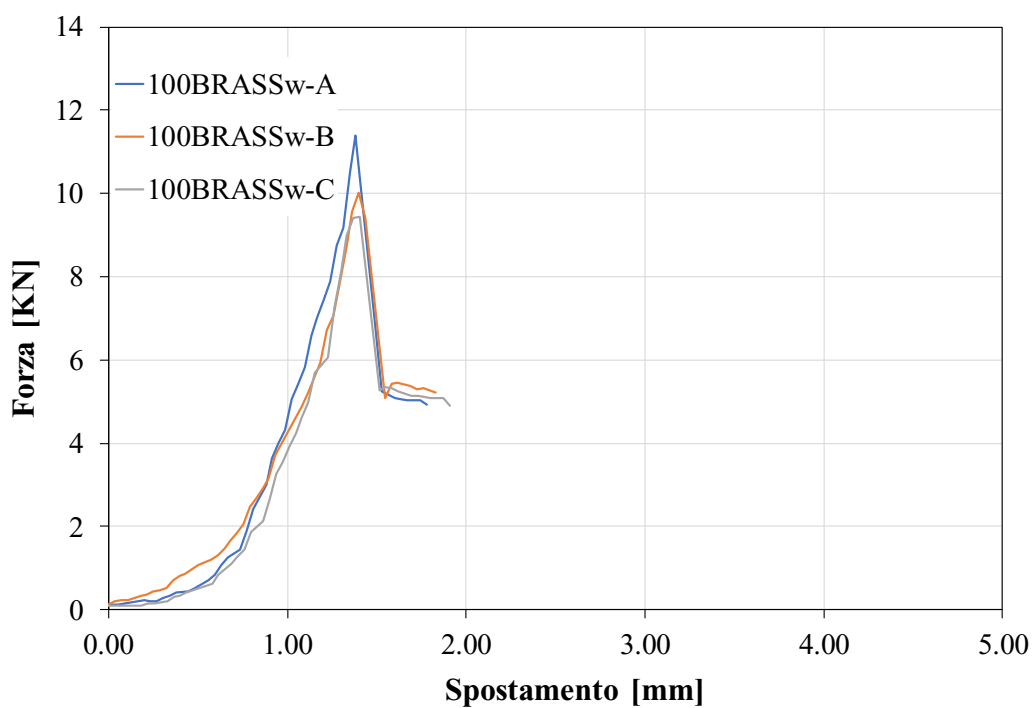


Figura 45-Curva Forza-Spostamento a flessione 100BRASS w 7 giorni

Tabella 19-Risultati prova a flessione 100BRASSw 7 giorni

<b>Risultati prova a flessione 100BRASSw 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$f_{max}$ (MPa)
100BRASSw-A	11,40	1,38	26,71
100BRASSw-B	10,01	1,40	22,41
100BRASSw-C	9,43	1,41	23,47
Media	10,28	1,40	24,20

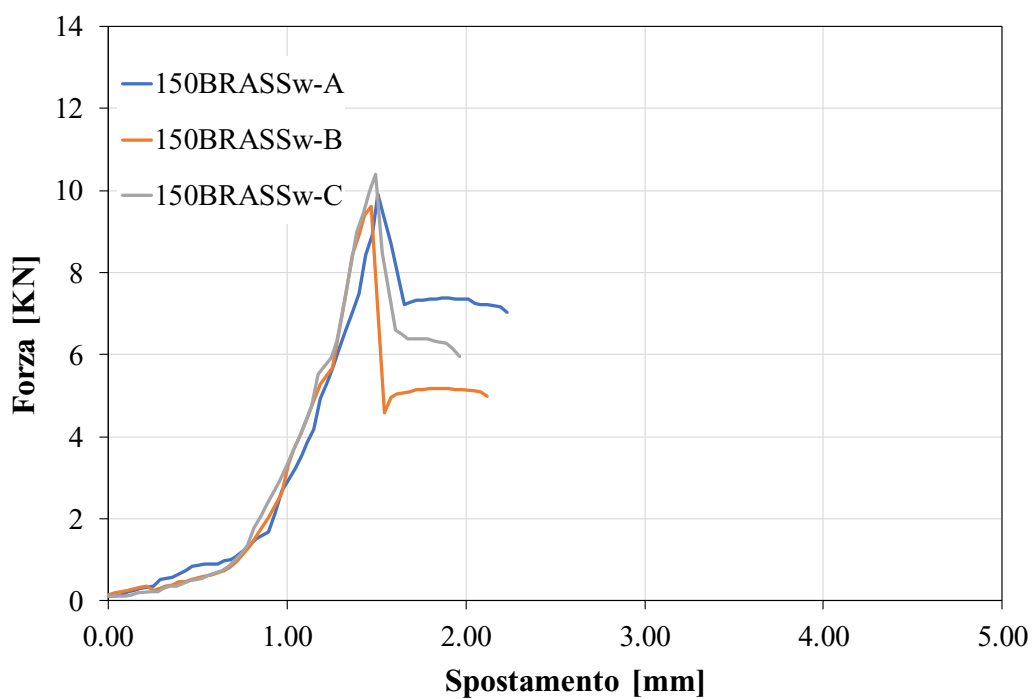


Figura 46-Curva Forza-Spostamento a flessione 150BRASSw 7 giorni

Tabella 20-Risultati prova a flessione 150BRASSw 7 giorni

<b>Risultati prova a flessione 150BRASSw 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$f_{max}$ (MPa)
150BRASSw-A	9,91	1,51	23,22
150BRASSw-B	9,60	1,47	22,51
150BRASSw-C	10,40	1,50	24,38
Media	9,97	1,49	23,37

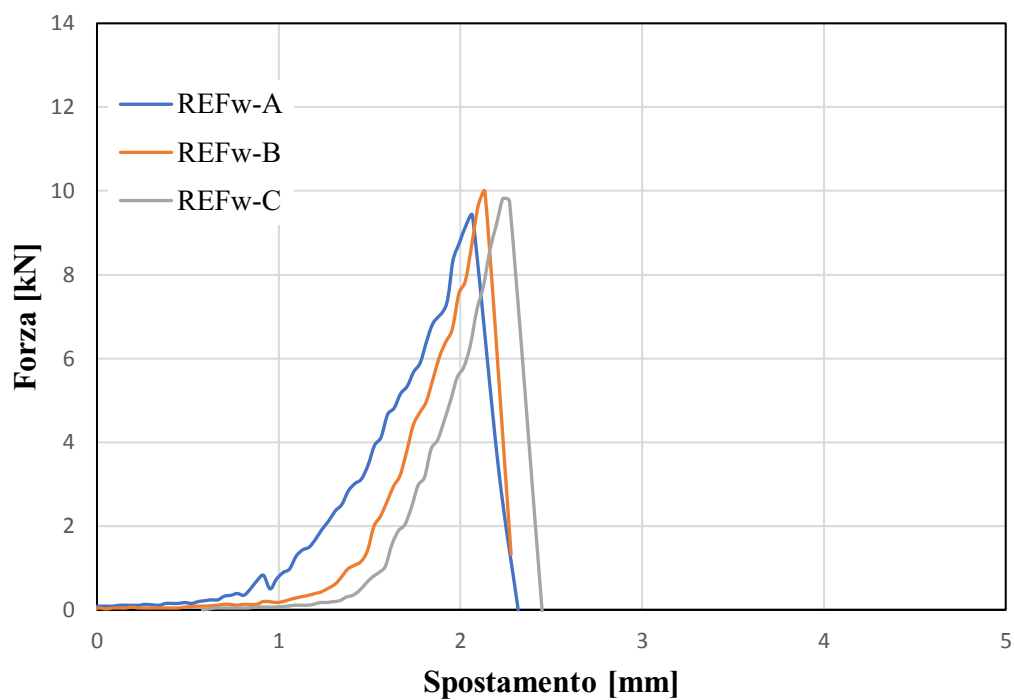


Figura 47-Curva Forza-Spostamento a flessione REFw 28 giorni

Tabella 21-Risultati prova a flessione REFw 28 giorni

<b>Risultati prova a flessione REFw 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$f_{max}$ (MPa)
REFw-A	9,41	2,07	22,05
REFw-B	9,97	2,13	23,37
REFw-C	9,82	2,23	23,02
Media	9,73	2,14	22,81

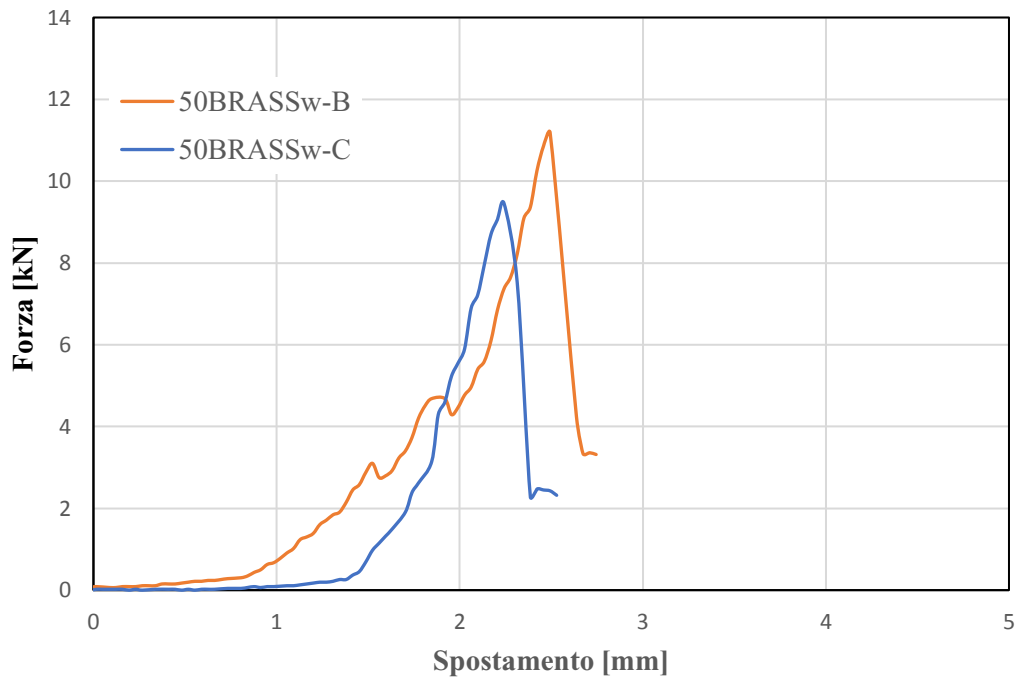


Figura 48-Curva Sforzo-Spostamento a flessione 50BRASSw 28 giorni

Tabella 22-Risultati prova a flessione 50BRASSw 28 giorni

<b>Risultati prova a flessione 50BRASS 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$f_{max}$ (MPa)
50BRASSw-B	11,18	2,49	26,21
50BRASSw-C	9,45	2,24	22,15
Media	10,32	2,37	24,18

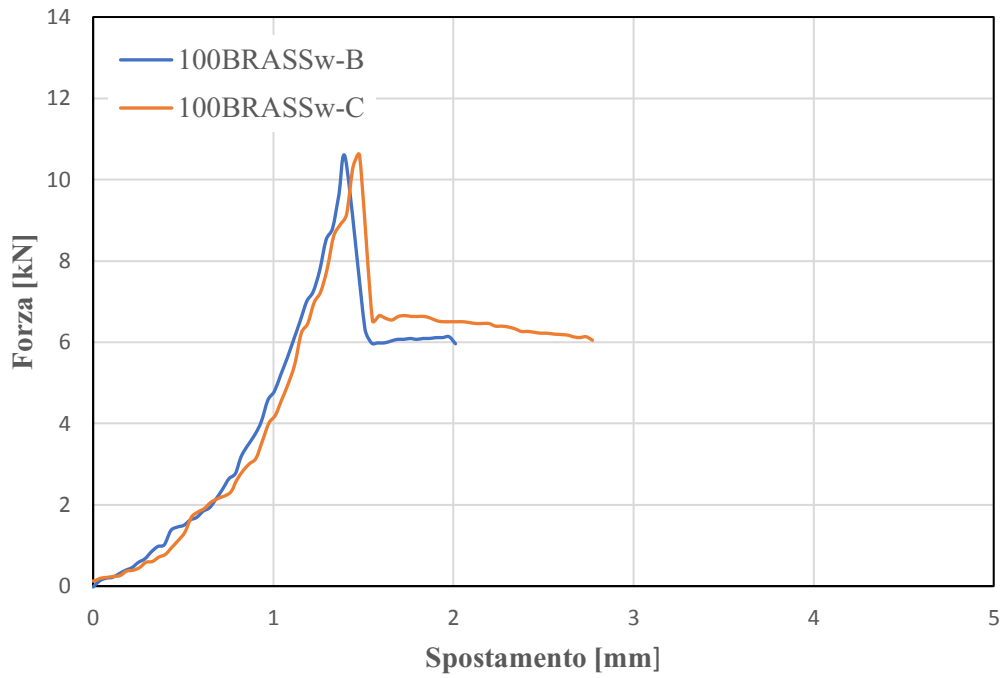


Figura 49-Curva Sforzo-Spostamento a flessione 100BRASSw 28 giorni

Tabella 23-Risultati prova a flessione 100BRASSw 28 giorni

<b>Risultati prova a flessione 100BRASS 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$f_{max}$ (MPa)
100BRASSw-B	10,51	1,40	24,63
100BRASSw-C	10,60	1,48	24,84
Media	10,55	1,44	24,74

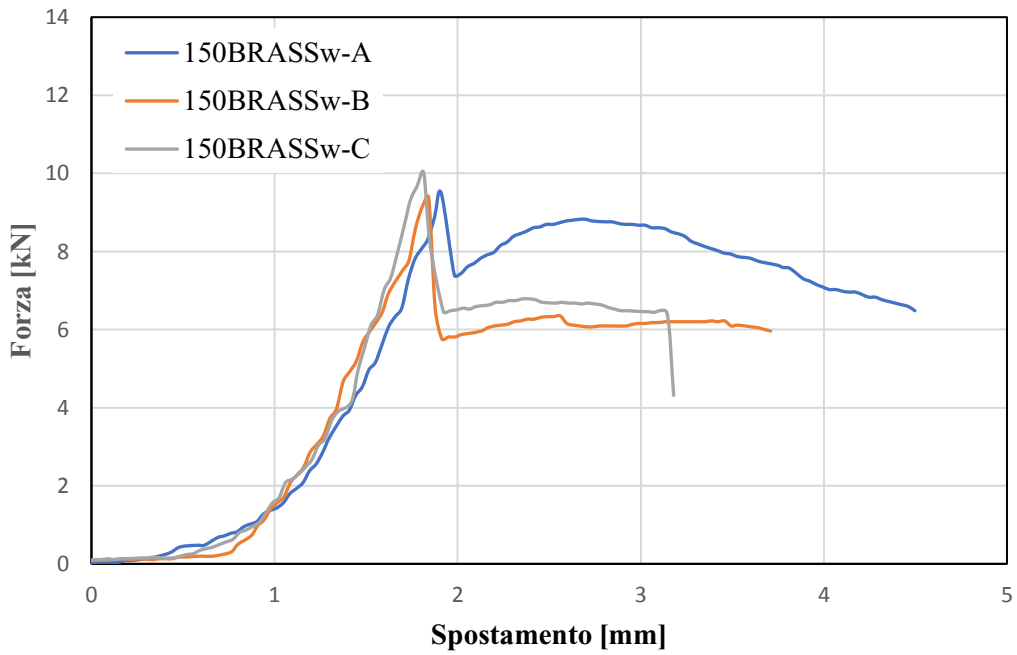


Figura 50-Curva Sforzo-Spostamento a flessione 150BRASSw 28 giorni

Tabella 24-Risultati prova flessione 150BRASSw 28 giorni

<b>Risultati prova a flessione 150BRASSw 28giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Resistenza a flessione
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$f_{max}$ (MPa)
150BRASSw-A	9,49	1,91	22,25
150BRASSw-B	9,39	1,84	22,00
150BRASSw-C	10,01	1,81	23,47
Media	9,63	1,81	22,57

I risultati medi ottenuti di ciascuna prova a flessione vengono riassunti in Tabella 25 per UR=80% (i quali risultati sono riportati nel grafico di cui alla Figura 51), in Tabella 26 per UR>95% (il quale risultato è riportato in Figura 52).

*Tabella 25 Risultati medi prova a flessione UR=80% a 7 giorni, v. Figura 51*

<b>Risultati medi prova a flessione UR=80% a 7 giorni</b>				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a flessione media	Incremento tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	(%)
REFd	8,38	2,23	19,64	
50BRASSd	8,01	1,53	18,78	-4,38
100BRASSd	7,87	1,52	18,45	-6,06
150BRASSd	11,45	2,40	26,83	36,61

*Tabella 26-Risultati medi prova a flessione UR=80% a 28 giorni, v. Figura 51*

<b>Risultati medi prova a flessione UR=80% a 28 giorni</b>				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a flessione media	Incremento tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	(%)
REFd	7,39	1,65	17,33	
50BRASSd	7,80	1,39	18,29	5,54
100BRASSd	8,24	1,61	19,31	11,43
150BRASSd	10,39	2,00	24,36	40,57



Tabella 27-Risultati medi prova a flessione UR>95% a 7 giorni, v. Figura 52

<b>Risultati medi prova a flessione UR&gt;95% a 7 giorni</b>				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a flessione media	Incremento tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	(%)
REFw	10,89	1,54	25,52	
50BRASSw	10,19	1,28	23,88	-6,43
100BRASSw	10,28	1,40	24,20	-5,17
150BRASSw	9,97	1,49	23,37	-8,42

Tabella 28-Risultati medi prova a flessione UR>95% a 28 giorni, v. Figura 53

<b>Risultati medi prova a flessione UR&gt;95% a 28 giorni</b>				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a flessione media	Incremento tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	(%)
REFw	9,73	2,14	22,81	
50BRASSw	10,32	2,37	24,18	6,01
100BRASSw	10,55	1,44	24,74	8,46
150BRASSw	9,63	1,81	22,57	-1,05

### Risultati UR=80%

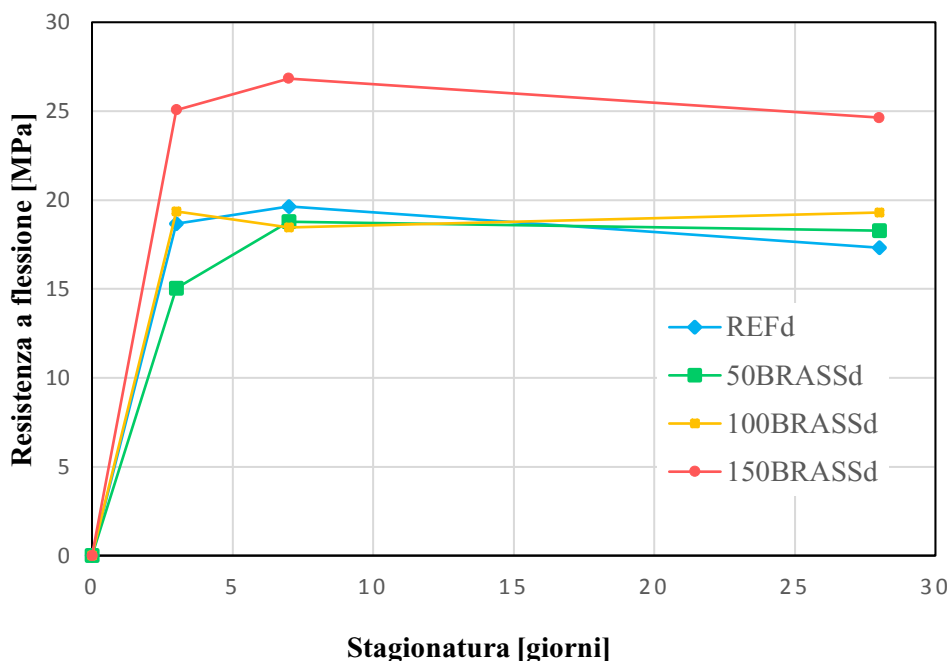


Figura 51-Andamento Resistenza a flessione nel tempo UR=80%

Teoricamente l'aggiunta di fibre comporta un aumento del valore della Resistenza ultima a flessione. La sezione ridotta del provino dovrebbe permettere, lungo l'asse del provino stesso, un maggior allineamento delle fibre tali da saldare le fessure formatesi durante la prova.

Tuttavia, prendendo in considerazione i provini stagionati ad UR=80% è possibile notare che inserendo un quantitativo di fibre ottonate pari a  $50 \frac{kg}{m^3}$  (50BRASSd) si ha una resistenza inferiore al provino di riferimento (REFd) a 3 e 7 giorni, come se l'aggiunta di fibre andasse a rompere la coesione interna creando come un difetto nel materiale. Aumentando il quantitativo di fibre a  $100 \frac{kg}{m^3}$  (100BRASSd) a 3 giorni si ha un incremento di resistenza tale per cui farebbe pensare che con questo quantitativo di fibre il comportamento è consono con le teorie largamente diffuse; tuttavia a 7 giorni il materiale mostra una resistenza inferiore a quella di riferimento facendo pensare ad alcuni difetti dei provini o prove mal eseguite come verrà

confermato successivamente studiando il comportamento a compressione della stessa serie di provini. Con  $150 \frac{kg}{m^3}$  di fibre (150BRASSd) a 3 e 7 le fibre hanno un effetto positivo, registrando un incremento del 36,61%. Ad avvenuta maturazione, 28 giorni, i provini 50BRASSd e 100BRASSd dimostrano che l'inserimento delle fibre migliora se pur di poco il comportamento a flessione del calcestruzzo a differenza dei 150BRASSd dove si è registrato un peggioramento della resistenza rispetto a quella a 7 giorni.

È possibile dunque stabilire che l'inserimento di poche fibre fino a 7 giorni va a influire negativamente sulla resistenza a flessione (come se si creasse una decoesione interna del calcestruzzo) ma ad avvenuta stagionatura un lieve miglioramento c'è. In definitiva solo l'aggiunta di  $150 \frac{kg}{m^3}$  di fibre ottonate permette al materiale di avere a 28 giorni un incremento di resistenza, precisamente dello 40,57% rispetto al riferimento (REFd).

**Risultati UR>95%**

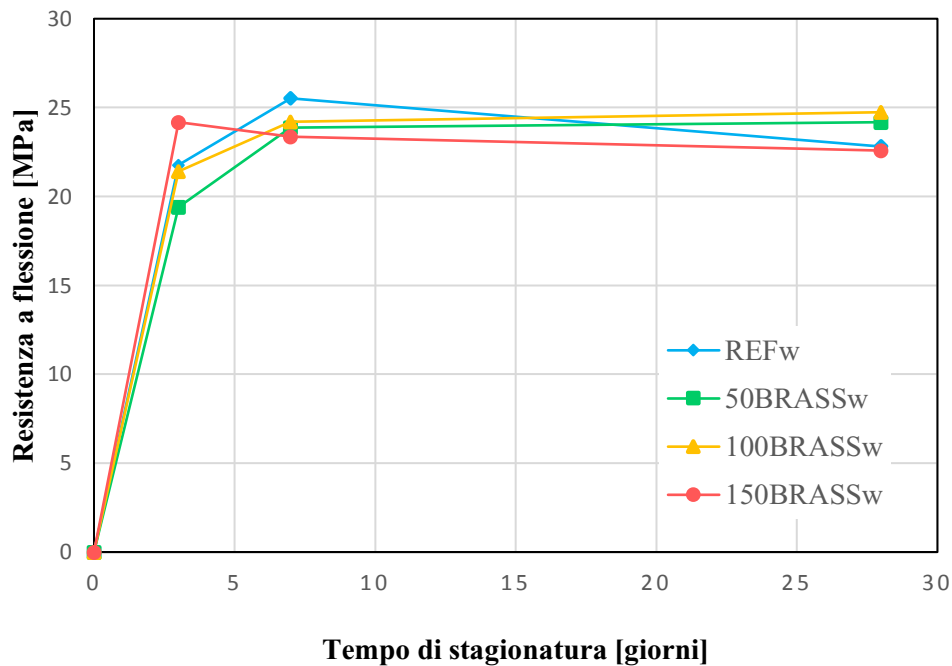
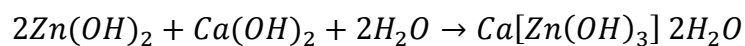


Figura 52- Andamento Resistenza a flessione nel tempo UR>95%

In riferimento alla stagionatura ad umido teoricamente le prestazioni meccaniche dovrebbero migliorare in quanto la nebulizzazione continua del getto permette la corretta idratazione del cemento. Da un precedente studio Corinaldesi et al infatti, per provini stagionati ad umido, è stato visto che l'uso di agente espansivo combinato con fibre di ottone va a migliorare la resistenza a flessione. Il motivo di questo aumento può essere attribuito ad una migliore adesione chimica tra la fibra zincata e la pasta di cemento circostante, a causa dell'aumentata concentrazione di alcali nella soluzione. L'aumento della basicità potrebbe essere promosso dall'elevata quantità di idrossido di calcio prodotto da la reazione tra CaO e acqua, in questo modo lo zinco promuove la formazione di Zn(OH)<sub>2</sub>.



Dunque, come si legge dalla reazione, l'idrossido di zinco può reagire con idrossido di calce e acqua per produrre CHZ (visto tramite analisi SEM, Scanning Electron Microscopy), che è un prodotto fibroso che può migliorare l'adesione all'interfaccia

tra fibre e la pasta di cemento circostante: in questo modo si ha una dezincificazione dell'ottone in ambiente alcalino (Fig. 41). In particolare, come affermato da Arligue et al nel 1979, “quando lo zinco entra in contatto con il calcestruzzo, si ricopre di un composto protettivo di idrossido zincato di calcio che aumenta l'adesione del calcestruzzo all'armatura”. Il ruolo del rame non è chiaro; forse rimane sulla superficie della fibra, ma probabilmente può contribuire allo stesso modo alla formazione del cristallino prodotti a base di rame e calcio opportunamente combinati.

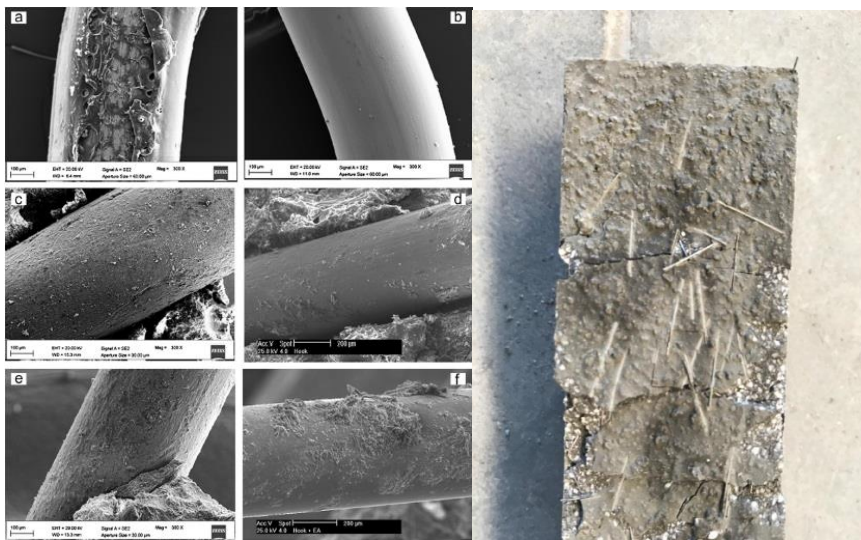
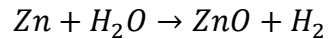


Figura 53-Analisi SEM e Dezincificazione dell'ottone in ambiente alcalino

Stagionando i provini ad umido è possibile notare come sia aumentata la resistenza del provino senza fibre a 7 giorni, ma una volta aggiunte le fibre le prestazioni meccaniche diminuiscono. Infatti, è possibile notare come l'effetto delle fibre a 50BRASSw e 100BRASSw risulti negativo a 3 giorni, con un riscontro positivo per quelle a 150BRASSw; a 7 giorni viene sottolineato come all'aumentare delle fibre diminuisca di poco tale resistenza, pur sempre inferiore al REFw. Potrebbe essere che si crei uno scollamento tra fibra e matrice cementizia tale da non essere più

solidale con le barre di rinforzo causato dalla reazione dello zinco con la calce che libera idrogeno gassoso,



tale trattazione troverà riscontro nello studio del ritiro nei paragrafi successivi.

A 28 giorni, lo studio ha mostrato che provini 150BRASSw presentano un incremento negativo dell'1,05% rispetto al REFw. Differenti sono i risultati ottenuti per 50BRASSw e 100BRASSw che sembrano avere risultati migliori rispetto al REFw e ai provini con il massimo quantitativo di fibre 150BRASSw.

#### ***Confronto risultati***

La stagionatura in ambiente umido sembra migliorare le caratteristiche meccaniche, per il provino in assenza di fibre, rispetto ad una stagionatura all'aria. Considerando la stagionatura in ambiente umido, utilizzando quindi lo stesso quantitativo di agente espansivo ( $25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ) e aumentando le fibre si è visto che a 7 giorni si ha un calo della resistenza a flessione rispetto al provino privo di fibre (REFw), con valori confrontabili per i provini fibro rinforzati; stessa cosa accade anche per i provini stagionati all'aria salvo con quantitativo di fibre di  $150 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . I risultati, anche in termini di tenacità, rispecchiano quanto detto.

La soluzione potrebbe essere quella di far riferimento ad un quantitativo di fibre inferiore al massimo (data l'espansione maggiore causa reazione dello zinco con l'acqua come verrà vista nei risultati delle deformazioni del provino nel tempo) ma aumentando l'agente espansivo che, come noto da Corinaldesi ed al, va a migliorare in maniera sostanziale il comportamento a flessione.

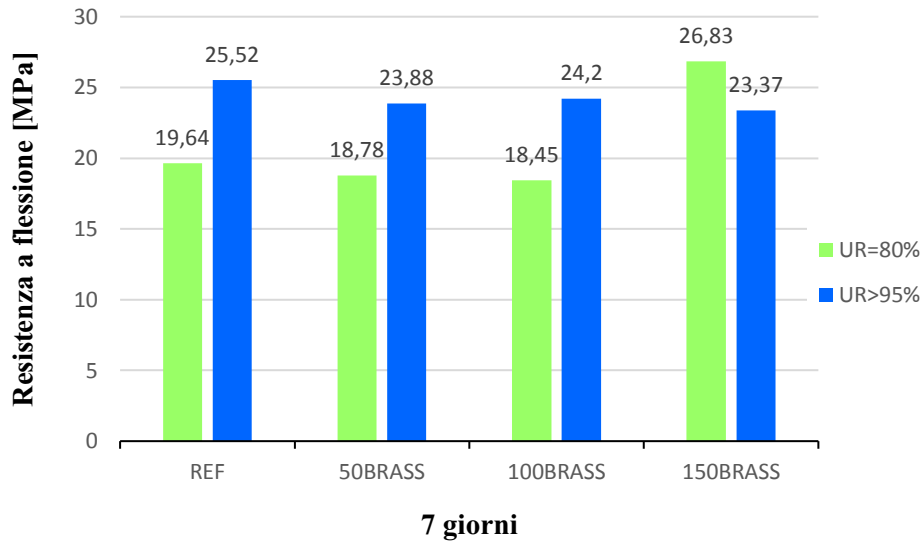


Figura 54- Confronto Resistenze a flessione a 7 giorni UR=80% e UR>95%

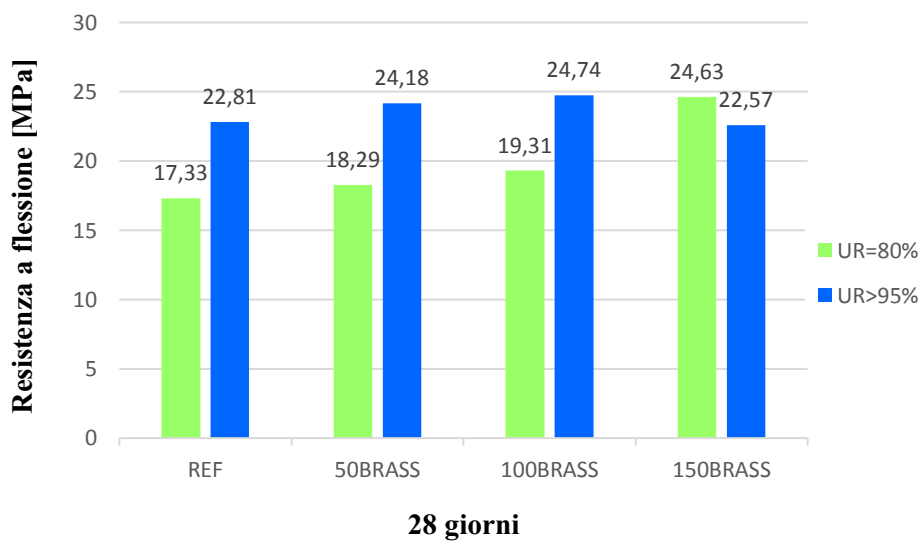


Figura 55- Confronto Resistenze a flessione a 28 giorni UR=80% e UR>95%

## 5.2 Prova a compressione

I provini di dimensioni 4x4x16 cm<sup>3</sup> 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 mm<sup>2</sup> 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 cm<sup>3</sup>. 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 A, B, C, appartenenti al medesimo impasto, sono indicati il valore di carico massimo a rottura, espresso in kN, lo spostamento al carico massimo, in mm e la tensione  $\sigma_{max}$  in MPa.



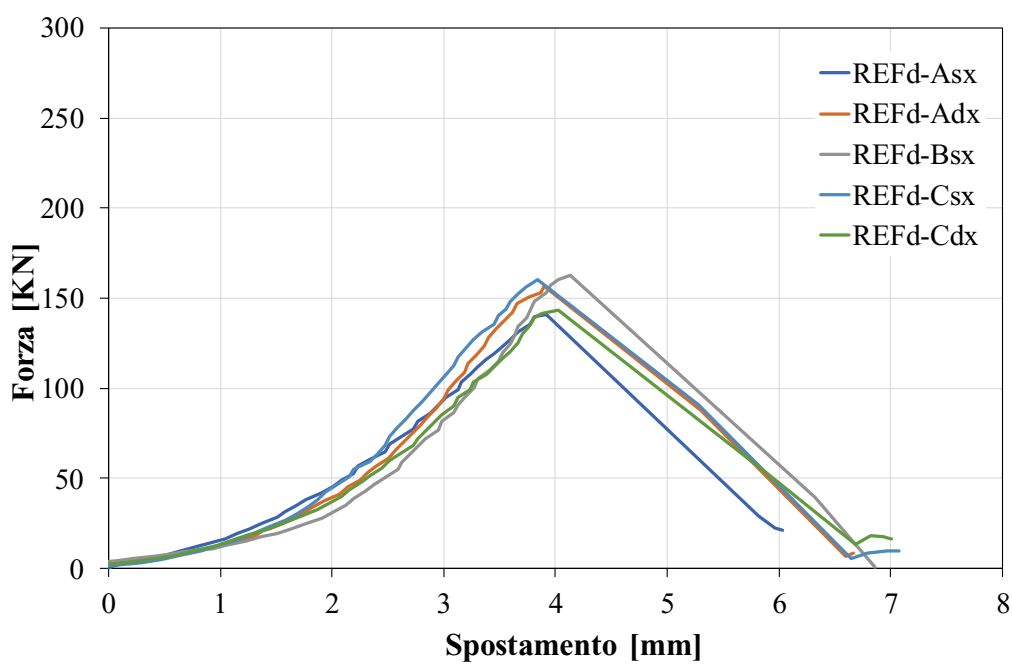


Figura 56-Curva Forza-Spostamento a compressione REFd 7 giorni

Tabella 29-Risultati prova a compressione REFd 7 giorni

<b>Risultati prova a compressione REFd</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)
REFd-Asx	140,80	3,92	88,00
REFd-Adx	156,75	3,90	97,97
REFd-Bsx	163,04	4,13	101,90
REFd-Csx	160,22	3,84	100,14
REFd-Cdx	143,18	4,02	89,49
Media	152,80	3,96	95,50

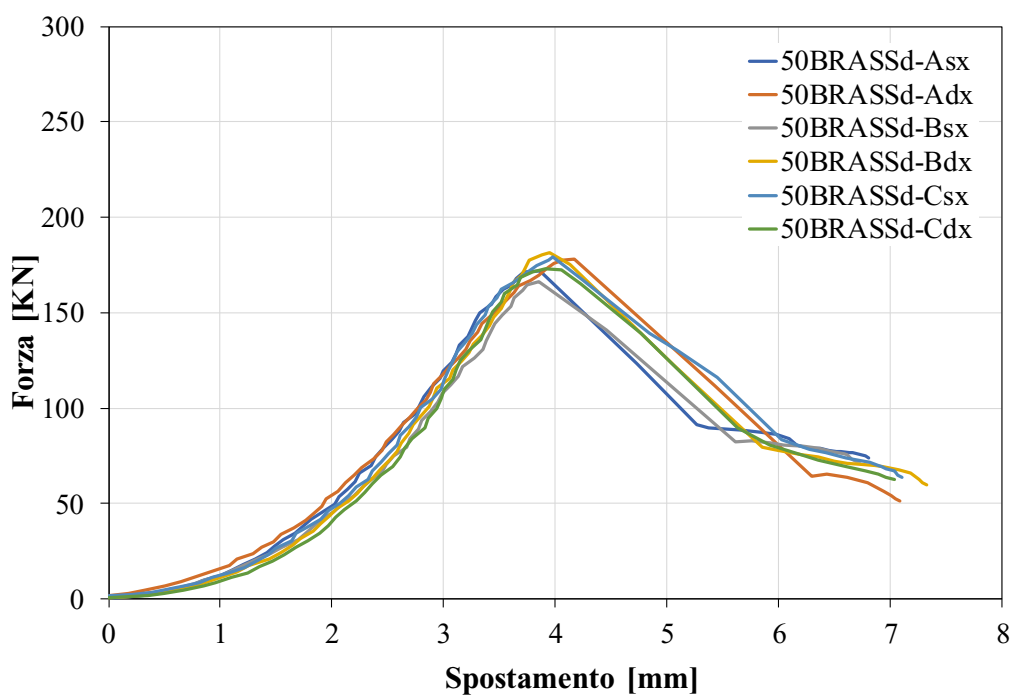


Figura 57-Curva Forza-Spostamento 50BRASSd 7 giorni

Tabella 30- Risultati prova a compressione 50BRASSd 7 giorni

<b>Risultati prova a compressione 50BRASSd 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)
50BRASSd-Asx	171,66	3,86	107,29
50BRASSd -Adx	117,82	4,17	111,14
50BRASSd -Bsx	166,29	3,85	103,93
50BRASSd -Bdx	181,65	3,95	113,53
50BRASSd -Csx	179,45	3,98	112,16
50BRASSd -Cdx	173,29	3,91	108,31
Media	175,03	3,95	109,39

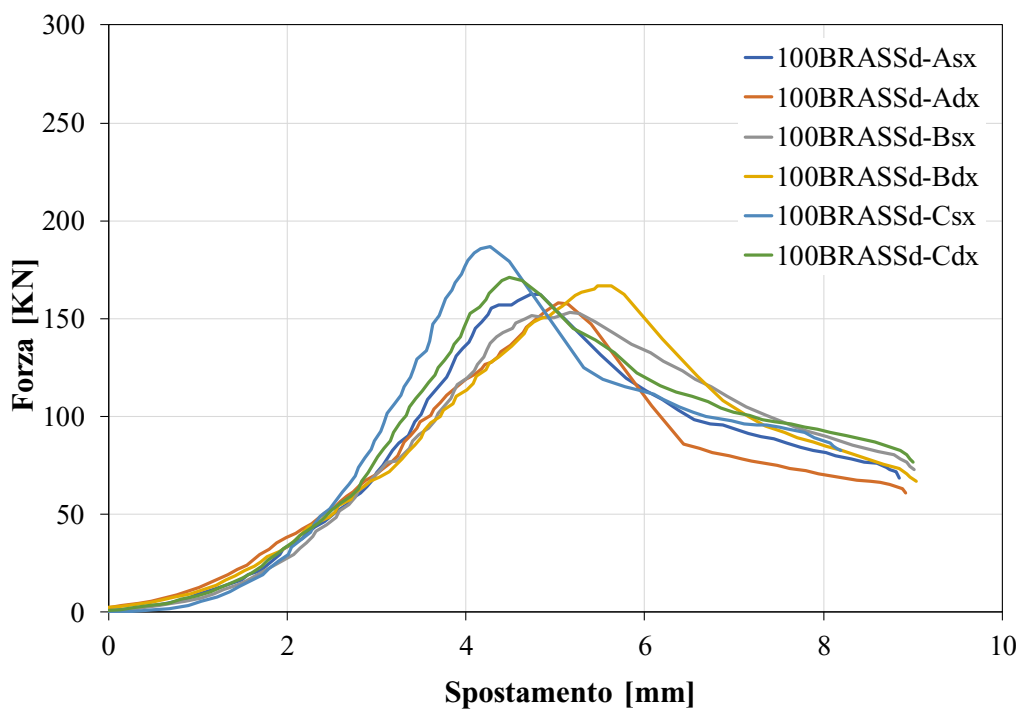


Figura 58-Curva Forza-Spostamento a compressione 100BRASSd 7 giorni

Tabella 31-Risultati prova a compressione 100BRASSd 7 giorni

<b>Risultati prova a compressione 100BRASSd 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)
100BRASSd-Asx	162,48	4,72	101,55
100BRASSd -Adx	157,87	5,04	98,67
100BRASSd -Bsx	153,11	5,16	95,69
100BRASSd -Bdx	166,70	5,62	104,19
100BRASSd -Csx	187,02	4,27	116,89
100BRASSd -Cdx	170,79	4,48	106,75
Media	163,33	4,18	103,96

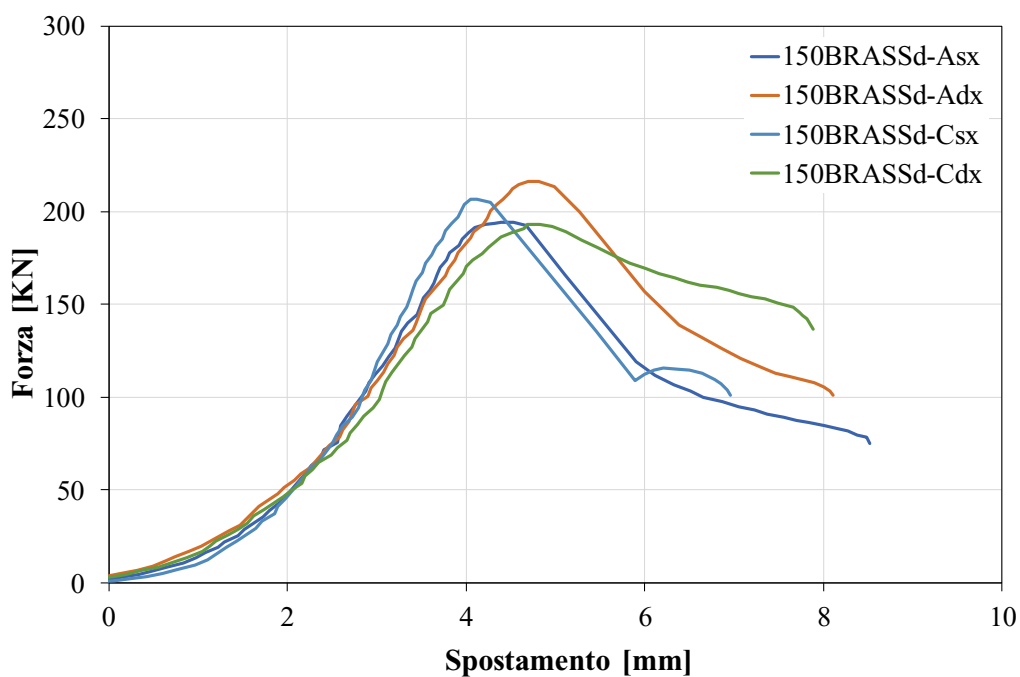


Figura 59- Curva Forza-Spostamento a compressione 150BRASSd 7 giorni

Tabella 32- Risultati prova a compressione 150BRASSd 7 giorni

<b>Risultati prova a compressione 150BRASSd 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)
150BRASSd-Asx	194,21	4,39	121,38
100BRASSd -Adx	216,29	4,81	135,18
150BRASSd -Csx	206,78	4,13	129,24
150BRASSd -Cdx	192,98	4,83	120,61
Media	202,57	4,54	126,60

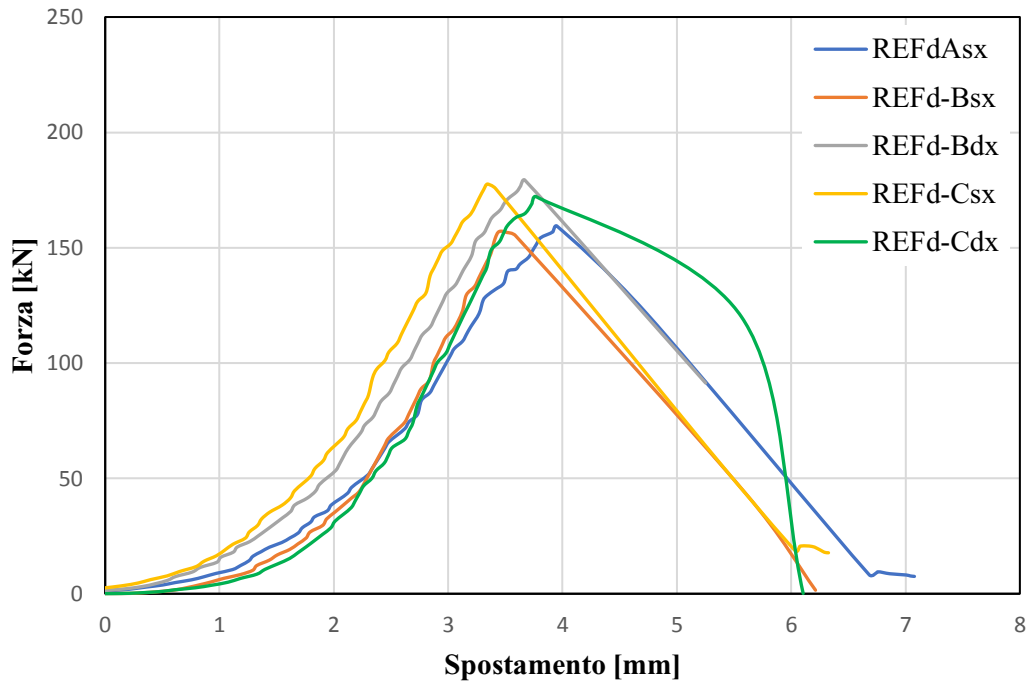


Figura 60- Curva Forza-Spostamento a compressione REFd 28 giorni

Tabella 33-Risultati prova a compressione REFd 28 giorni

<b>Risultati prova a compressione REFd 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)
REFd-Asx	159,34	3,45	99,59
REFd-Bsx	157,01	3,15	98,13
REFd-Bdx	179,29	3,47	112,05
REFd-Csx	177,60	3,34	111,00
REFd-Cdx	172,13	3,27	107,58
Media	169,07	3,34	105,67

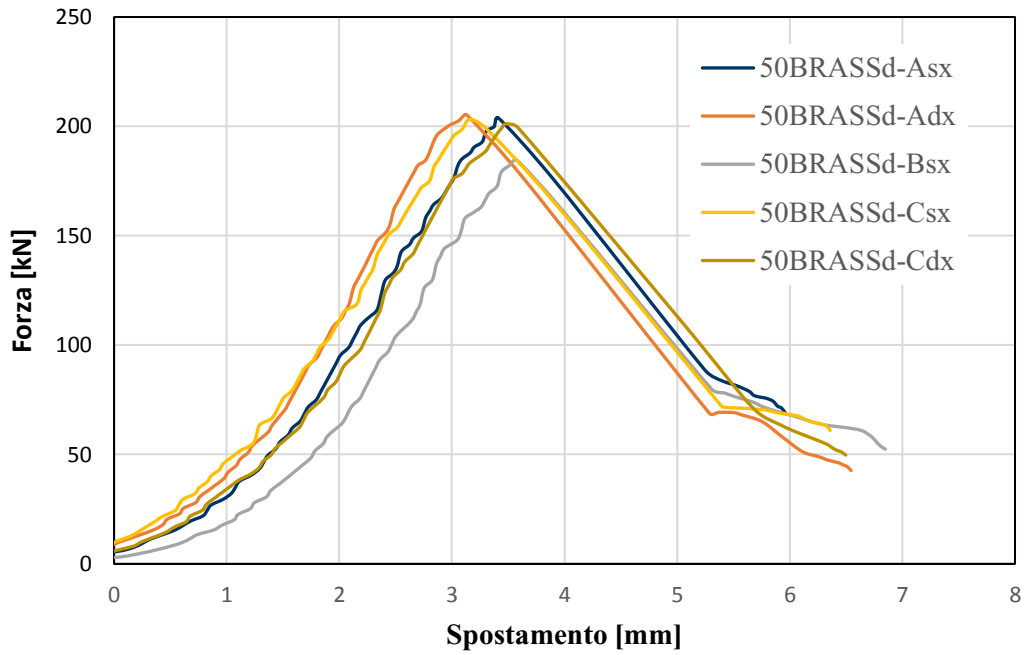


Figura 61- Curva Forza-Spostamento a compressione 50BRASSd 28 giorni

Tabella 34- Risultati prova a compressione 50BRASSd 28 giorni

<b>Risultati prova a compressione 50BRASSd 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)
50BRASSd-Asx	203,83	3,14	127,39
50BRASSd-Adx	205,29	3,13	128,31
50BRASSd-Bsx	184,41	3,58	115,26
50BRASSd-Csx	203,33	3,16	127,08
50BRASSd-Cdx	201,15	3,48	125,72
Media	199,60	3,30	124,75

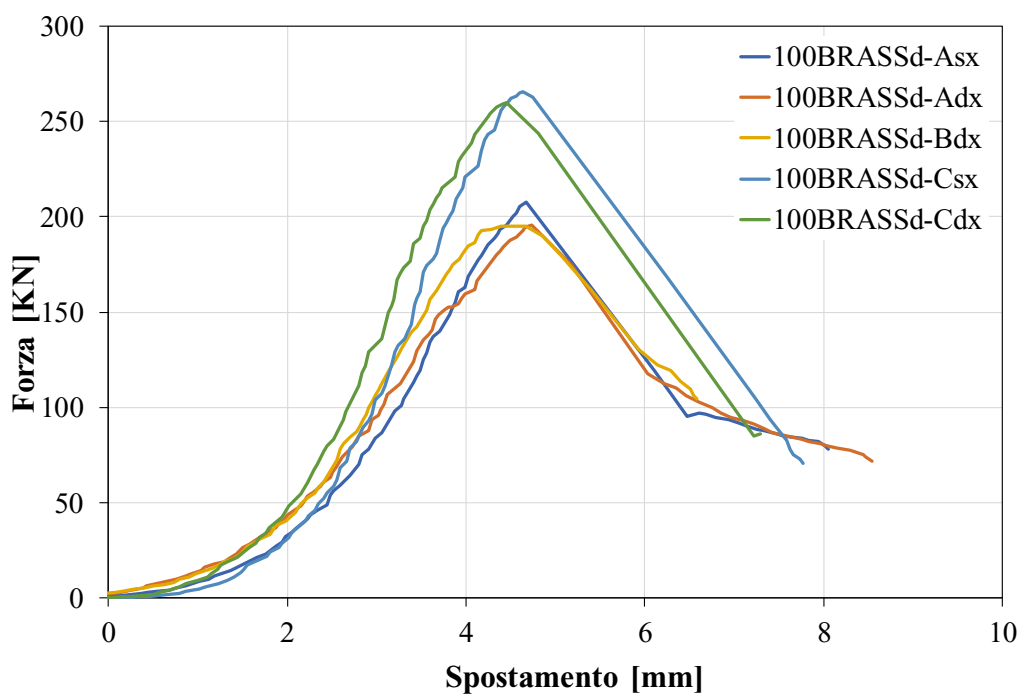


Figura 62- Curva Forza-Spostamento a compressione 100BRASSd 28 giorni

Tabella 35- Risultati prova a compressione 100BRASSd 28 giorni

<b>Risultati prova a compressione 100BRASSd 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)
100BRASSd-Asx	207,48	4,67	129,67
100BRASSd-Adx	195,90	4,74	122,43
100BRASSd-Bdx	195,38	4,50	122,11
100BRASSd-Csx	265,95	4,64	166,22
100BRASSd-Cdx	259,85	4,46	162,41
Media	224,91	4,60	140,57

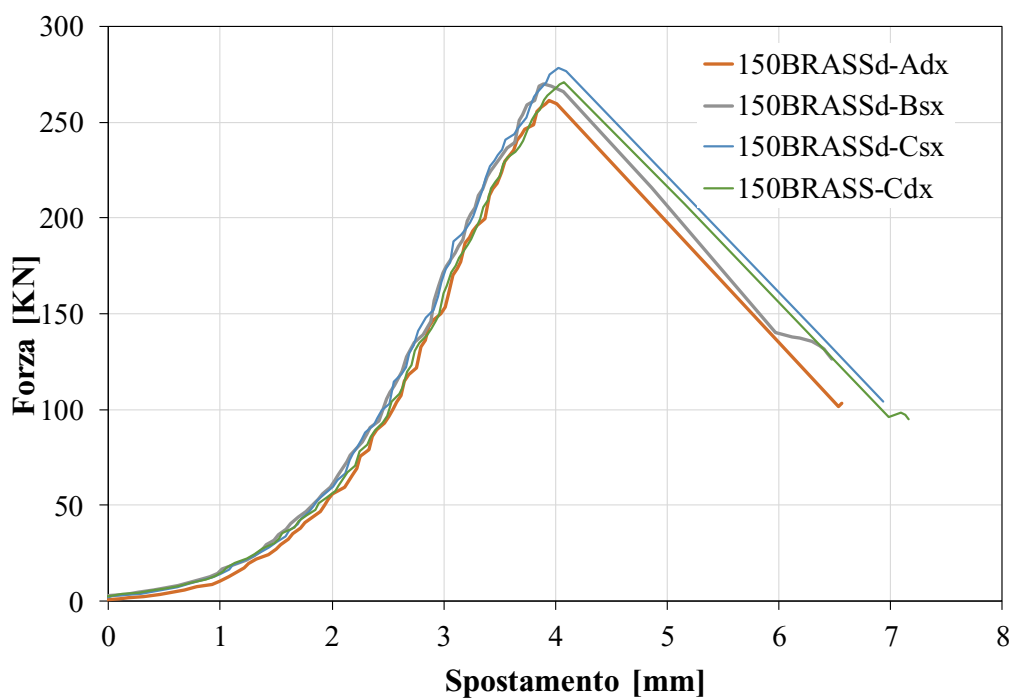


Figura 63- Curva Forza-Spostamento a compressione 150BRASSd 28 giorni

Tabella 36- Risultati prova a compressione 150BRASSd 28 giorni

Risultati prova a compressione 150BRASSd 28 giorni			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)
150BRASSd-Adx	261,17	3,95	163,23
150BRASSd-BSx	269,81	3,89	168,63
150BRASSd-Csx	278,45	4,02	174,03
150BRASSd-Cdx	270,63	4,07	169,14
Media	232,04	3,98	168,76



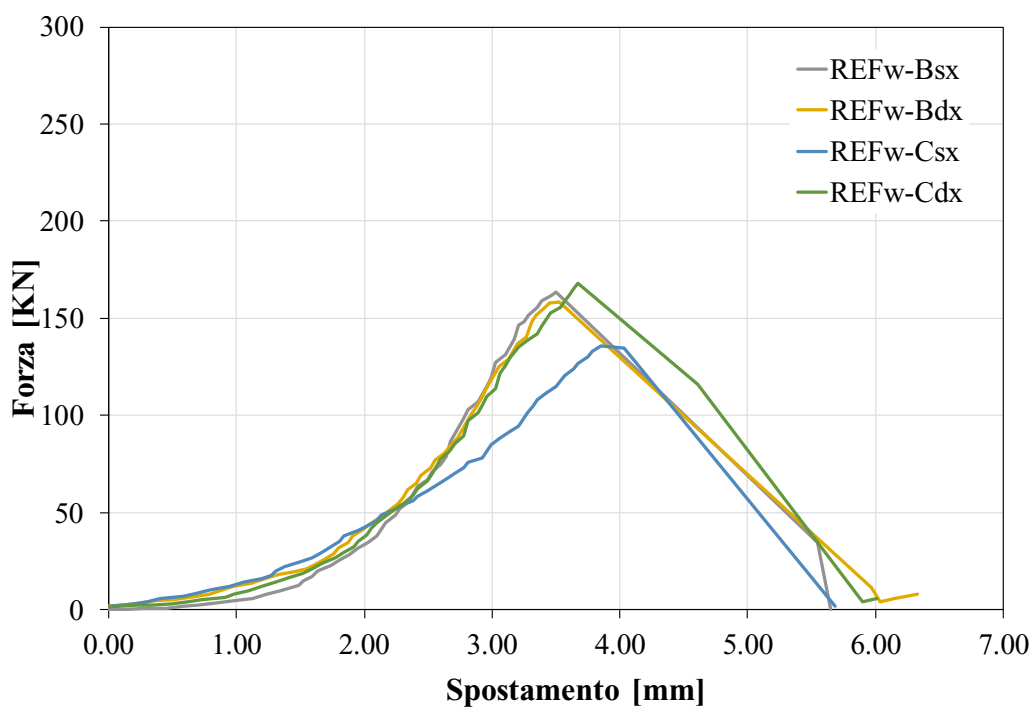


Figura 64- Curva Forza-Spostamento a compressione REFw 7 giorni

Tabella 37- Risultati prova a compressione REFw 7 giorni

<b>Risultati prova a compressione REFw 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)
REFw-Bsx	163,69	3,50	102,31
REFw-Bdx	158,13	3,52	98,83
REFw-Csx	135,81	3,86	84,88
REFw-Cdx	167,80	3,68	104,88
Media	156,36	3,64	97,72

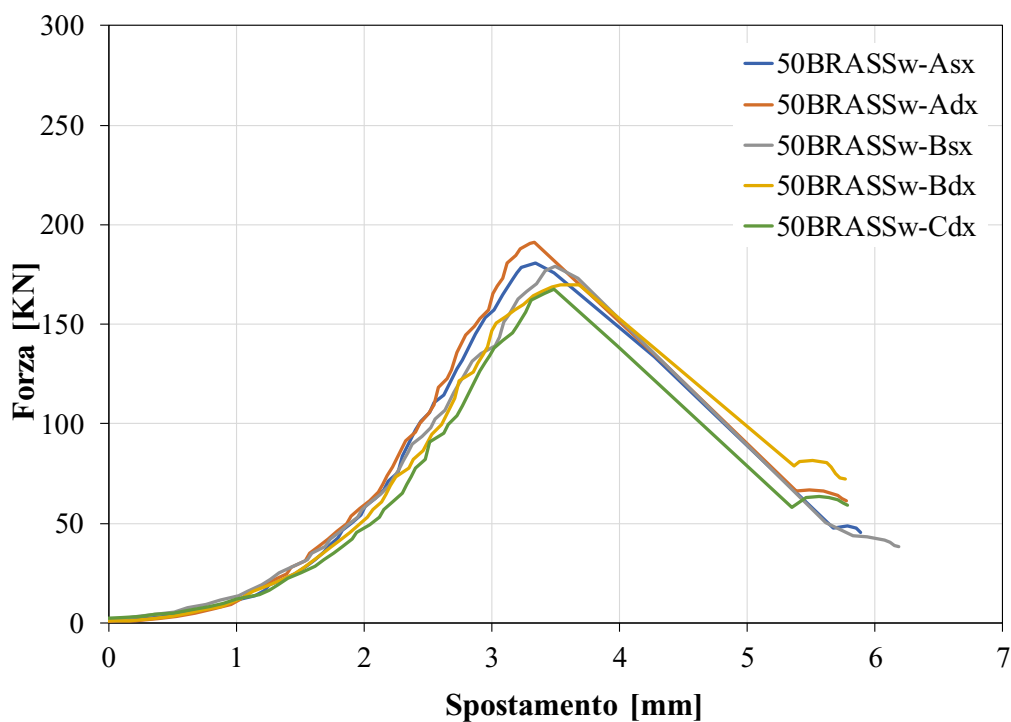


Figura 65- Curva Forza-Spostamento a compressione 50BRASSw 7 giorni

Tabella 38- Risultati prova a compressione 50BRASSw 7 giorni

Risultati prova a compressione 50BRASSw 7 giorni			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)
50BRASSw-Asx	180,56	3,44	112,85
50BRASSw-Adx	191,09	3,33	119,43
50BRASSw-Bsx	179,22	3,49	112,01
50BRASSw-Bdx	169,81	3,54	106,13
50BRASSw-Cdx	167,44	3,49	104,65
Media	177,62	3,44	111,01

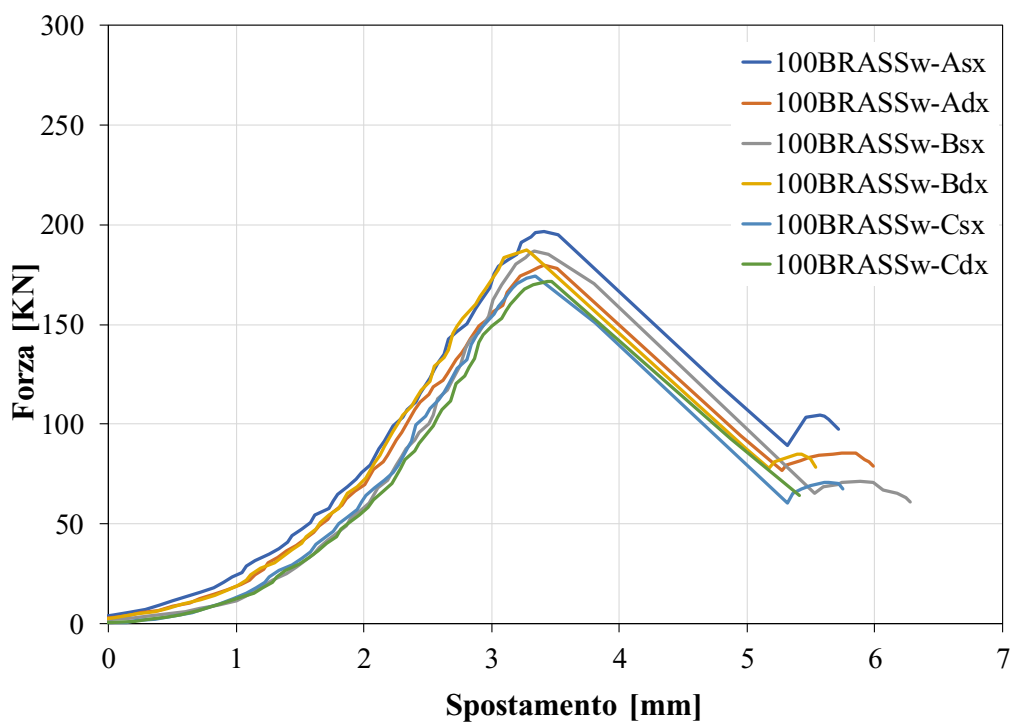


Figura 66- Curva Forza-Spostamento a compressione 100BRASSw 7 giorni

Tabella 39-Risultati prova a compressione 100BRASSw 7 giorni

<b>Risultati prova a compressione 100BRASSw 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)
100BRASSw-Asx	196,73	3,41	122,96
100BRASSw-Adx	179,97	3,41	112,48
100BRASSw-Bsx	186,80	3,33	116,75
100BRASSw-Bdx	187,13	3,27	116,95
100BRASSw-Csx	174,39	3,34	109,00
100BRASSw-Cdx	171,61	3,44	107,26
Media	182,77	3,37	114,23

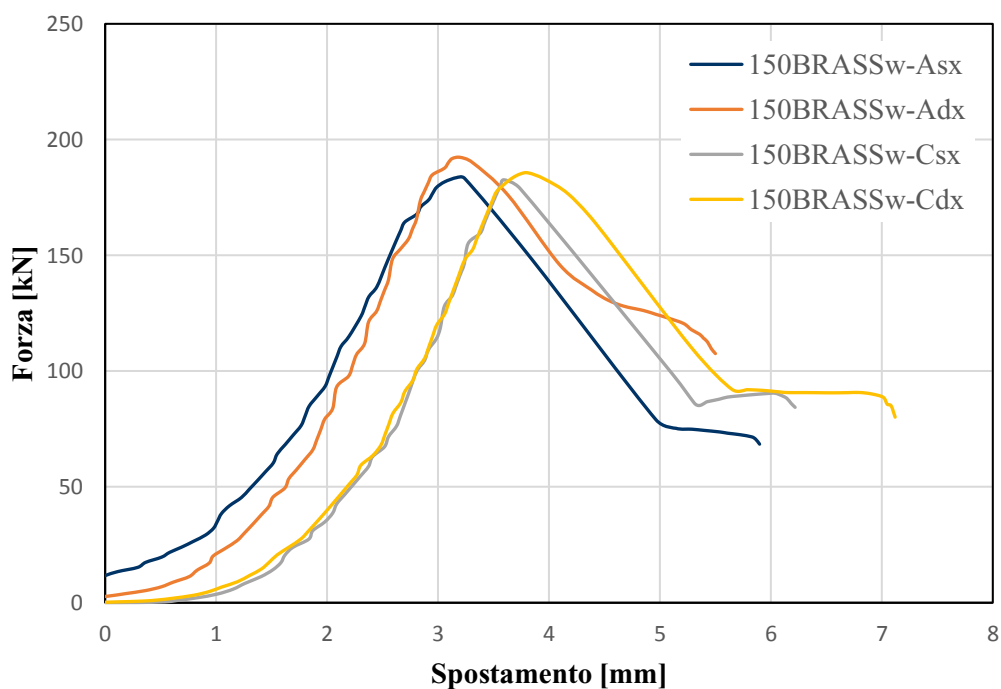


Figura 67- Curva Forza-Spostamento a compressione 150BRASSw 7 giorni

Tabella 40- Risultati prova a compressione 150BRASSw 7 giorni

<b>Risultati prova a compressione 150BRASSw 7 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)
150BRASSw-Asx	183,59	3,97	114,75
150BRASSw-Adx	192,34	3,50	120,21
150BRASSw-Csx	182,64	3,40	114,15
150BRASSw-Cdx	185,62	3,81	116,01
Media	181,68	3,64	113,55

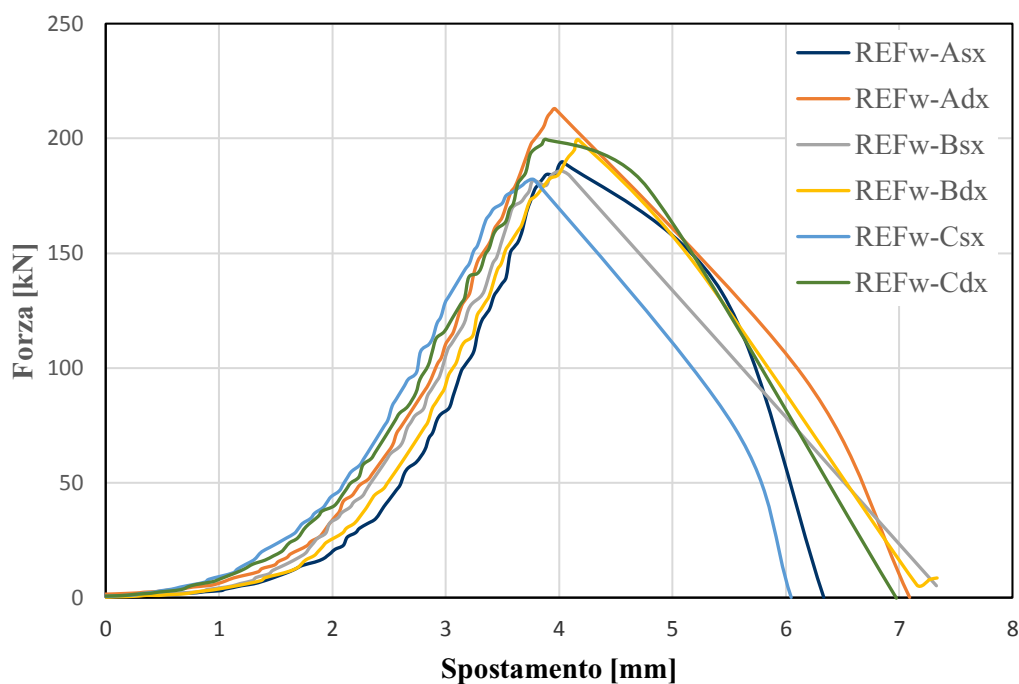


Figura 68- Curva Forza-Spostamento a compressione REFw 28 giorni

Tabella 41- Risultati prova a compressione REFw 28 giorni

<b>Risultati prova a compressione REFw 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)
REFw-Asx	189,69	4,03	118,56
REFw-Adx	212,84	4,47	133,02
REFw-Bsx	185,86	4,02	116,16
REFw-Bdx	199,30	4,17	124,56
REFw-Csx	181,79	3,78	113,62
REFw-Cdx	199,56	3,89	124,72
Media	194,84	4,06	121,77

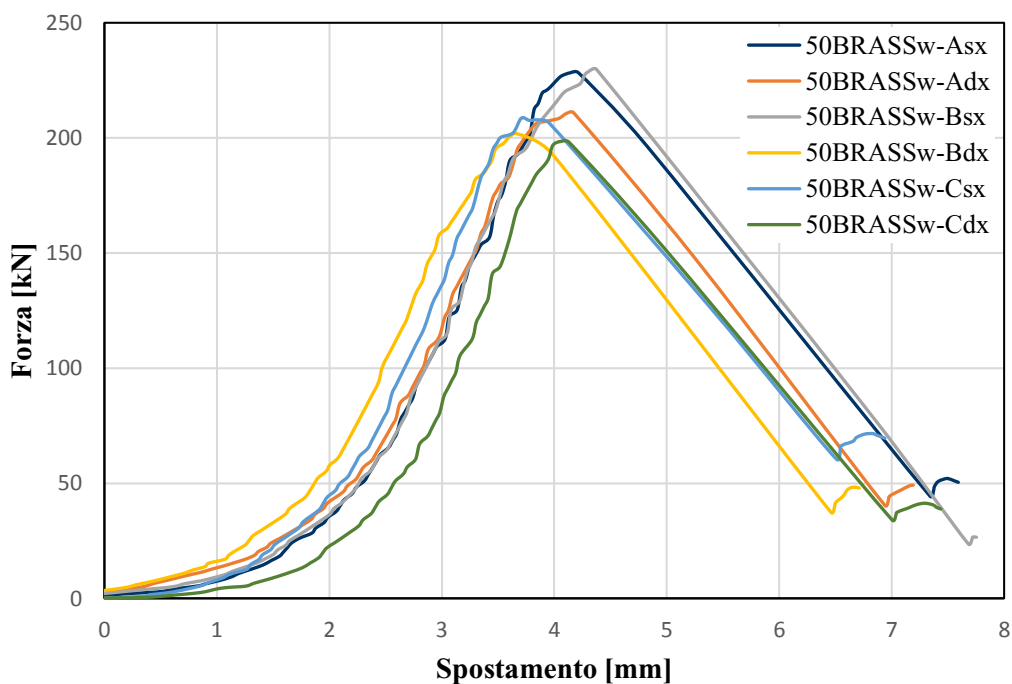


Figura 69- Curva Forza-Spostamento a compressione 50BRASSw 28 giorni

Tabella 42- Risultati prova a compressione 50BRASSw 28 giorni

<b>Risultati prova a compressione 50BRASSw 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)
50BRASSw-Asx	228,23	4,14	142,69
50BRASSw-Adx	210,85	4,17	131,78
50BRASSw-Bsx	229,70	4,38	143,56
50BRASSw-Bdx	201,97	3,66	126,23
50BRASSw-Csx	208,54	3,71	130,34
50BRASSw-Cdx	198,50	4,05	124,06
Media	212,96	4,02	133,11

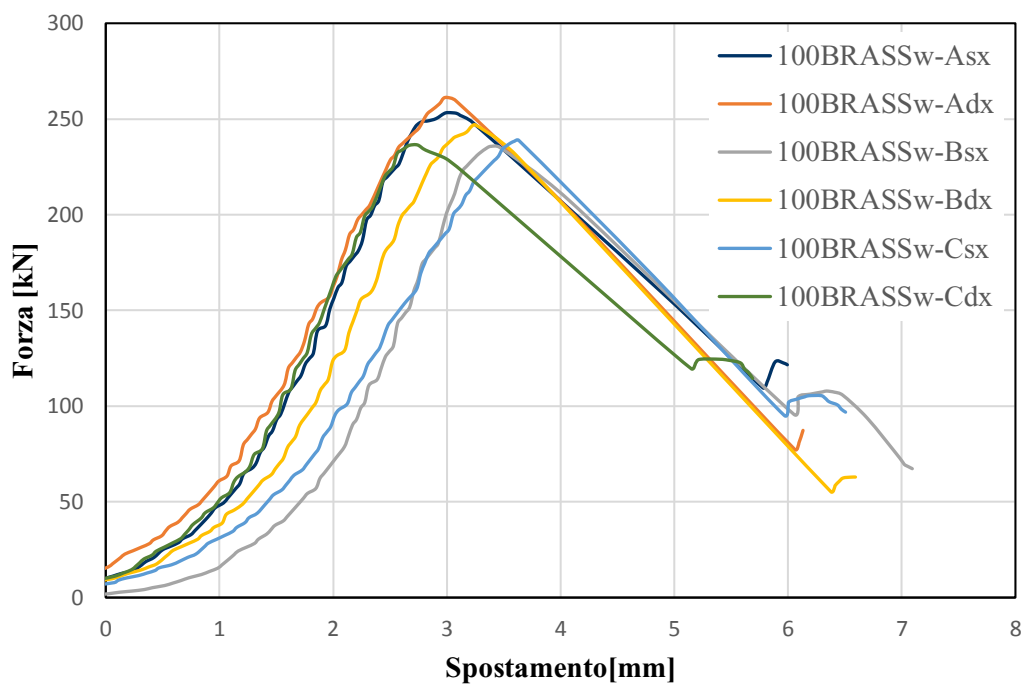


Figura 70- Curva Forza-Spostamento a compressione 100BRASSw 28 giorni

Tabella 43- Risultati prova a compressione 100BRASSw 28 giorni

<b>Risultati prova a compressione 100BRASSw 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)
100BRASSw-Asx	253,33	3,01	158,33
100BRASSw-Adx	261,21	3,00	163,26
100BRASSw-Bsx	235,73	3,46	147,33
100BRASSw-Bdx	246,87	3,25	154,29
100BRASSw-Csx	238,86	3,63	149,29
100BRASSw-Cdx	236,42	2,74	147,76
Media	245,40	3,18	153,38

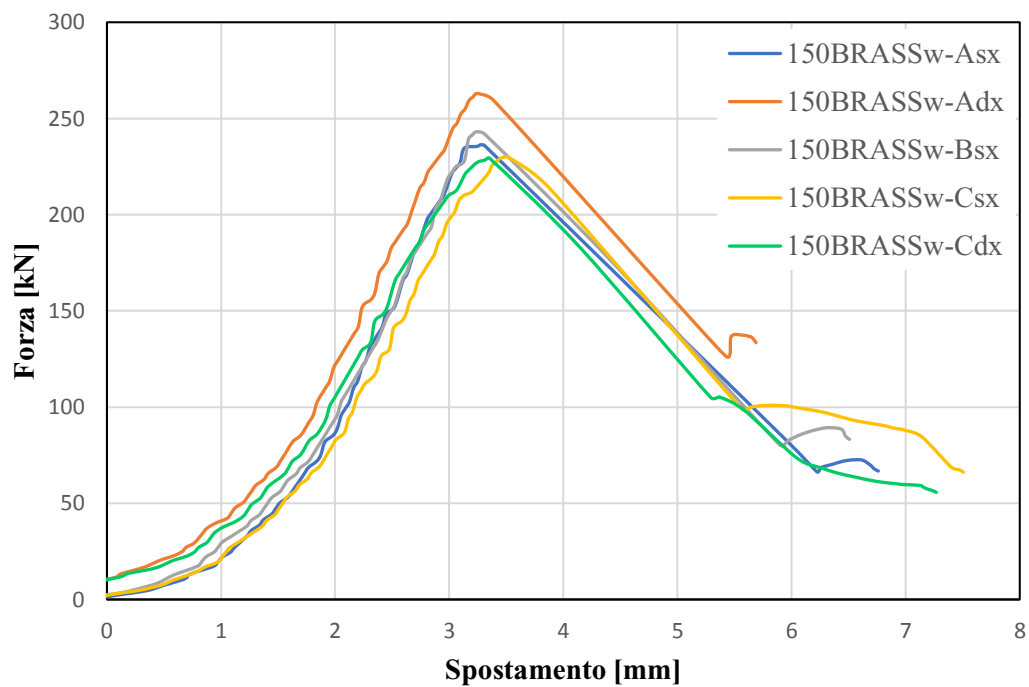


Figura 71- Curva Forza-Spostamento a compressione 150BRASSw 28 giorni

Tabella 44- Risultati prova a compressione 150BRASSw 28 giorni

<b>Risultati prova a compressione 150BRASSw 28 giorni</b>			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	$F_{\max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)
150BRASSw-Asx	236,31	3,27	147,69
150BRASSw-Adx	262,94	3,24	164,34
150BRASSw-Bsx	243,09	3,24	151,93
150BRASSw-Csx	229,81	3,45	143,63
150BRASSw-Cdx	229,33	3,35	143,33
Media	240,30	3,31	150,19



Di seguito sono riportati, i risultati medi ottenuti di ciascuna prova a compressione (Tabella 45, Tabella 46) per UR=80%, con i risultati in Figura 72. Per UR>95% si fa riferimento rispettivamente (Tabella 47 e Tabella 48), con i risultati riportati in Figura 73.

*Tabella 45- Risultati medi prova a compressione UR=80% a 7 giorni, v. Figura 72*

<b>Risultati medi prova a compressione UR=80% a 7 giorni</b>				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a compressione media	Incremento tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	(%)
REFd	152,80	3,96	95,50	
50BRASSd	175,03	3,95	109,39	14,54
100BRASSd	163,33	4,18	103,96	8,86
150BRASSd	202,57	4,54	126,60	32,56

*Tabella 46- Risultati medi prova a compressione UR=80% a 28 giorni, v. Figura 72*

<b>Risultati medi prova a compressione UR=80% a 28 giorni</b>				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a compressione media	Incremento tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	(%)
REFd	169,07	3,34	105,67	
50BRASSd	199,60	3,30	124,75	18,06
100BRASSd	245,40	4,60	140,57	33,03
150BRASSd	2240,30	3,98	168,76	59,70

Tabella 47-Risultati medi prova a compressione UR>95% a 7 giorni, v. Figura 73

<b>Risultati medi prova a compressione UR&gt;95% a 7 giorni</b>				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a compressione media	Incremento tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	(%)
REFw	156,36	3,64	97,72	
50BRASSw	177,62	3,44	111,01	13,60
100BRASSw	182,77	3,37	114,23	16,90
150BRASSw	181,68	3,64	113,55	16,20

Tabella 48- Risultati medi prova a compressione UR>95% a 28 giorni, v. Figura 73

<b>Risultati medi prova a compressione UR&gt;95% a 28 giorni</b>				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a compressione media	Incremento tensione massima
	$F_{max}$ (kN)	s (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	(%)
REFw	194,84	4,06	121,77	
50BRASSw	212,96	4,02	133,11	9,31
100BRASSw	245,40	3,18	153,38	25,96
150BRASSw	240,30	3,31	150,19	23,34

### Risultati UR=80%

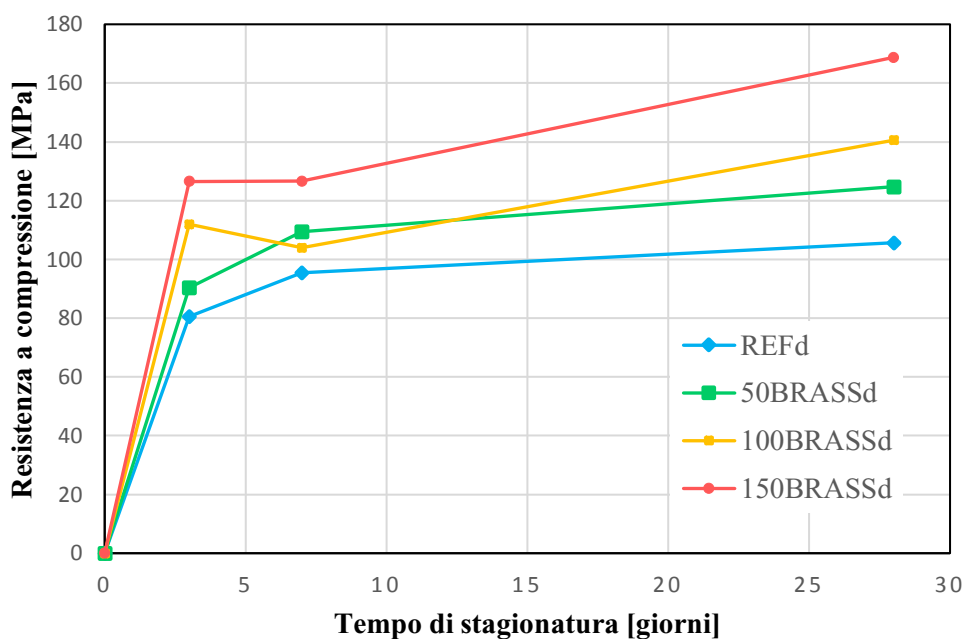


Figura 72- Andamento Resistenza a compressione nel tempo UR=80%

La presenza della fibra di ottone influisce in maniera positiva nella resistenza a compressione. Le prestazioni meccaniche a compressione di un UHPC discendono dal miglioramento della microstruttura della matrice cementizia ed è quindi ritenuto opportuno a tal proposito analizzare dapprima il comportamento meccanico a compressione dei provini UHPC senza fibre (REFd e REFw), che presentano già delle differenze notevoli rispetto ai valori dei calcestruzzi ordinari.

Dal punto di vista micromeccanico, la principale differenza rispetto ai calcestruzzi ordinari risiede in un ritardo nell'attingimento della 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. Nei calcestruzzi ordinari invece, una concentrazione di sforzi proprio all'interfaccia pasta-aggregato, dà luogo ad una microfessurazione più pronunciata. Proprio l'evoluzione di questa microfessurazione all'interfaccia pasta-aggregato determina quegli scorrimenti plastici che, a livello macroscopico,

si traducono in un pronunciato ramo post-picco. Nel caso dei calcestruzzi UHPC, invece, le aggiunte minerali (fumo di silice nel caso in esame), tendono a rinforzare l'interfaccia aggregato-matrice a tal punto da ridurre la microfessurazione. Tale fenomeno fa sì che il ramo post-picco, in questi, sia meno pronunciato.

Per quanto riguarda il comportamento a compressione del calcestruzzo fibrorinforzato invece, come riportato al capitolo 2.5.2.1 del CNR-DT 204/2006, *“le fibre sono generalmente in grado di ridurre la fragilità della matrice, ma non di influenzare sensibilmente il comportamento a compressione; il legame costitutivo del calcestruzzo fibrorinforzato ed in particolare la sua resistenza possono essere assimilati a quelli del materiale non rinforzato”*.

Al contrario si può osservare come l'aggiunta di fibre e il progressivo aumento in dosaggio comporta un incremento della resistenza a compressione sin dal terzo giorno; eccezione fatta, come già visto per la flessione, per il provino contenente  $100 \frac{kg}{m^3}$  di fibre che a 7 giorni risulta avere una resistenza a compressione inferiore rispetto al provino contenente  $50 \frac{kg}{m^3}$  di fibre, ciò potrebbe derivare da eventuali errori in fase esecutiva. Dunque, con  $150 \frac{kg}{m^3}$  si è arrivati ad un incremento del 59,70% e ciò può essere derivato dall'effetto di confinamento che le fibre determinano sulla matrice cementizia.

### Risultato UR>95%

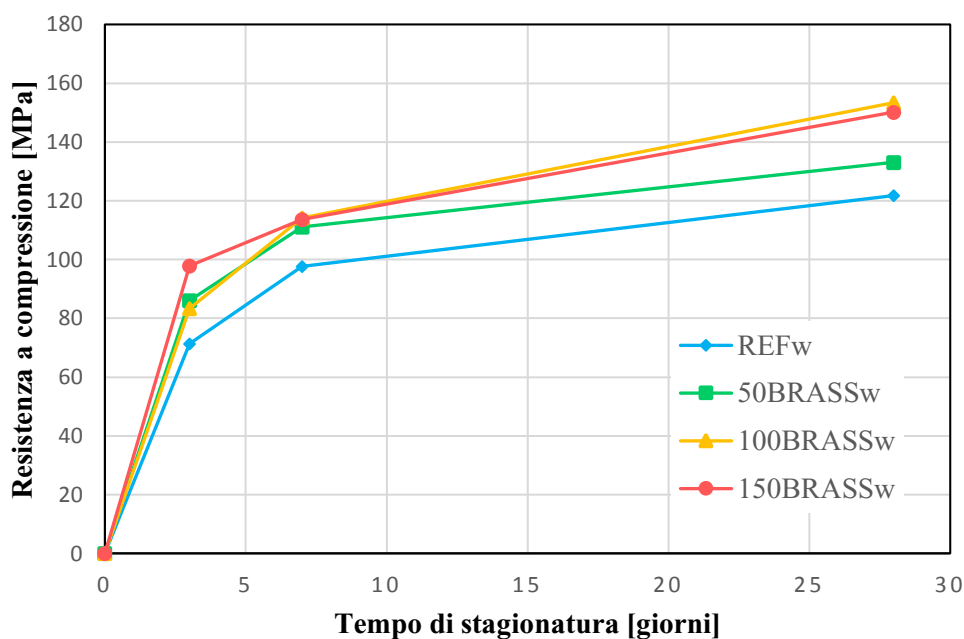


Figura 73-Andamento Resistenza a compressione nel tempo UR>95%

In riferimento alla stagionatura ad umido teoricamente le prestazioni meccaniche dovrebbero migliorare in quanto la nebulizzazione continua del getto permette la corretta idratazione del cemento. Com'è possibile notare, tutti i provini indipendentemente dal contenuto maggiore o minore di fibre, presentano una resistenza confrontabile e maggiore del provino senza fibre. Questo può essere spiegato, come si vedrà in seguito, facendo riferimento al calcolo delle deformazioni nel tempo che mostrano come l'espansione di tali i provini stagionati in umido potrebbe influenzare l'azione di confinamento delle fibre causa la reazione dello zinco con acqua, che libera idrogeno gassoso ed espande il materiale.

Dal grafico sottostante si può notare che per dosaggi di 100BRASSw i risultati ottenuti sono confrontabili a 7 giorni; ciò non accade per una stagionatura a 28 giorni, dove notiamo delle prestazioni migliori per 100BRASSw rispetto all'impasto con maggior dosaggio.

### Confronto risultati

Stagionando in ambiente umido le caratteristiche meccaniche sono inferiori a quelle ottenute ad UR=80%. Utilizzando quindi lo stesso quantitativo di agente espansivo ( $25 \frac{kg}{m^3}$ ) e aumentando le fibre si è visto che a 7 giorni si ha un aumento della resistenza a compressione, rispetto al provino privo di fibre (REFw e REFd) ma con valori confrontabili per i provini fibrorinforzati; salvo con quantitativo di fibre di  $150 \frac{kg}{m^3}$ , dove appunto la resistenza del provino stagionato all'aria risulta maggiore di quella in umido (Figura 72).

Tutta la trattazione può essere spiegata, come si vedrà in seguito, facendo riferimento all'azione espansiva che aumenta all'aumentare del contenuto di fibre; dunque l'azione di confinamento non prevale sull'effetto espansivo causa reazione dello zinco con l'acqua che libera idrogeno gassoso ed espande il materiale.

La soluzione potrebbe essere quella di utilizzare nel mix-design, un quantitativo di fibre ottonate inferiore al valore massimo e usare l'agente espansivo ma, come noto da Corinaldesi et al, non va ad influenzare molto la resistenza a compressione quindi è solo utile per aumentare la resistenza a flessione e per ridurre in parte il ritiro.

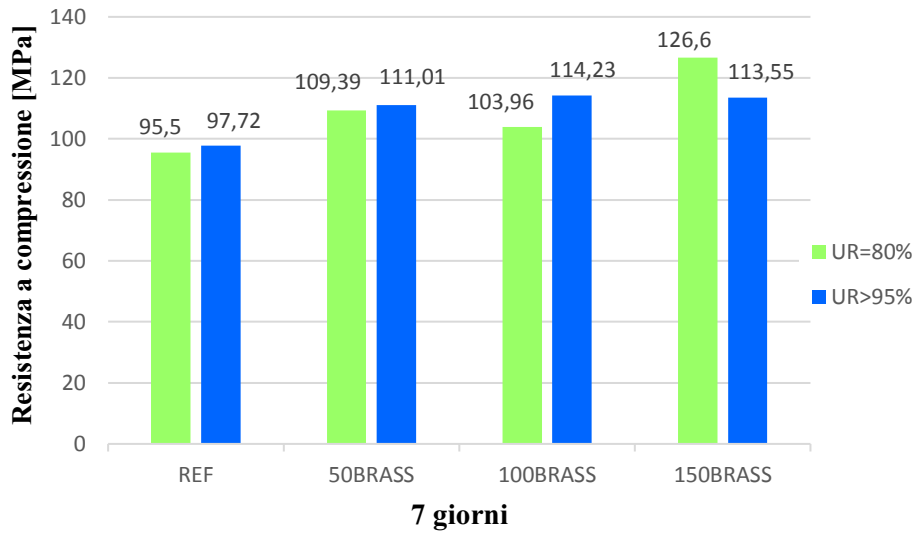


Figura 74- Confronto Resistenza a compressione 7 giorni UR=80% -UR>95%

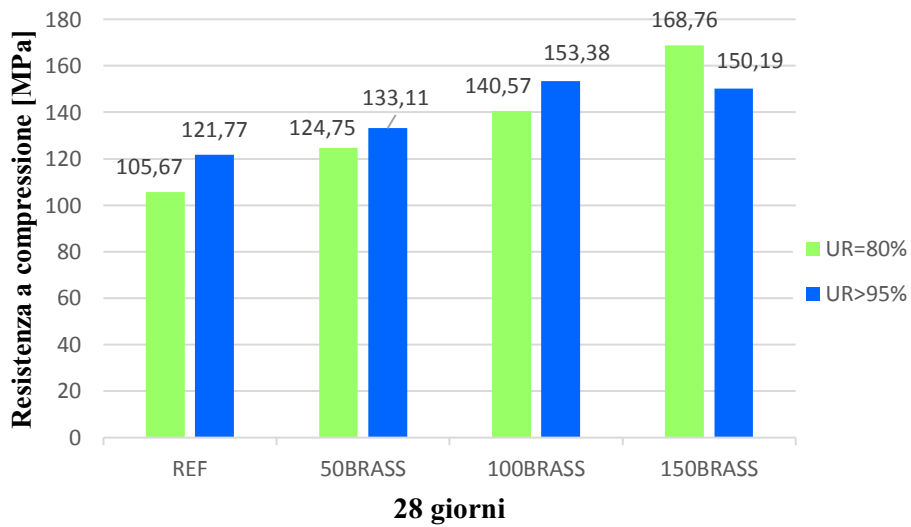


Figura 75- Confronto Resistenza a compressione 28 giorni UR=80% -UR>95%

### 5.3 Prova di determinazione del ritiro 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 i provini stagionati in UR=80% e una deformazione/espansione dei provini stagionati a UR>95% in funzione del Tempo espresso in secondi. Non avendo a disposizione i risultati a 21 e 24 giorni per il ritiro dei provini stagionati ad umido si fa riferimento all'effetto del ritiro alle brevi stagionature, periodo comunque sufficiente per valutarne gli effetti.



Tabella 49- Risultati prova determinazione ritiro REFd UR=80%

Risultati prova determinazione ritiro a UR=80%		
Tempo	REFd-A	REFd-B
7h	0	0
1g	-120	-140
2g	-125	-150
3g	-140	-160
7gg	-170	-230
14gg	-160	-225
21 gg	-170	-230
28 gg	-170	-235

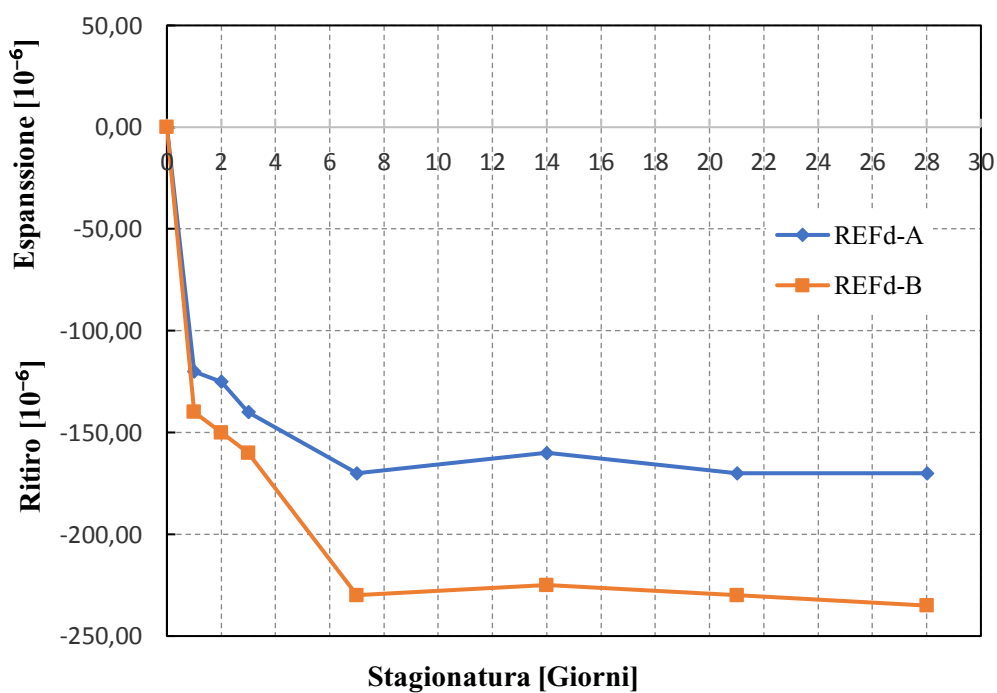


Figura 76- Curva deformazione nel tempo REFd UR=80%

Tabella 50-Risultati prova determinazione ritiro 50BRASSd UR=80%

Risultati prova determinazione ritiro a UR=80%			
Tempo	50BRASSd-A	50BRASSd-B	50BRASSd-C
7h	-	-	-
1g	0	0	0
2g	-10	-110	-20
3g	-30	-120	-40
7gg	-60	-150	-70
14gg	-60	-150	-75
21 gg	-65	-155	-80
28 gg	-75	-160	-85

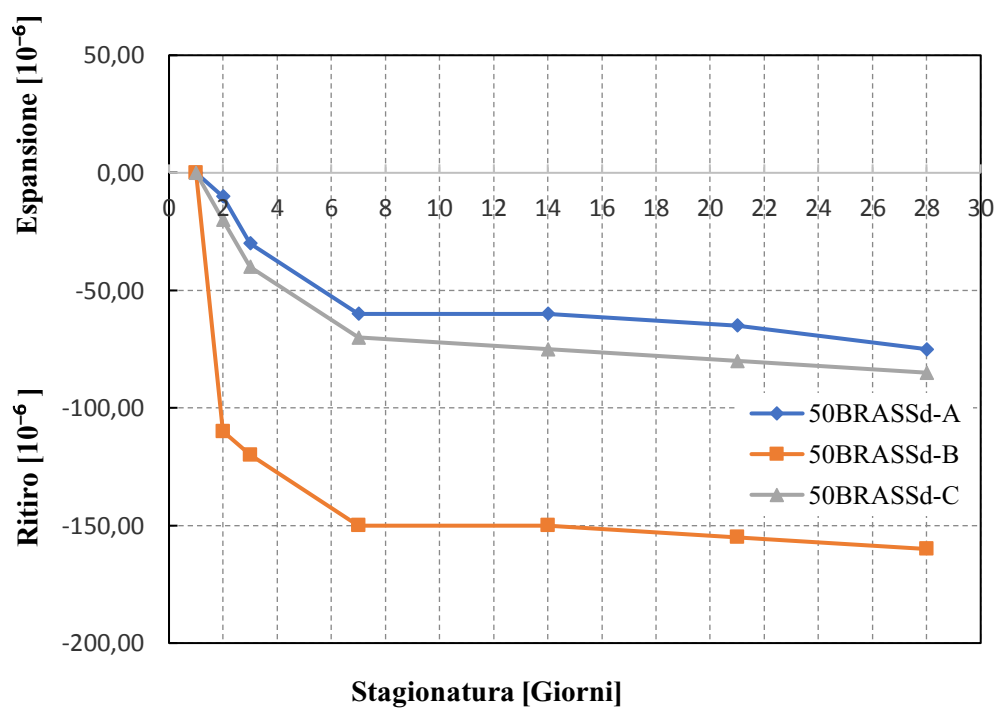


Figura 77- Curva deformazione nel tempo 50BRASSd UR=80%

Tabella 51- Risultati prova determinazione ritiro 100BRASSd UR=80%

Risultati prova determinazione ritiro a UR=80%		
Tempo	100BRASSd-A	100BRASSd-B
7h	0	0
1g	-70	-100
2g	-110	-110
3g	-125	-120
7gg	-150	-150
14gg	-165	-160
21 gg	-170	-160
28 gg	-110	-100

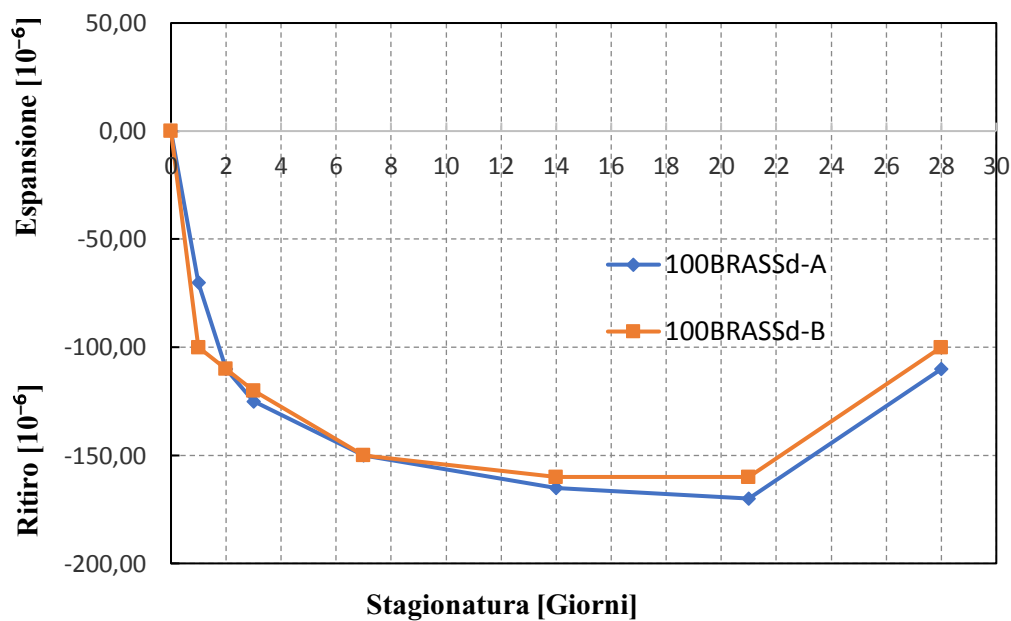


Figura 78-Curva deformazione nel tempo 100BRASSd UR=80%

Tabella 52- Risultati prova determinazione ritiro 150BRASSd UR=80%

Risultati prova determinazione ritiro a UR=80%			
Tempo	150BRASSd-A	150BRASSd-B	150BRASSd-C
7h	0	0	0
1g	-70	-50	-70
2g	-90	-65	-85
3g	-100	-75	-95
7gg	-115	-95	-115
14gg	-140	-115	-130
21 gg	-70	-75	-70
28 gg	-90	-80	-75

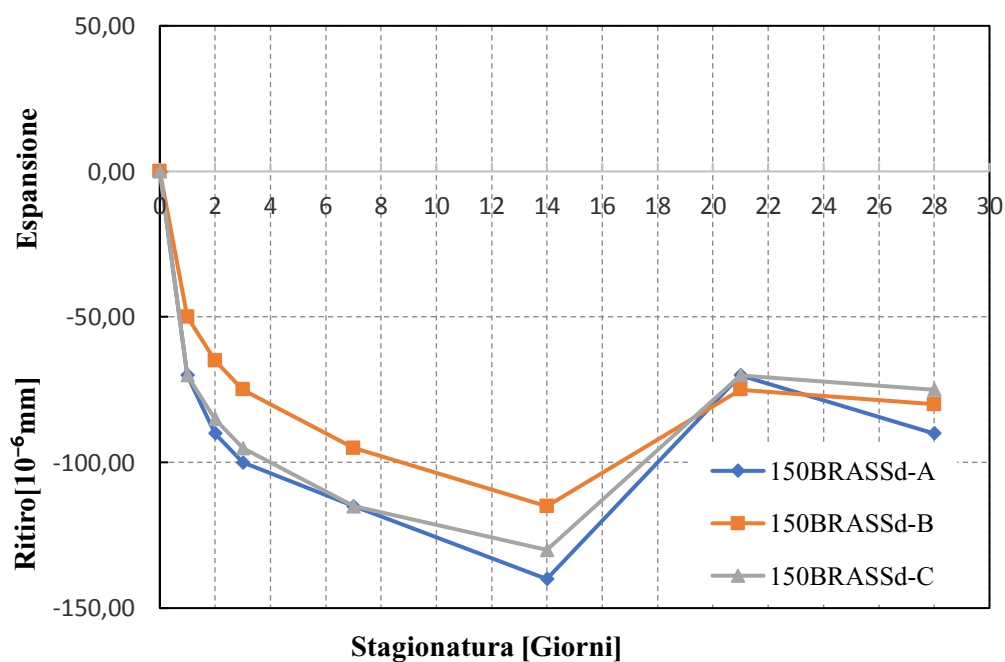


Figura 79- Curva deformazione nel tempo 150BRASSd UR=80%

Tabella 53- Risultati prova determinazione ritiro REFw UR>95%

Risultati prova determinazione ritiro a UR>95%		
Tempo	REFw-A	REFw-B
7h	0	0
1g	540	435
2g	510	400
3g	485	390
7gg	430	330
14gg	410	310
21 gg	410	290
28 gg	400	280

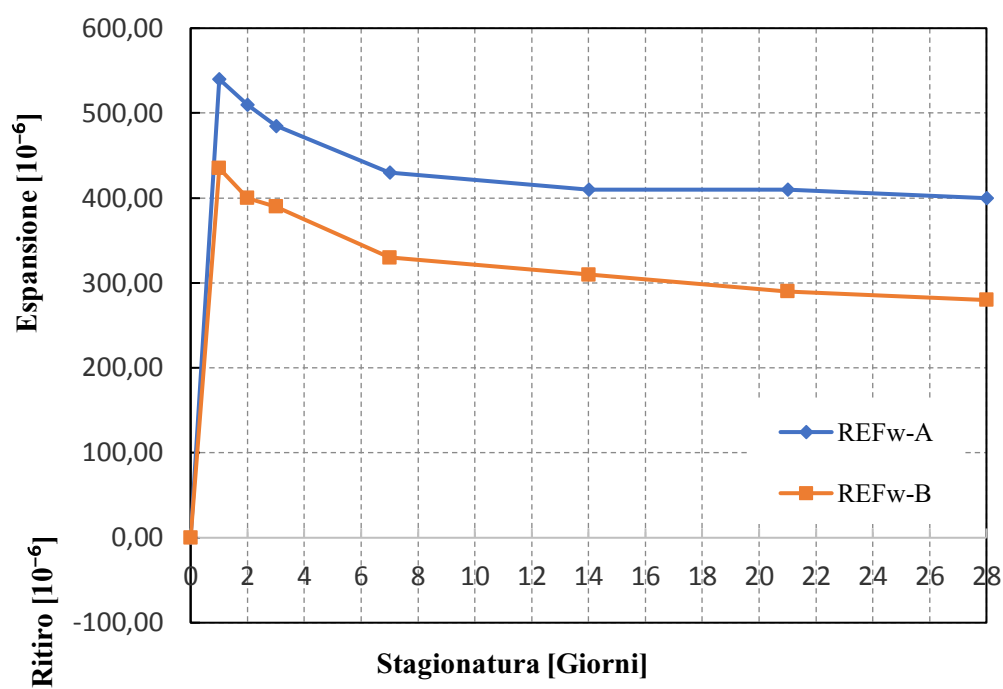


Figura 80- Curva deformazione nel tempo REFw UR>95%

Tabella 54-Risultati prova determinazione ritiro 50BRASSw UR>95%

Risultati prova determinazione ritiro a UR>95%			
Tempo	50BRASSw-A	50BRASSw -B	50BRASSw-C
7h	0	0	0
1g	70	-15	170
2g	-15	-40	10
3g	-10	-30	20
7gg	-80	-100	-50
14gg	-110	-120	-70
21gg	-110	-120	-80
28gg	-120	-130	-90

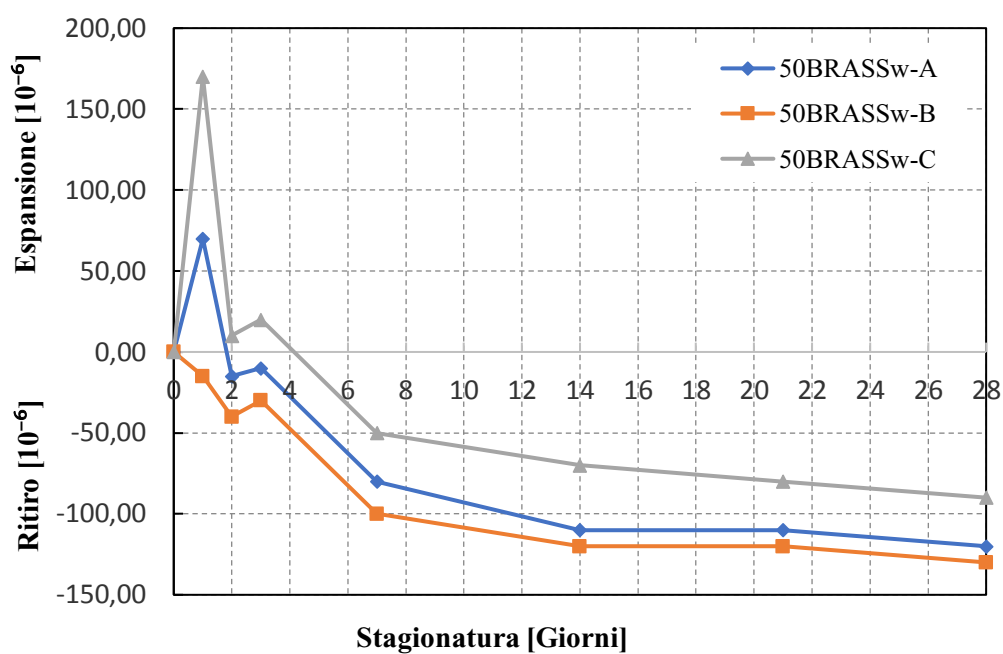


Figura 81- Curva deformazione nel tempo 50BRASSw UR>95%

Tabella 55-Risultati prova determinazione ritiro 100BRASSw UR>95%

Risultati prova determinazione ritiro a UR>95%			
Tempo	100BRASSw-A	100BRASSw-B	100BRASSw-C
7h	0	0	0
1g	320	355	355
2g	300	340	345
3g	310	350	350
7gg	245	280	280
14gg	220	260	265
21gg	220	250	260
28gg	200	240	240

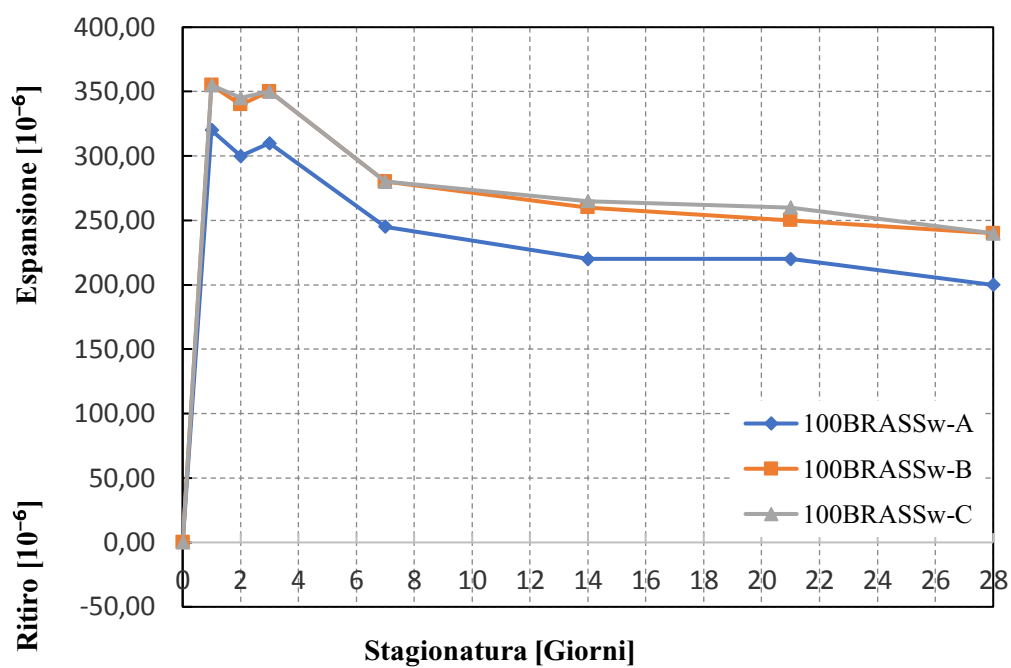


Figura 82-Curva deformazione nel tempo 100BRASSw UR>95%

Tabella 56- Risultati prova determinazione ritiro 150BRASSw UR>95%

Risultati prova determinazione ritiro a UR>95%			
Tempo	150BRASSw-A	150BRASSw-B	150BRASSw-C
7h	0	0	0
1g	1460	1970	1185
2g	1440	1970	1180
3g	1455	1980	1190
7gg	1375	1895	1105
14gg	1360	1880	1090
21gg	1360	1870	1080
28gg	1340	1860	1070

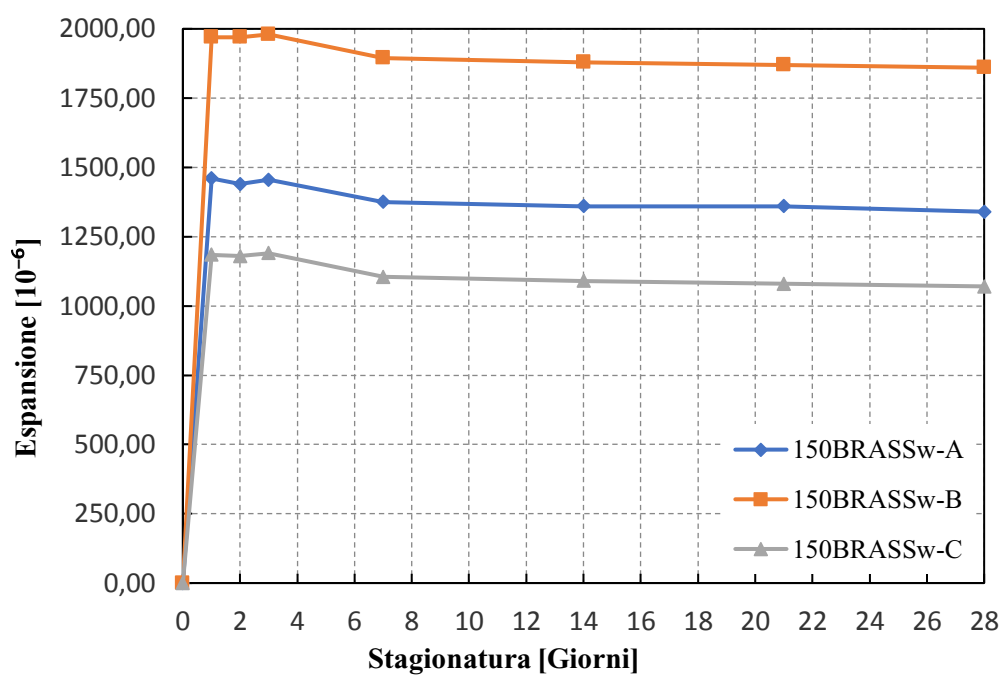


Figura 83- Curva deformazione nel tempo 150BRASSw UR>95%



Analizzando i risultati derivanti dalla prova di ritiro assiale, riscontriamo nei provini a stagionatura all'aria a UR=80%, un notevole ritiro autogeno; conseguenza della contrazione chimica che avviene quando l'acqua idrata le particelle di cemento. È insidioso perché avviene anche se si posiziona un telo impermeabile ma lo si può evitare nebulizzando il getto. All'aumentare del contenuto di fibre nella miscela il ritiro autogeno si attenua, causa dell'alto modulo di elasticità delle fibre che appunto impedisce il rigonfiamento anche in presenza di agente espansivo e di riduttore antiritiro.

Con stagionatura umida a UR>95% il riscontro è differente, infatti con un apporto di acqua esterna (nebulizzazione) non si verifica un ritiro autogeno, quindi i capillari che si generano nel processo di idratazione non essiccano e non si formano alte tensioni di trazione che fanno ritirare la pasta di cemento idratata (Figura 85). Nei provini privi di fibre (REFw) si riscontra un'espansione, il provino con un contenuto di fibre a  $50 \frac{kg}{m^3}$  mostra un leggero rigonfiamento ma un successivo ritiro causato dalla maggiore resistenza della matrice che impedisce l'espansione. Con quantitativi di fibre maggiori,  $100 \frac{kg}{m^3}$  e  $150 \frac{kg}{m^3}$  si attendeva una espansione nulla e un minor ritiro causa l'alto modulo di elasticità delle fibre, tuttavia si legge una espansione maggiore del provino che può essere causa della reazione tra zinco e acqua che libera idrogeno gassoso ( $Zn + H_2O \rightarrow ZnO + H_2$ ).

Tale considerazione si ripercuote dunque in termini di resistenza a compressione e flessione come precedentemente accennato.

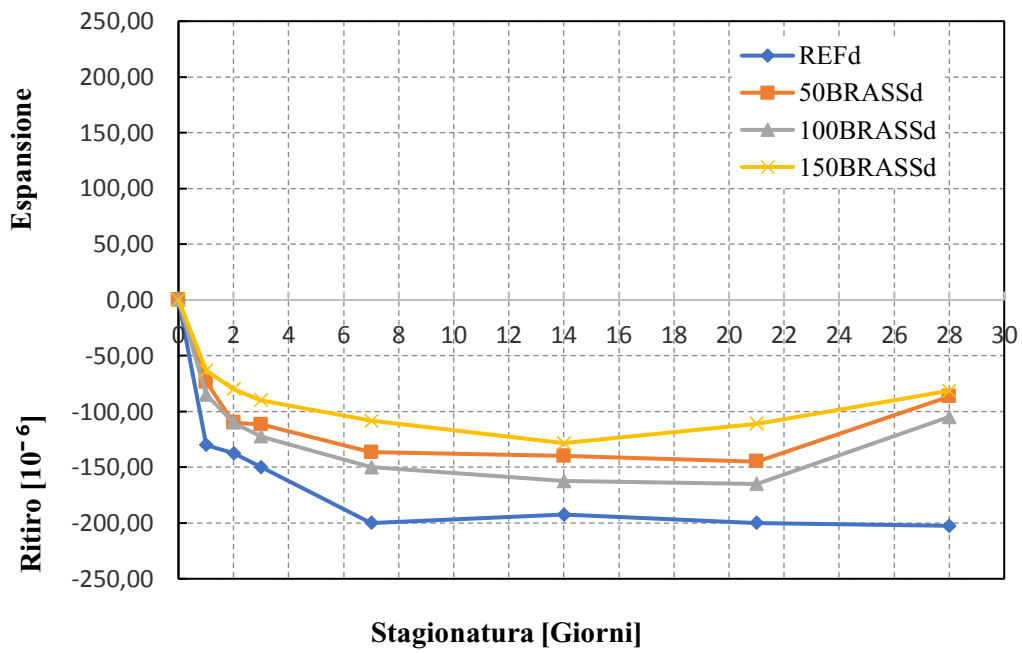


Figura 84- Curva deformazione nel tempo media provini UR=80%

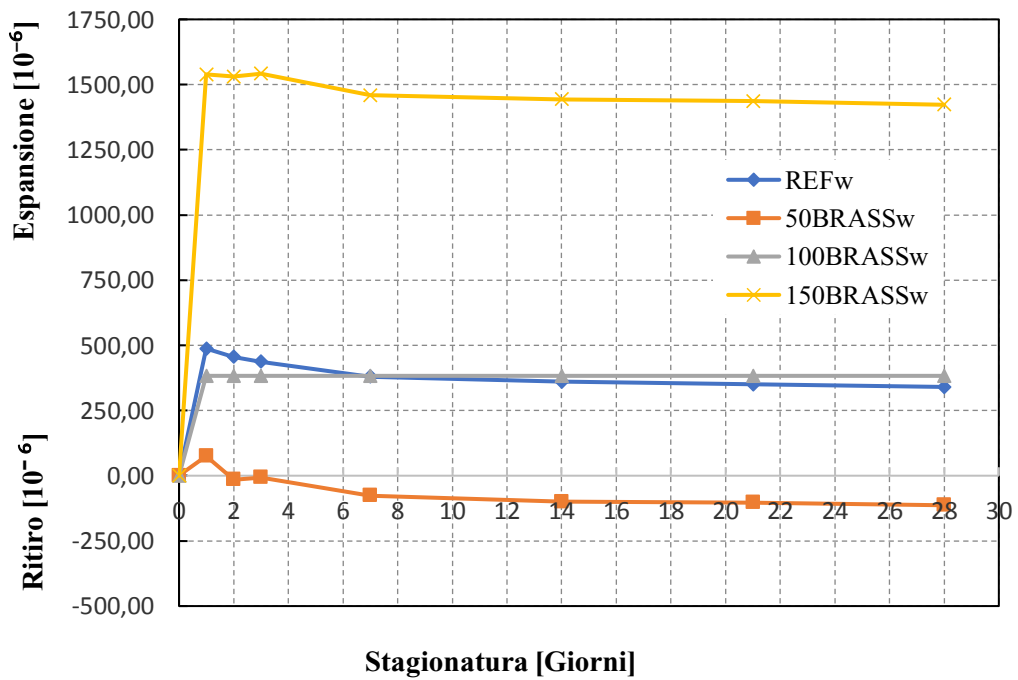


Figura 85-Curva deformazione nel tempo media provini UR>95%

## 6. Conclusioni

L'obiettivo di questo studio è stato quello di valutare il comportamento meccanico e deformativo di miscele Ultra High Performance Concrete all'inclusione di fibre in acciaio ottonate, a differenti stagionature. A tal proposito, sono stati effettuati diversi impasti con uguale composizione, uso combinato di agente espansivo ( $25 \frac{kg}{m^3}$ ) e additivo antiritiro ( $9 \frac{kg}{m^3}$ ), ma contenuti di fibre differenti. La fase di getto è stata eseguita in casseformi in materiale plastico leggero di dimensioni standard,  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . I primi quattro getti sono stati stagionati all'aria a UR=80% per valutare gli effetti del ritiro autogeno, gli altri quattro stagionati in acqua a UR>95% per annullare gli effetti di tale ritiro e aumentarne dunque le prestazioni meccaniche.

I risultati sperimentali calcolati a 3, 7 e 28 giorni, hanno evidenziato dal punto di vista meccanico un aumento della resistenza a flessione all'aumentare del quantitativo di fibre a stagionatura all'aria; comportamento simile si è riscontrato anche a compressione. Come previsto, inoltre, il ritiro autogeno è risultato notevole. La differente stagionatura, con corretta nebulizzazione dei getti, ha fornito dei risultati inattesi; infatti nello studio della resistenza a flessione i risultati sono stati pressoché sovrapponibili tra il getto di riferimento (privo di fibre) e quelli con diversi quantitativi di fibre, a 28 giorni. Stessa anomalia si riscontra nella resistenza a compressione, dove masse di fibre, inferiori al valore massimo utilizzato, hanno dimostrato migliori performance; tutto ciò ha permesso riflessioni importanti sull'imprevista espansione del materiale, giustificata dalla reazione dello zinco, presente nelle fibre, e acqua con liberazione di idrogeno gassoso. Il gas generatosi ha inciso negativamente sulle prestazioni meccaniche con decoesione del materiale a causa della formazione di vuoti nella miscela.

In conclusione, per evitare tale fenomeno, la soluzione potrebbe essere quella di usare quantitativi di fibre ottonate inferiori al massimo e più agente espansivo per contrastare sia il ritiro che migliorare le prestazioni, soprattutto in termini di flessione. Un'ulteriore soluzione potrebbe essere l'utilizzo di fibre in materiale

polimerico, in vetro, in carbonio, ecc...o con diversa forma geometrica, che ne aumenti il rapporto d'aspetto e quindi l'aderenza fra i due materiali.

## *Bibliografia*

- Adeline R., I. M. (1998). Design and behavior of the Sherbrooke Footbridge.
- AFGC. (2013). *Ultra-high performance fibre-reinforced concretes. Recommendations*. Paris.
- 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.
- CNR-DT 209/2013. (10 Ottobre 2013). *Istruzioni per l'impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni*. Roma.
- COIN Project report no 44. (2012). *Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) - State of the art*.
- 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)*.
- Doo-Yeol Yoo, N. B. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review.
- Fehling E., S. M. (2004). Ultra high performance concrete (UHPC). *Proceeding of international Symposium on UHPC*. Germany.
- Francesco Marotti de Sciarra, R. E. (2015). I calcestruzzi ad altissima resistenza: proprietà e comportamento meccanico.
- Jacques Respeldino, F. T. (2013). The UHPFRC revolution in structural design and construction.
- Kylyc A., T. A. (2008). The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. *Cement and Concrete Composites*.

- M.Colleparidi, V. S. (2015). Effect of expansive agents and shrinkage reducing admixtures on the performance of fiber-reinforced mortars.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, D. 1. (s.d.). *Norme Tecniche per le Costruzioni*.
- Naaman A.E., R. H. (2003). Setting the stage: toward performance classification of FRC composites.
- 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.
- Siddique R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: review of hardened properties.
- UNI 11039-1. (2003). Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio - Definizioni, classificazione e designazione.
- UNI 8520-1. (2015). Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 1: Designazione e criteri di conformità.
- UNI 8520-2. (2016). Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 2: Requisiti.
- UNI 8520-22. (2017). Aggregati per calcestruzzi - Parte 22: Metodologia di valutazione della potenziale reattività alcali-silice degli aggregati.
- 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.
- UNI EN 12620. (2013). Aggregati per calcestruzzo.
- UNI EN 197-1. (2011). Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni.

- V. Corinaldesi, A. N. (2014). Study of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Expansive and Shrinkage Reducing Agents.
- V. Corinaldesi, A. N. (2016). Influence of type of fibers on the properties of high performance cement-based composites.
- V. Corinaldesi, J. D. (2015). The influence of calcium oxide addition on properties of fiber reinforced cement-based composites.
- 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*.
- Wille K., K. D. (2011). Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Materials and Structures*.
- Yen Lei Voo, B. N. (2012). Application of ultra high performance fiber reinforced concrete - the malaysia perspective.
- Yoo D.Y., B. N. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*.