



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Studio del comportamento deformativo e meccanico di
miscele Ultra High Performance Concrete
Study of the strain and mechanical behaviour of Ultra High
Performance Concrete mixtures

Relatore:
Prof.ssa Ing. Valeria Corinaldesi

Tesi di Laurea di:
Daniele Ragni

Anno Accademico 2018-2019

Indice

Sommario.....	1
1. Introduzione	2
1.1 Aspetti generali calcestruzzo.....	2
1.2 Sviluppo UHPC.....	4
1.3 Aspetti positivi UHPC.....	6
1.4 Principali strutture realizzate con UHPC	7
1.5 Normative.....	9
2. Composizione UHPC	13
2.1 Cemento	14
2.2 Aggregati.....	15
2.3 Additivi	16
2.4 Fumi di silice.....	18
2.5 Fibre	18
3. Proprietà meccaniche e chimico-fisiche UHPC.....	22
3.1 Comportamento a compressione	22
3.2 Comportamento ideale a trazione degli UHPC	23
3.3 Durabilità UHPC	25
3.4 Deformazioni nel tempo dei calcestruzzi	26
3.4.1 Ritiro	26
3.4.2 Stagionatura	29
4. Programma sperimentale.....	32
4.1 Materiali utilizzati	32
4.2 Mix design.....	36
4.3 Fasi operative	38

4.4	Proprietà e nomenclatura provini	40
4.5	Metodi di prova	42
4.5.1	Prova a flessione	42
4.5.2	Prova a compressione	45
4.5.3	Prova determinazione ritiro assiale	46
5.	Analisi e discussione dei risultati di prova.....	47
5.1	Prova a flessione	47
5.2	Prova a compressione.....	68
5.3	Prova determinazione ritiro assiale	86
6.	Conclusioni	97

Sommario

Gli UHPC (Ultra High Performance Concrete) sono calcestruzzi ad altissime prestazioni che nascono 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. Tale materiale grazie alla sua migliorata composizione permette di ridurre drasticamente i costi di manutenzione delle strutture e di mitigare gli impatti ambientali propri di una struttura in calcestruzzo ordinario. Da un punto di vista tecnico la sigla UHPC fa riferimento ad un materiale di matrice cementizia con resistenze a compressione maggiori di 150 MPa contenente un determinato volume di fibre che permettono al materiale di migliorare il comportamento meccanico del composito non solo a compressione ma in parte anche a trazione, dando vita ad un materiale caratterizzato da una discreta duttilità ed una buona capacità plastica. La loro nascita è molto recente, fine anni '90, e proprio per questo viene classificato come materiale innovativo.

Il lavoro di tesi si presta ad esaminare il comportamento di UHPC da un punto di vista meccanico e deformativo valutando l'effetto di fibre ottonate su di essi. Sono stati realizzati a riguardo, 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, una serie di provini in calcestruzzo con differente quantitativo di fibre in acciaio rivestite di ottone e diversa stagionatura.

1. Introduzione

1.1 Aspetti generali calcestruzzo

Il conglomerato cementizio di ordinaria progettazione è formato da inerti, cemento, acqua ed eventuali additivi. La lavorabilità, l'omogeneità e la compattazione sono caratteristiche fondamentali di un conglomerato fresco. La distribuzione granulometrica degli inerti, il tipo di cemento, la consistenza dell'impasto e l'utilizzo degli additivi devono essere adeguati alla particolare distribuzione del getto e al procedimento di posa in opera del calcestruzzo.

Gli inerti, in generale, devono essere ghiaie e sabbie alluvionali estratti da letti di fiumi o da cave oppure pietrischi e sabbie provenienti dalla frantumazione di rocce. Devono essere puliti, non gelivi e non friabili e devono presentare quantitativi di sostanze limose, argillose ed organiche in proporzioni tali da non essere nocive all'indurimento del calcestruzzo e alla conservazione delle armature.

La sabbia deve provenire da roccia dura, silicea e non calcarea; è in ogni caso da escludere la presenza di silice amorfa che insieme agli alcali (sodio e potassio) potrebbe provocare la pericolosa reazione alcali-aggregati e, quindi, il verificarsi del fenomeno del "pop-out".

Per la ghiaia o pietrisco, invece, un'elevata durezza non solo non è necessaria ma, se molto più grande di quella del conglomerato, può provocare concentrazione di sforzi a discapito della resistenza del conglomerato.

Inoltre, la superficie dei grani deve essere possibilmente scabrosa per aumentare l'aderenza con la malta. Per garantire il miglior grado di compattazione occorre prevedere che i quantitativi delle singole pezzature siano dedotti da un mix design, cioè che la scelta sia basata sulle varie formule relative alle curve granulometriche ottime, tra le quali la più nota è quella di Fuller.

Le norme italiane suggeriscono un campo limite (fuso granulometrico) intorno alla curva di Fuller, entro il quale deve essere compresa la curva della miscela impiegata

che si ottiene mescolando in opportune proporzioni gli inerti forniti generalmente in due, tre o quattro pezzature ben distinte tra di loro.

Il legante idraulico è il cemento il cui quantitativo e il tipo devono essere tali da assicurare un'adeguata resistenza e, alla probabile microfessurazione. Il cemento verrà comunque accettato solo se provvisto del marchio che ne garantisce la qualità secondo le vigenti norme.

L'acqua dell'impasto deve essere limpida. Gli eventuali sali presenti (in particolare solfati e cloruri) non devono avere percentuali tali da risultare dannosi ed aggressivi. L'acqua più sicura è quella potabile: ove non si disponesse di questa è sempre prudente fare analizzare l'acqua che si intende usare e accertarne l'idoneità.

Vanno scartate le acque di rifiuto provenienti da industrie o fabbriche, perché residui oleosi e zuccherini sono dannosi per la presa e l'indurimento del conglomerato, così come l'acqua di mare, la quale può esercitare un'azione corrosiva sulle armature.

Occorre avere un quantitativo di acqua sufficiente per idratare il cemento, avvolgere totalmente la superficie degli inerti e garantire la lavorabilità. Il quantitativo di acqua deve essere il minimo compatibile con le esigenze del getto, in quanto, qualora la percentuale in eccesso rimanga nel getto, genererebbe un'elevata porosità nel cls rendendolo meno resistente. D'altro canto, un difetto di lavorabilità crea dei macro-vuoti nel getto e, quindi, un'ulteriore perdita di resistenza del calcestruzzo indurito. Comunque, è preferibile migliorare la lavorabilità con un energico mezzo di costipamento o con l'aggiunta di additivi anziché con l'aumento di acqua.

Inoltre, bisogna prestare particolare attenzione all'influenza che ha l'umidità sugli inerti, variabile a seconda delle condizioni atmosferiche, e al tipo di cassaforma.

L'additivo utilizzato è quello fluidificante. Questo additivo, a parità di rapporto acqua/cemento, aumenta la lavorabilità dell'impasto. In ogni caso l'additivo deve essere compatibile (non dannoso) con gli altri componenti dell'impasto.

Le fibre vengono aggiunte per migliorare il comportamento post fessurativo e non di certo per aumentare la tensione di prima fessurazione.

Definiti dunque i principali ingredienti di un calcestruzzo tradizionale se alle giuste quantità, note dalla letteratura, è possibile realizzare calcestruzzi ad altissime prestazioni noti con il nome di UHPC.

In letteratura non esiste una nomenclatura precisa per indicare i calcestruzzi ad alte prestazioni, tuttavia gli UHPC, sinonimo di UHPFRC, fanno riferimento all'ultima generazione di calcestruzzi ad altissime prestazioni aventi le suddette caratteristiche:

- resistenza a compressione maggiore di 150 MPa
- l'aggiunta sistematica di fibre metalliche al fine di garantire un comportamento non fragile alla miscela, aumentare la resistenza a trazione, a flessione e a taglio;
- resistenza a trazione diretta maggiore a 7-8 MPa;
- rapporto a/c inferiore di 0,25, tipicamente compreso tra 0,16 e 0,20 per garantire una porosità capillare prossima allo zero;
- elevata densità della miscela, ottenuta con alto contenuto di componenti finissimi;
- l'uso di additivi di ultima generazione per ridurre il rapporto a/c.

La sostanziale differenza con il calcestruzzo ordinario è in riferimento alla quantità di particelle fini che aumentano la densità della matrice cementizia, alla dimensione degli aggregati (fini), alla presenza di fibre, alla presenza di additivi superfluidificanti che rendono la matrice lavorabile.

1.2 Sviluppo UHPC

Il XX secolo è stato segnato dalla nascita ed ascesa del calcestruzzo armato quale principale materiale da costruzione per la realizzazione di nuove tipologie architettoniche e strutturali. Tale 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. Purtroppo, però, a più di cent'anni dalla sua invenzione, accanto ai vantaggi che tale materiale comporta, quali facilità di

esecuzione e versatilità di utilizzo, si riscontrano diversi svantaggi sia dal punto di vista prestazionale, delle durabilità, della sostenibilità ambientale, che spesso fanno preferire al suo utilizzo quello dell'acciaio.

Al fine di limitare tali problemi, a partire dagli anni '70 lo sviluppo di nuovi additivi e aggiunte minerali, accanto allo studio attento dei processi di stagionatura e del mix-design, hanno permesso di trasformare il calcestruzzo in un materiale "high-tech" in grado di esprimere prestazioni sempre più avanzate e diversificate. In tale periodo si assiste alla nascita dei cosiddetti calcestruzzi DSP (Densified with Small Particles). Il primo contributo originale allo sviluppo dei materiali DSP è dovuto a Baach, che nel 1981 ha pubblicato gli straordinari risultati che si possono conseguire con l'uso combinato di superfluidificanti e particelle ultra-fini come il fumo di silice. La notevole riduzione di acqua consentita dall'impiego dei superfluidificanti ed il contemporaneo riempimento dei vuoti interstiziali fra i granuli di cemento ad opera delle particelle di fumo di silice rendono la matrice cementizia così densa da consentirle di superare le prestazioni meccaniche dei comuni aggregati lapidei impiegati nei calcestruzzi ordinari. Tuttavia, anche il calcestruzzo DSP presenta alcuni limiti prestazionali nel comportamento deformativo dovuti per lo più alla natura estremamente fragile del materiale. In aggiunta, queste nuove tipologie di materiali presentano anche una scarsa resistenza al fuoco dato che l'impermeabilità della matrice cementizia impedisce al vapore acqueo, che si forma nel calcestruzzo ad alta temperatura, di fuoriuscire finché non provoca l'espulsione (spalling) delle parti corticali del calcestruzzo.

Per ovviare a tali limiti di comportamento dei materiali DSP, all'inizio degli anni '90 si è assistito alla nascita e allo sviluppo dei cosiddetti RPC (Reactive Powder Concrete): al materiale DSP vengono aggiunte fibre d'acciaio, che aumentano la duttilità contribuendo alla riduzione dei fenomeni di rottura, o fibre polimeriche che consentono di mitigare il fenomeno dello spalling durante gli incendi. Sulla scia degli studi effettuati soprattutto in ambito francese, negli anni sono state sviluppate e brevettate varie tipologie di RPC, che si configurano per loro natura come veri e

propri materiali compositi contraddistinti con svariate sigle: HSC, HPC, FRC, UHPC, UHPFRC.

1.3 Aspetti positivi UHPC

Il calcestruzzo ad altissime prestazioni UHPC 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 notevolmente aumentata rispetto ad un calcestruzzo ordinario appartenente alla stessa classe di resistenza (in fase di calcolo il contributo del calcestruzzo nella zona tesa non è più trascurabile né allo stato limite di esercizio né allo stato limite ultimo).

Comportamento post-fessurativo incedente 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).

'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, ceneri volanti e loppa, rifiuti solidi recuperati da processi industriali, riduce il consumo energetico e le emissioni legate alla produzione di clinker.

Riduzione della sezione degli elementi strutturali (grazie alle ultraprestazioni) e quindi alleggerimento complessivo della struttura con risparmi ingenti specialmente in fase di trasporto ed assemblaggio. La competitività economica

legata agli spessori inferiori può essere rafforzata anche passando da materiali premiscelati e confezionati in sacchi, e quindi con un costo di trasporto inferiore. Tale approccio, oltre ad aumentare la competitività, può aiutare anche la diffusione e l'impiego più capillare di tale tecnologia.

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

1.4 Principali strutture realizzate con UHPC

Nel campo dell'ingegneria civile questi materiali hanno avuto il loro primo impiego dagli anni '90 a questa parte. Il loro uso ha permesso di risolvere le questioni precedentemente elencate tant'è che il primo utilizzo è stato necessario per le problematiche relative ai cicli gelo-disgelo, acqua di condensa, sostanze chimiche pericolose che interessavano il ponte pedonale di Sherbrooke in Canada (Fig.1). Tale passerella pedonale è stata realizzata nel 1997 con un calcestruzzo dalla resistenza a compressione di 200 MPa, successivamente tra il 2001 ed il 2006 un viadotto ferroviario realizzato in Cina il Qinghai – Tibet Railway Bridge (Fig.2), a circa 5000 m s.l.m., con un calcestruzzo avente resistenza a compressione pari a 150 MPa.

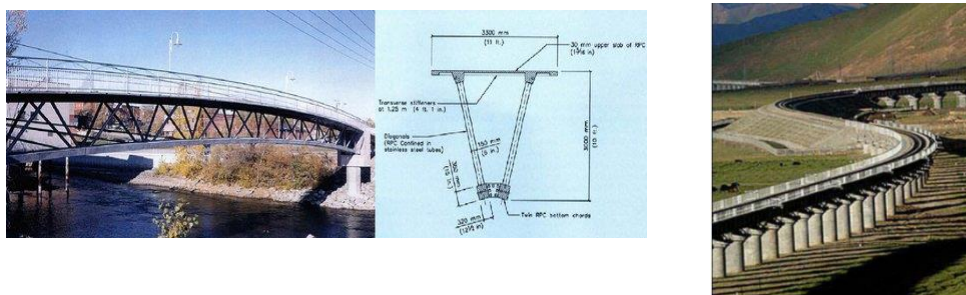


Fig.1 Ponte pedonale di Sherbrooke, Fig.2 Qinghai – Tibet Railway Bridge

A seguito di questa prima realizzazione sono stati condotti diversi studi, ad opera principalmente delle industrie francesi Bouygues e Lafarge, riguardo le differenti sezioni possibili da utilizzare nella realizzazione di ponti pedonali e ciclabili. I risultati di tali ricerche hanno condotto alla realizzazione della sezione a Pi, utilizzata per la prima volta nel *Peace Footbridge* costruito a Seoul, Corea del Sud nel 2002.

Ne ritroviamo l'uso anche per ponti stradali e ferroviari, citando ad esempio il *Wapello County Bridge* (Fig. 3) nell'Iowa realizzato nel 2006 dopo quattro anni di studi.



Fig. 3 - *Wapello County Bridge (Iowa, USA)*

Trattasi di un ponte a campata unica di 33,50 m che utilizza tre travi prefabbricate a doppio T, con cavi precompressi e senza armatura di rinforzo passivo.

Negli anni più recenti, calcestruzzi ad elevate prestazioni sono stati applicati in piastre di ancoraggio prefabbricate per la stabilizzazione attiva di pendii di Prisco et al., 2010, solette da ponte, elementi di copertura in parete sottile, pilastri con acciaio ad alta resistenza (Fig.4).



Fig.4 *Casino d'Erba (CO), Italia, (2008) Graticci e piastre di ancoraggio*

Oltre ad applicazioni di tipo strutturale, grazie al fatto che tramite tale materiale è altamente resistente, modellabile e con la possibilità di avere sezioni ridotte, si è andati incontro alla creazione di opere non strutturali con geometrie estetiche precedentemente impossibili da realizzare.

1.5 Normative

Nel DM 17/01/2018 al paragrafo 11.2.12 viene definito, in qualità di materiale da costruzione, il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC): *“ Il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) è caratterizzato dalla presenza di fibre discontinue nella matrice cementizia; tali fibre possono essere realizzate in acciaio o materiale polimerico, e devono essere marcate CE in accordo alle norme europee armonizzate, quali la UNI EN 14889-1 ed UNI EN 14889-2 per le fibre realizzate in acciaio o materiale polimerico. La miscela del calcestruzzo fibrorinforzato deve essere sottoposta a valutazione preliminare secondo le indicazioni riportate nel precedente § 11.2.3 con determinazione dei valori di resistenza a trazione residua f_{R1k} per lo Stato limite di esercizio e f_{R3k} per lo Stato limite Ultimo determinati secondo UNI EN 14651:2007. Per la qualificazione del calcestruzzo fibrorinforzato e la progettazione delle strutture in FRC si dovrà fare esclusivo riferimento a specifiche disposizioni emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. ”*

A tale decreto la Circolare n.7 del 21/01/2019 *“Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”* aggiunge al paragrafo C11.2.12 ulteriori novità : *“ Le NTC definiscono il calcestruzzo FRC come “caratterizzato dalla presenza di fibre discontinue nella matrice cementizia” e stabiliscono che sia per la sua qualificazione che per la progettazione delle strutture in FRC, si dovrà fare esclusivo riferimento a specifiche disposizioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, rese attraverso apposite Linee Guida. Al riguardo occorre precisare che secondo le dizioni comunemente adottate nel settore della tecnologia delle costruzioni, un calcestruzzo fibrorinforzato ad uso*

strutturale, per essere definito tale, deve essere caratterizzato da un dosaggio minimo delle fibre al suo interno. Le norme CNR-DT 204/2006 “Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato”, indicano che “per impieghi strutturali deve essere garantito un dosaggio minimo di fibre” e quantificano tale dosaggio come “non inferiore allo 0.3% in volume”. Pertanto, a meno di specifiche indicazioni eventualmente riportate nelle sopracitate Linee Guida, per quantitativi inferiori a tale dosaggio, allo stato un calcestruzzo che preveda l’utilizzo di fibre non può essere definito, ai fini strutturali, come “fibrorinforzato” e quindi il suo impiego, non vincolato dalle procedure autorizzative di cui al citato p.to 11.2.12, può fare riferimento alle prescrizioni per il calcestruzzo normale, contenute nei pertinenti Capitoli delle NTC. Ne consegue, in termini pratici, che la presenza di un quantitativo di fibre al di sotto della soglia sopra indicata, può essere considerata nei normali calcestruzzi quale semplice ausilio per il miglioramento del comportamento del calcestruzzo in particolari situazioni, quali ad esempio le fasi di scassero, con lo scopo di tenere sotto controllo microfessurazioni e di minimizzare l’effetto di cavillature in punti sensibili del manufatto, quali spigoli e zone d’angolo, non facilmente raggiungibili dall’armatura ordinaria. Naturalmente, l’impiego delle fibre comporta comunque l’obbligo del rispetto della vigente normativa del settore, ed in presenza di norme armonizzate il possesso della marcatura CE. Inoltre, in sintonia con quanto previsto dal p.to 11.2.3 delle NTC, occorre che anche tali calcestruzzi non definibili strutturalmente quali fibrorinforzati, siano oggetto di prove preliminari di studio, non solo al fine di ottenere le prestazioni richieste dal progetto, ma anche, data comunque la specificità del materiale impiegato, di verificare la piena compatibilità delle fibre con il particolare utilizzo previsto. A tale fine, si ritiene anche necessaria l’implementazione di un sistema permanente di controllo della produzione opportunamente calibrato, attraverso un processo industrializzato dotato di idonei impianti, nonché di strutture e tecniche opportunamente organizzate, al fine di assicurare il mantenimento di un adeguato livello di affidabilità nella produzione del calcestruzzo e nella conformità del prodotto finito.’’

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

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

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

Tabella 1 - Parametri da riportare sulla confezione delle fibre

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 (Fig.5).

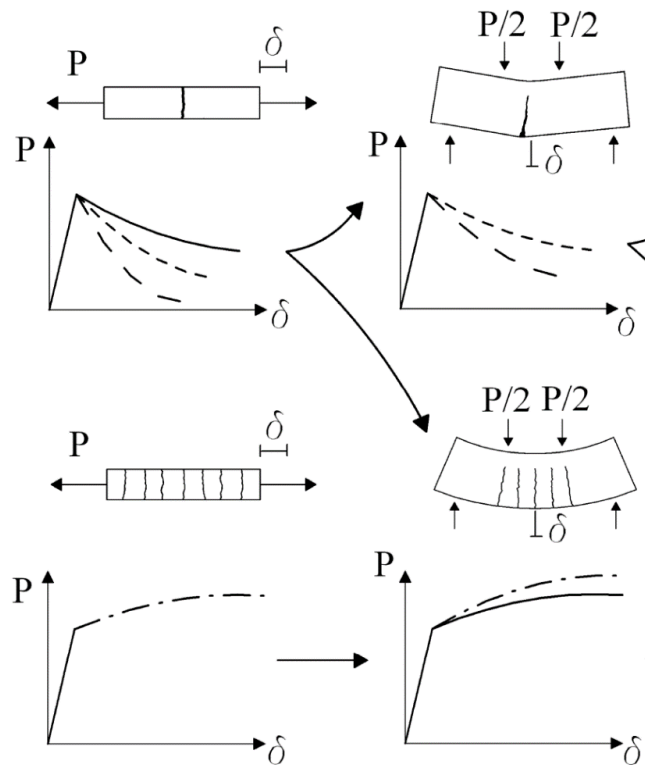


Fig.5 - Risposta meccanica di strutture caratterizzate da capacità redistributive differenti: trazione uniassiale e flessione

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

2. Composizione UHPC

Come definito nel CNR-DT 209/2013, conformemente alla UNI EN 206-1 (2006), i materiali costituenti i calcestruzzi ad alte prestazioni, per quanto riguarda i basilari, possono essere gli stessi di quelli usati per il confezionamento del calcestruzzo ordinario. Rispetto ai calcestruzzi tradizionali, per ottenere prestazioni uniformi e costanti negli HPC, occorrono maggiori cure nella scelta, nella caratterizzazione e nel continuo monitoraggio delle proprietà dei componenti utilizzati. Ciò per consentire una maggiore efficacia nella progettazione della miscela di calcestruzzo.

Generalmente la miscela di un calcestruzzo UHPC è costituita da cemento, aggregati, acqua, additivi, aggiunte minerali, fibre. Tra le caratteristiche principali che differenziano un calcestruzzo ad alte prestazioni rispetto ad uno tradizionale si individuano: un contenuto di cemento elevato, un rapporto a/c bassissimo, fibre metalliche, uso di additivi superfluidificanti per ottenere un grado di lavorabilità accettabile, utilizzo dei fumi di silice che grazie al loro ridotto diametro riescono a occupare i vuoti della matrice cementizia densificando la miscela.

Il progetto della miscela, come affermato nel CNR-DT 209/2013, ha lo scopo di individuare i corretti rapporti quantitativi tra i componenti, idonei al raggiungimento delle prestazioni fisico-meccaniche e reologiche definite dal progettista. L'attività di progettazione della miscela consiste poi nella continua ottimizzazione nel tempo della miscela stessa, in funzione delle fisiologiche variazioni delle proprietà dei componenti e delle condizioni operative. Vengono di seguito riportati i costituenti di un calcestruzzo UHPC individuandone le principali caratteristiche tecniche per soddisfare pienamente i requisiti prestazionali.

2.1 Cemento

Il legante cementizio occorre sia idoneo all'ottenimento delle caratteristiche di resistenza a compressione relative ai calcestruzzi ad alte prestazioni, viene richiesto dunque l'uso di cementi ad alta resistenza meccanica. In riferimento a quanto riportato nel CNR-DT 209/2013, la normativa europea distingue tre classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici (Tabella 2), tratta dalla UNI EN 197-1 (2011), aggiornamento della norma UNI EN 197-1 (2006).

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

Tabella 2 - Classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici

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

I cementi più idonei sono certamente quelli aventi una classe di resistenza a compressione in malta plastica di 52,5 MPa. La scelta della corretta classe del cemento da impiegare nelle ricette deve essere considerata in funzioni di particolari specifiche o condizioni di getto, quali, ad esempio, la sezione dell'elemento strutturale, la tipologia di getto, mezzi di posa che saranno utilizzati. Insieme a tali esigenze che condizionano la scelta del legante e del mix design dei calcestruzzi ad alte prestazioni, si deve necessariamente ricordare che l'aumento del contenuto di

cemento per il raggiungimento di bassi rapporti acqua/cemento, comporta un innalzamento della temperatura del calcestruzzo dovuto alla reazione di idratazione, esotermica, tra il cemento e l'acqua. L'aumento della temperatura del conglomerato cementizio, se non considerato nel momento dello studio della miscela, può provocare fenomeni di fessurazione di origine termica, compromettendo l'omogeneità e la monolicità del getto, con gravi ripercussioni sulla durabilità dei manufatti e con costosi interventi di riparazione.

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

2.2 Aggregati

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

È stato dimostrato (Kylyc et al., 2008) come varie tipologie di aggregato influenzino diversamente le caratteristiche meccaniche di un calcestruzzo ad altissime prestazioni. In particolare, confrontando più varietà di rocce (gabbro, basalto, quarzite, calcare, arenaria), si è visto che la resistenza a compressione del

calcestruzzo cresce con il crescere di quella delle rocce e che gli aggregati con un alto valore di resistenza all'abrasione producono un calcestruzzo con alta resistenza all'abrasione. Dai test effettuati, la migliore resistenza a compressione è stata ottenuta per calcestruzzi realizzati con basalto, dato che la rottura avviene sia nella matrice cementizia sia nella roccia. I calcestruzzi realizzati con calcare ed arenaria presentano invece una resistenza equivalente a quella delle rocce per cui la rottura avviene nell'aggregato e non viene utilizzata al massimo la resistenza della pasta. Caso a parte per il calcestruzzo realizzato con la quarzite: data la superficie levigata, non vi è perfetta aderenza tra pasta ed aggregato e quindi la resistenza complessiva risulta essere inferiore sia alla resistenza dell'aggregato sia a quella della pasta.

Il comportamento degli UHPC è funzione anche di altri parametri connessi alla natura degli aggregati presenti nella miscela: l'utilizzo combinato di aggregati di taglia differente migliora notevolmente le prestazioni di un UHPC rispetto all'uso di un solo componente (Park et al., 2008). Una delle combinazioni ottimali vede la presenza di 70% di polvere di quarzo dal diametro di 0,30-0,50 mm abbinata a 30% di sabbia dalle dimensioni di 0,17-0,30 mm. Accanto all'uso di sabbie si è affiancato l'uso di polveri finissime (con dimensioni dei grani dell'ordine dei 13 μm) che fungono al pari dei SF (fumo di silice) nel ruolo di filler e allo stesso tempo non hanno reazioni chimiche con il cemento. I diametri ridotti degli aggregati permettono non solo una posa in opera più agevole, ma anche il raggiungimento di una ottima omogeneità del calcestruzzo all'interno dei getti, evitando eventuali fenomeni di "blocking" nei punti più critici nelle sezioni dell'elemento strutturale, dove l'attraversamento del conglomerato tra i ferri d'armatura potrebbe portare ad una segregazione del calcestruzzo.

2.3 Additivi

È stato già detto che per lo sviluppo degli UHPC e più in generale degli RPC hanno giocato un ruolo determinante, dagli anni Settanta in poi, la nascita e l'utilizzo dei

fluidificanti e superfluidificanti. Questi sono additivi in grado di mantenere basso il rapporto a/c ed alta la lavorabilità del composto senza intaccare la composizione granulometrica della miscela. Il loro impiego è stato necessario a seguito dell'aggiunta dei fumi di silice all'interno della miscela che vanno ad aumentare la richiesta d'acqua a causa delle dimensioni finissime e dell'elevata area superficiale. I superfluidificanti sono polimeri idrosolubili, per lo più poli-naftalen-solfonati, poli-melammin-solfonati, poli-carbossilati o poli-acrilici. Il loro principale effetto è quello deflocculante nei confronti dei granuli di cemento dispersi nel mezzo acquoso. I superfluidificanti migliorano la dispersione delle particelle solide attraverso due diversi fenomeni: per repulsione elettrostatica o per allontanamento grazie alla presenza di rami laterali della molecola che costituiscono una sorta di ingombro sterico nella matrice cementizia come evidenziato in (Fig.6). I vantaggi di un corretto uso dell'additivo superfluidificante comprendono anche alcuni importanti 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.

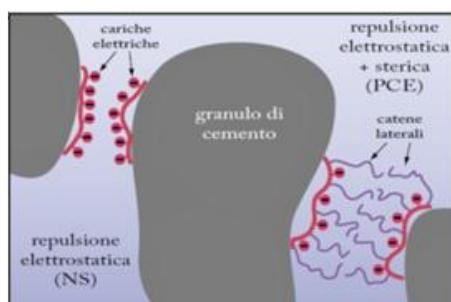


Fig.6 - Repulsione elettrostatica e sterica

2.4 Fumi di silice

Molti dei vantaggi degli UHPC sono dovuti alla presenza nella matrice cementizia dei fumi di silice (Silica Fume, SF) conformi alla norma UNI EN 13263-1 (2009) e UNI EN 13263-2 (2009). Il fumo di silice si presenta come silice amorfa in forma di microsferi più piccole di $0,1 \mu\text{m}$. Il ruolo che svolge nella matrice cementizia può essere sintetizzato secondo tre processi di tipo fisico-chimico (Siddique, 2011):

- riduzione della dimensione dei pori e densificazione della matrice: le 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 del fumo di silice, ad esso corrisponde anche un'elevatissima area superficiale che tende a richiedere un aumento dell'acqua di impasto che è necessario compensare con un maggiore dosaggio di additivi superfluidificanti.

2.5 Fibre

I calcestruzzi fibrorinforzati sono calcestruzzi additivati con fibre corte di acciaio, di materiale inorganico quale carbonio o vetro, o di materiali di altra natura (polipropilene, grafite, kevlar, ecc.). Le fibre che hanno trovato il maggior impiego nella composizione degli FRC (Fiber Reinforced Concrete) in generale e di UHPC in particolare sono quelle d'acciaio. Tali fibre hanno una lunghezza l_f , generalmente compresa tra i 6 mm e 70mm ed un diametro equivalente, d_f , compreso tra 0,1 mm

e 1,20 mm. La resistenza a trazione raggiunge normalmente i 2400 MPa e talvolta supera i 3000 Mpa. Le fibre sono di solito schiacciate o deformate all'estremità presentando o un uncino o una piccola testa atta a migliorare il legame tra fibre e matrice cementizia (Figura 9).

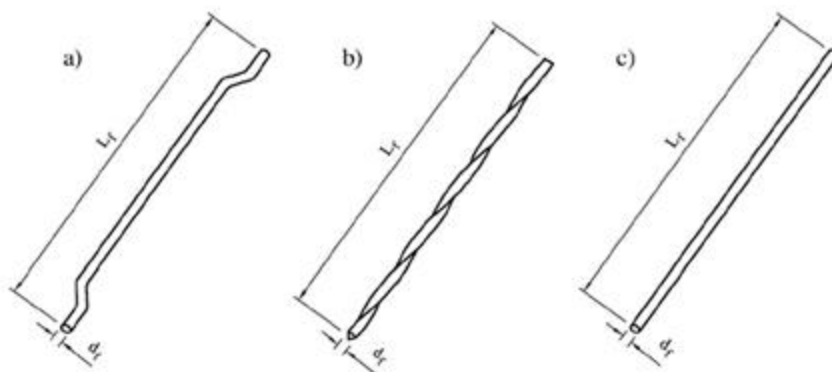


Figura 9 - Principali tipologie di fibre d'acciaio: a) Fibra d'acciaio uncinata; b) Fibra d'acciaio ondulata; c) Fibra d'acciaio dritta e liscia

L'aggiunta di fibre disperse in una matrice cementizia ne modifica le proprietà meccaniche, contrastando l'apertura progressiva delle fessure e conferendo al prodotto, dopo la fessurazione, una significativa resistenza residua a trazione fino al raggiungimento di uno sforzo nullo a trazione per un valore significativo dell'apertura di fessura. L'energia specifica necessaria per rompere a trazione il conglomerato (tenacità) dipende da molteplici fattori tra i quali, ad esempio, il rapporto d'aspetto della fibra, la percentuale di volume delle fibre rispetto al volume totale del composito e le caratteristiche fisico-meccaniche delle fibre in aggiunta alle caratteristiche della matrice cementizia. Come già detto, quando si forma una fessura nel materiale, le fibre che la attraversano normalmente non si spezzano, anzi continuano a resistere ulteriormente anche al progredire dell'apertura grazie al fenomeno di bridging. L'efficacia di questo fenomeno va ad influenzare i vari modi di rottura del materiale. In particolar modo se le fibre si rompono o si estraggono (pull-out) durante la fase iniziale della formazione della prima fessura, o se dopo il suo sviluppo le fibre non riescono più a trasferire lo sforzo, allora la resistenza di prima fessurazione corrisponde alla resistenza ultima. Il composito è in grado di

sopportare solo un carico minore di quello che ha provocato la fessurazione del materiale (Fig.9a); questo comportamento è indicato con il termine “softening” o comportamento degradante. Se, diversamente, le fibre sono in grado di sopportare ulteriore carico dopo la formazione della prima fessura allora si assisterà ad una microfessurazione diffusa del composito. Questo fenomeno conferisce al materiale un comportamento “hardening”, ovvero incrudente (Fig.9b), con conseguente aumento dell’energia assorbita e, quindi, della duttilità.

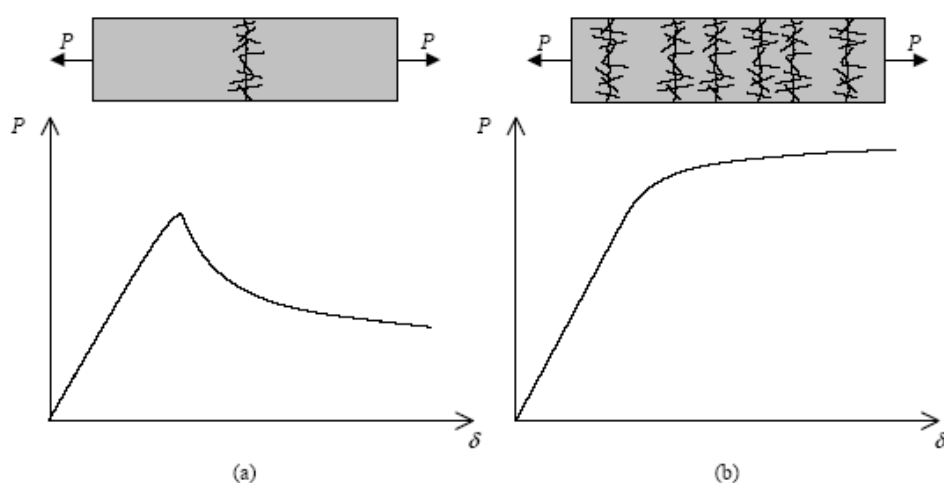


Fig.9 – Comportamento “softening” (a) e “hardening”(b)

Dopo il raggiungimento della prima fessurazione, se il volume è basso, le fibre non sono in grado di portare la tensione che prima gravava sulla matrice (comportamento degradante). Se il volume è elevato queste fibre sono in grado di portare la stessa tensione che portava la matrice, si ha un aumento del carico e poi con il progredire del carico la fessura si allarga, la fibra si sfilava e si ha una diminuzione di carico. Dunque, si vuole che un materiale cementizio fibroso abbia un comportamento hardening, come quello della Figura 9b, è necessario che il volume di fibre disperso nella matrice superi un “volume critico” che rappresenta quindi quel volume di fibre che, dopo la fessurazione della matrice, può sopportare tutto il carico che precedentemente gravava sul composito.

Altri parametri importanti in termini di efficacia del rinforzo fibroso sono il dosaggio e il rapporto d'aspetto.

Le varie norme prescrivono i seguenti dosaggi minimi:

- istruzioni CNR-DT 204: percentuale volumetrica minima di fibre pari al 0,3%.
- UNI 11039: dosaggio minimo di fibre di acciaio pari a 25 kg/m³ (0,32% in volume).

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

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

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

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.

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

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

3. Proprietà meccaniche e chimico-fisiche UHPC

3.1 Comportamento a compressione

Come riporta il CNR 209/2013, il legame sforzo deformazione (Fig.10) dei calcestruzzi UHPC 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 post-picco è sempre meno pronunciato, fino ad annullarsi per resistenza molto alte.

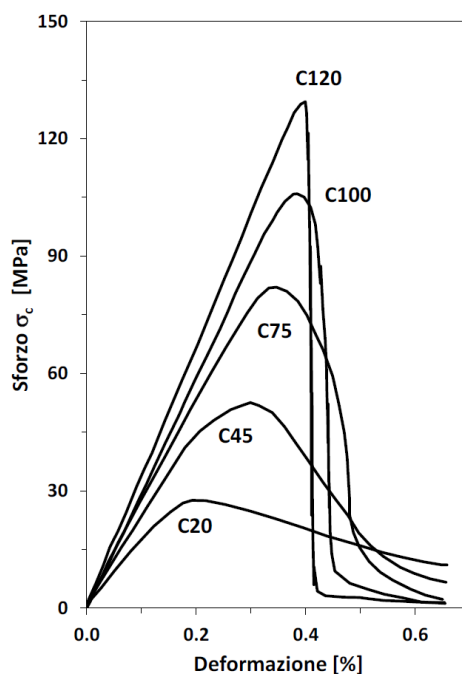


Fig.10 - Legame sforzo deformazione in compressione uniassiale per diverse classi di calcestruzzo

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 che a sua volta si traduce in un importante ramo postpicco.

L'aggiunta di fibre non modifica sostanzialmente il ramo ascendente ma, aumentando la duttilità del materiale e riducendo quindi 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 ideale a trazione degli UHPC

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

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

In Fig.11 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, σ_{pc} , è maggiore dello sforzo di prima fessurazione σ_{cc} .

L'approccio ideale (Fig.11) distingue il comportamento a trazione in tre differenti rami:

- Parte 1: ramo elastico, esteso dall'origine fino al valore σ_{cc} , definito come un punto fittizio che divide il comportamento elastico lineare iniziale dal comportamento plastico successivo.
- Parte 2: “ramo di hardening” che si estende dal valore σ_{cc} fino al valore di resistenza a trazione σ_{pc} . Tale tratto è caratterizzato dall'aumento dello sforzo σ all'aumentare della deformazione ε .
- Parte 3: “ramo di softening” avente andamento discendente fino all'annullarsi dello sforzo σ .

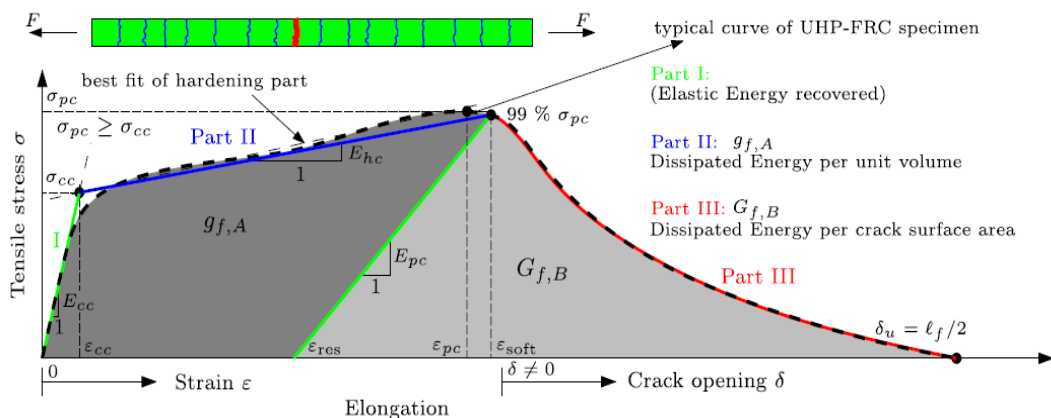


Fig.11 - Comportamento ideale, incurvato positivo di un UHPC sottoposto a carico di trazione (Wille and Naaman 2013)

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 uni-assiale è fortemente influenzato dall'orientamento e dalla quantità di fibre contenute dalla matrice: più le fibre sono ortogonali alla direzione di propagazione della fessura, maggiore è la duttilità e la capacità portante ultima del materiale.

3.3 Durabilità UHPC

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 Deformazioni nel tempo dei calcestruzzi

3.4.1 Ritiro

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

Il ritiro consiste dunque in una variazione volumetrica del materiale dove l'acqua cominciando ad evaporare determina un vuoto all'interno del poro e per effetto della tensione capillare interna il poro tenderà a contrarsi. Il problema è che il materiale si fessura in seguito a tale fenomeno, ad esempio se una trave vincolata

da due pilastri sia soggetta a contrazione la presenza del vincolo fa sì che tale azione di contrazione si trasformi in una tensione di trazione.

Ogni poro dunque subirà una piccola contrazione e quindi a livello macroscopico si legge una deformazione significativa $S = \frac{\Delta L}{l_0}$ dove ΔL =accorciamento dovuto all'essiccazione, l_0 =lunghezza iniziale (Fig.12)

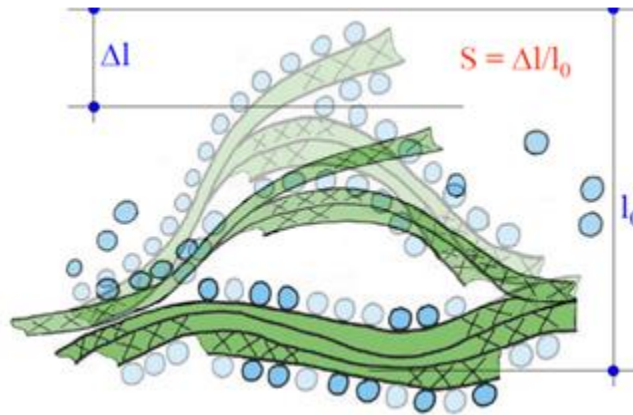


Fig.12 Risultato finale essiccazione

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 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.

3.4.2 Stagionatura

La stagionatura di un calcestruzzo fa riferimento a tutti gli accorgimenti protettivi ai quali deve essere sottoposto un calcestruzzo per far sì che venga assicurata una corretta idratazione del cemento. È fondamentale perché una corretta maturazione permette di raggiungere le prestazioni prefissate dal progettista in termini di caratteristiche meccaniche, durabilità e riduzione di deformazioni nel tempo.

Esistono una serie di metodi low cost che permettono di ritardare la rimozione delle casseforme coprendo il getto con teli di plastica o nebulizzando il getto. Le soluzioni più costose fanno riferimento all'utilizzo di sostanze che formano membrane impermeabili, additivi stagionanti o la stagionatura a vapore (in prefabbricazione).

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 $1 \text{ kg/m}^2/\text{h}$

Ovviamente in termini di stagionatura si hanno delle differenze tra calcestruzzo ordinario e UHPC. Il primo a causa di cattiva stagionatura è soggetto ad un rapido ritiro igrometrico, il secondo se non viene subito stagionato in acqua, è soggetto a ritiro plastico che però può essere evitato tramite membrane per la stagionatura, in seguito però sviluppa un notevole ritiro autogeno, difficile da limitare, dovuto per lo più alla rapidità con cui avviene l'idratazione.

La migliore soluzione per la stagionatura di un calcestruzzo ad alte prestazioni avviene mediante nebulizzazione e tale stagionatura ad acqua può essere interrotta ad avvenuta idratazione del cemento (7 giorni). Una soluzione per prevenire il problema potrebbe essere l'uso di aggregati grossi.

4. Programma sperimentale

In seguito all'attività sperimentale sono state condotte una serie di prove di caratterizzazione meccanica e di valutazione delle deformazioni differite nel tempo in termini di ritiro 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.

Le prove di caratterizzazione meccanica, previste dalla norma UNI EN 1015-11, sono state svolte su provini di materiale UHPC realizzati con diversi dosaggi di fibre in acciaio rivestite di ottone; sugli stessi provini sono stati effettuati studi sull'andamento di deformazioni da ritiro nel tempo. Nel dettaglio si è valutato come il tipo di stagionatura, rispettivamente all'aria (UR=80%) e in ambiente umido (UR>95%), condizioni i risultati di prova. Per la prima sono stati valutati gli effetti del ritiro autogeno e i relativi parametri meccanici, per la seconda come la nebulizzazione del getto abbia influenzato le prestazioni meccaniche prefissate e di conseguenza diminuito il ritiro autogeno.

4.1 Materiali utilizzati

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 3.

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%

Tabella 1 - Composizione CEM I 52,5 R



Fig.13 - CEM I 52,5 R (COLAME S.p.A.)

- Gli additivi utilizzati (Fig.14) 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.



Fig.14 - Additivo superfluidificante e antischiuma (DRACO Italiana S.p.A.)

- Gli aggregati utilizzati sono di due tipologie: Sabbia 0/1 Po (Fig.15 a) 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 (Fig.15 b) al 70%; la curva granulometrica ottimale è riportata in (Fig.15 c)



Fig.15 a - Sabbia 0/1 Po

Fig.15 b Sabbia BC00

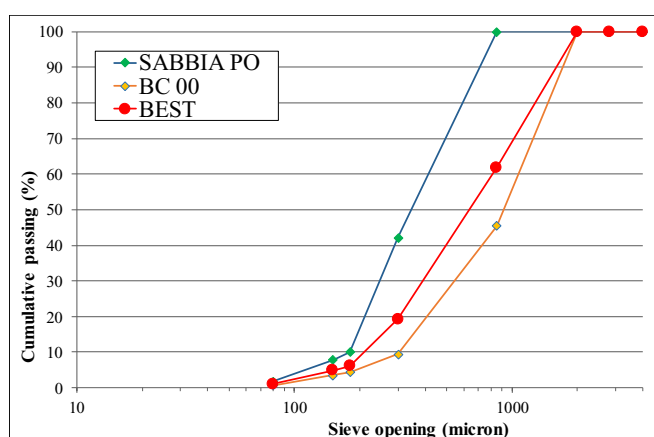


Fig.15 c Curva granulometrica

- Il Fumo di silice utilizzato (Fig.16), 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 m²/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.



Fig.16 - Fumo di silice

- Agente espansivo CaO (Fig.17) e additivo antiritiro (SRA, shrinkage reducing admixture, Fig.18) 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.



Fig.17 – Agente espansivo



Fig.18 – Additivo antiritiro

- Le fibre utilizzate sono fibre in acciaio rivestite di ottone dritte di lunghezza $l=12$ mm e diametro $\Phi=0,3$ mm (Fig.19)



Fig.19 – Fibra in acciaio rivestita di ottone

4.2 Mix design

Mix-design è letteralmente “progetto della miscela”, più precisamente è il “calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste (lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc.) e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili”. Non esiste un codice di calcolo esatto per ottenere la

miscela ottimale, dunque il mix-design si basa per lo più su correlazioni sperimentali. Nel dettaglio, sono stati realizzati 8 diversi impasti per le prove meccaniche, aventi stessa composizione ma diverso dosaggio di fibre (50BRASS, 100BRASS, 150BRASS) con diverso tipo di stagionatura, precisamente i primi 4 sono stati stagionati all'aria (UR=80%) e gli ultimi 4 sono stati stagionati in ambiente umido (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 distinguere le due stagionature si usano per la prima d=dry (asciutto), per la seconda w=wet (bagnato). Si riportano in Tabella 4 le caratteristiche dei provini stagionati all'aria e Tabella 5 le caratteristiche dei provini stagionati in acqua (le miscele sono pressoché identiche ma all'aumentare delle fibre per non perdere la giusta lavorabilità si è aggiunta acqua e superfluidificante nelle quantità di seguito riportate).

Materiali	REFd	50BRASSd	100BRASSd	150BRASSd
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	240	235	225	225
Superfluidificante	9	9	10	10
Antibolle	3	3	3	3
SRA (antiritiro)	9	9	9	9
Fibre	0	50	100	150
Fibre in Vol.%	0	0,64	1,28	1,92

Tabella 4 - Proporzioni componenti UHPC (Kg/m³) stagionati in ambiente UR=80%

Materiali	REFw	50BRASSw	100BRASSw	150BRASSw
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 (anti-ritiro)	9	9	9	9
Fibre	0	50	100	150
Fibre in Vol.%	0	0,64	1,28	1,92

Tabella 5 - Proporzioni componenti UHPC stagionati in ambiente UR>95% (Kg/m³)

4.3 Fasi operative

I provini sono stati realizzati secondo la seguente procedura:

- Pesate dei componenti in base alle proporzioni indicate in Tabella 4 e Tabella 5.
- Inserimento dei materiali in una miscelatrice da 5l e miscelazione fino al raggiungimento di un impasto uniforme e 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”.



Fig.20 - Pesatura componenti calcestruzzo e Miscelazione impasto

- Getto all'interno degli appositi casseri precedentemente rivestiti con disarmane per facilitare la successiva scasseratura dei provini (Fig.21).



Fig.21 Getto della miscela negli appositi casseri

- Copertura dei provini con uno strato di pellicola impermeabile in modo tale da limitare il fenomeno di essudazione dell'acqua.
- 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 4 getti, maturazione in ambiente UR>95% per 4 getti; 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%. (Fig.21, Fig.22)



Fig.21 Stagionatura provini UR=80% e UR=50%



Fig.22 – Stagionatura provini UR>95%

4.4 Proprietà e nomenclatura provini

Per ognuno dei 8 impasti riportati in Tabella 4 e Tabella 5, come spiegato precedentemente, sono stati realizzati 12 provini. Ciascun provino ha dimensioni 4x4x16 cm³ indicati con le lettere A, B, C testati sia a compressione che flessione

su tre punti. Per maggiore chiarezza si riporta la forma e la geometria delle tre tipologie di provini realizzati (Fig.23). Per distinguere le due stagionature sono state utilizzate le lettere d=dry (asciutto) e w=wet (bagnato) rispettivamente in Tabella 6 e Tabella 7.

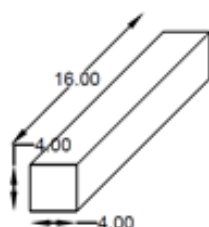


Fig.23 Schematizzazione provini

Denominazione	Dimensione (cm³)
REFd-A	4x4x16 cm ³
REFd-B	4x4x16 cm ³
REFd-C	4x4x16 cm ³
50BRASSd-A	4x4x16 cm ³
50BRASSd-B	4x4x16 cm ³
50BRASSd-C	4x4x16 cm ³
100BRASSd-A	4x4x16 cm ³
100BRASSd-B	4x4x16 cm ³
100BRASSd-C	4x4x16 cm ³
1500BRASSd-A	4x4x16 cm ³
150BRASSd-B	4x4x16 cm ³
150BRASSd-C	4x4x16 cm ³

Tabella 6- Denominazione provini stagionatura UR=80%

Denominazione	Dimensione (cm³)
REFw-A	4x4x16 cm ³
REFw-B	4x4x16 cm ³
REFw-C	4x4x16 cm ³
50BRASSw-A	4x4x16 cm ³
50BRASSw-B	4x4x16 cm ³
50BRASSw-C	4x4x16 cm ³
100BRASSw-A	4x4x16 cm ³
100BRASSw-B	4x4x16 cm ³
100BRASSw-C	4x4x16 cm ³
1500BRASSw-A	4x4x16 cm ³
150BRASSw-B	4x4x16 cm ³
150BRASSw-C	4x4x16 cm ³

Tabella 7- Denominazione provini stagionatura UR>95%

4.5 Metodi di prova

In questo capitolo sono spiegate le prove meccaniche e le deformazioni nel tempo in termini di ritiro eseguite sui i provini precedentemente descritti.

4.5.1 Prova a flessione

I provini 4x4x16 cm³, in accordo alla norma UNI EN 1015-11 sono stati sottoposti a prova di flessione su tre punti 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), (Fig.23).



Fig.23 Pressa idraulica

La prova per la determinazione della resistenza a flessione consiste nel sottoporre il provino, appoggiato alle due estremità e disposto longitudinalmente, ad un carico concentrato applicato al centro della faccia superiore del provino stesso e nel calcolare la forza necessaria per portarlo a rottura (Fig.24).



Fig.24 Prova a flessione provini 4x4x16 cm³

Si riportano a titolo di esempio i risultati della prova a flessione per provini UHPC rispettivamente senza fibre (Fig.25 a) e con fibre (Fig.25 b) notando appunto per i primi la differenza tra una rottura fragile e per i secondi una duttile (effetto bridging).

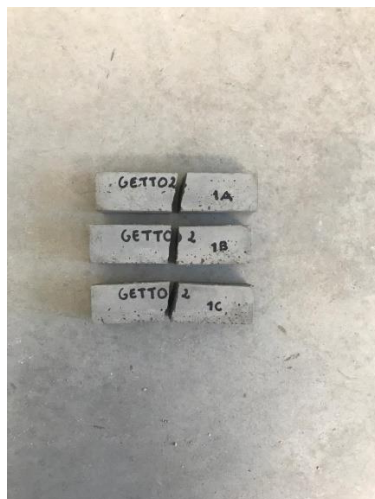


Fig.25 a Prova a flessione provini senza fibre 4x4x16 cm³



Fig.25 b Prova a flessione provini con fibre 4x4x16 cm³

4.5.2 Prova a compressione

I provini 4x4x16 cm³ in accordo alla norma UNI EN 1015-11 sono stati sottoposti ad 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).

La prova è stata effettuata sottoponendo a compressione le estremità sinistra e destra dei provini precedentemente sottoposti a flessione; in figura è mostrata la differenza tra una rottura del provino senza fibre, in alto, e di quello con fibre notando su quest'ultima che le fibre contrastano la propagazione della fessura.



Fig.26 - Prova a compressione provini 4x4x16 cm³

4.5.3 Prova determinazione ritiro assiale

I provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ in accordo alla norma UNI 6687:1973 sono stati sottoposti ad una prova di determinazione del ritiro. La variazione di lunghezza è espressa in micrometri e riferita al metro di lunghezza. La prova è stata eseguita registrando dapprima una misura di riferimento con l'asticella, successivamente è stato posizionato il provino all'interno, registrato il valore e per differenza si è calcolato il ritiro (Fig.26).



Fig.26 - Prova determinazione ritiro assiale $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$

5. Analisi e discussione dei risultati di prova

Di seguito sono riportati e commentati i risultati ottenuti mediante le prove di laboratorio per prova a flessione, prova a compressione, prova determinazione ritiro assiale per i provini stagionati ad UR=80% e UR>95%. Non avendo a disposizione i risultati a 28 giorni per provini stagionati in ambiente umido il confronto tra le stagionature è stato fatto a breve termine (precisamente a 7 giorni) in quanto ritenuto periodo già sufficiente per paragonare i risultati.

5.1 Prova a flessione

La resistenza a flessione è stata valutata sui provini prismatici di dimensioni 4x4x16 cm³, secondo le indicazioni della normativa UNI EN 1015-11 (*Metodi di prova per malte per opere murarie-Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita*).

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, portati a rottura applicando il carico su tre punti (Figura 41).

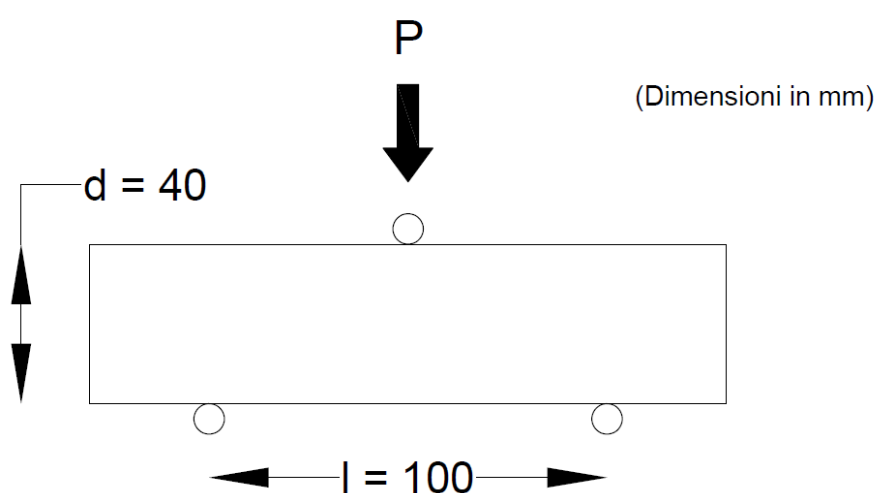


Fig.41 Schema di carico della prova a flessione

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 cm³. La relazione F - s è presentata nella forma di un diagramma x-y con lo spostamento sull'asse delle ascisse x e la forza su quello delle ordinate y.

Ogni grafico è 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.

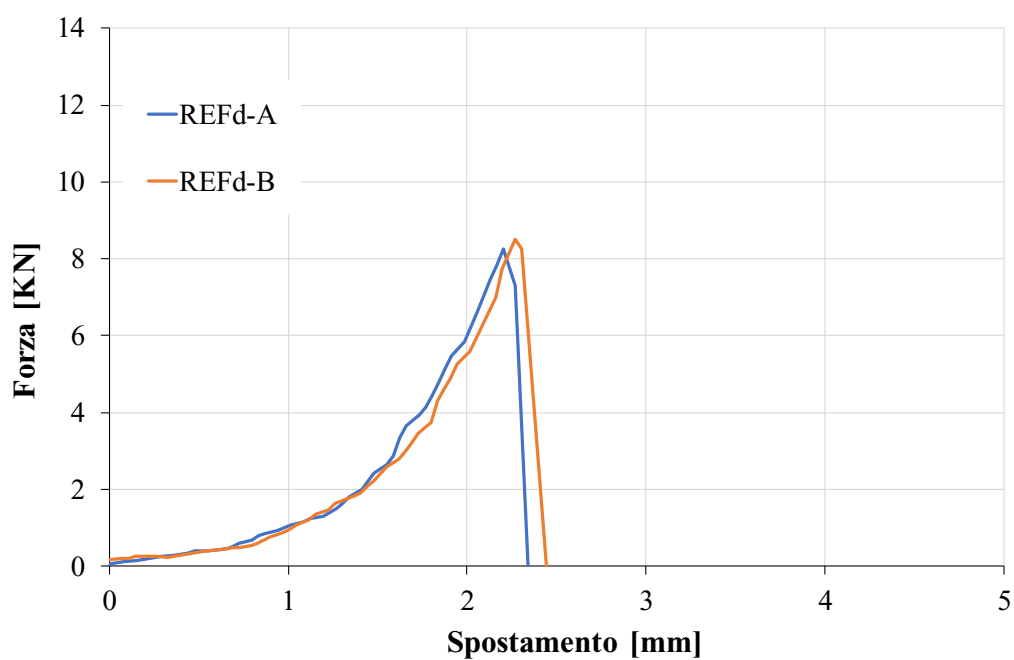


Fig.28 Curva Forza-Spostamento a flessione REFd 7 giorni

Risultati prova a flessione REFd 7 giorni			
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

Tabella 8 Risultati prova a flessione REFd 7 giorni

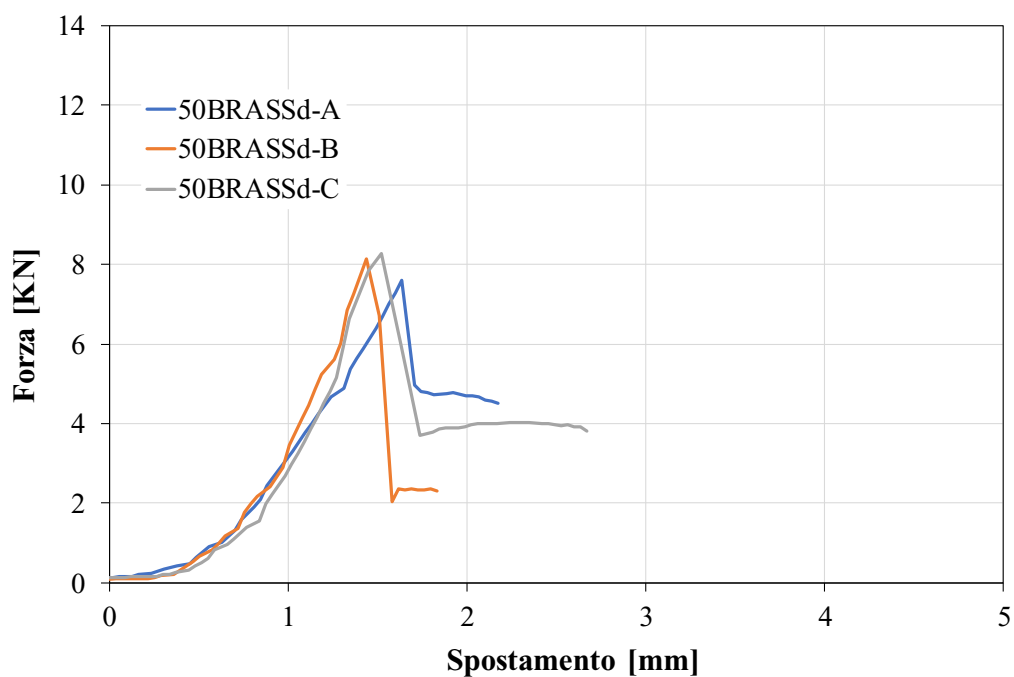


Fig.29 Curva Forza-Spostamento a flessione 50BRASSd 7 giorni

Risultati prova a flessione 50BRASSd-7 giorni			
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

Tabella 9 Risultati prova a flessione 50BRASSd 7 giorni

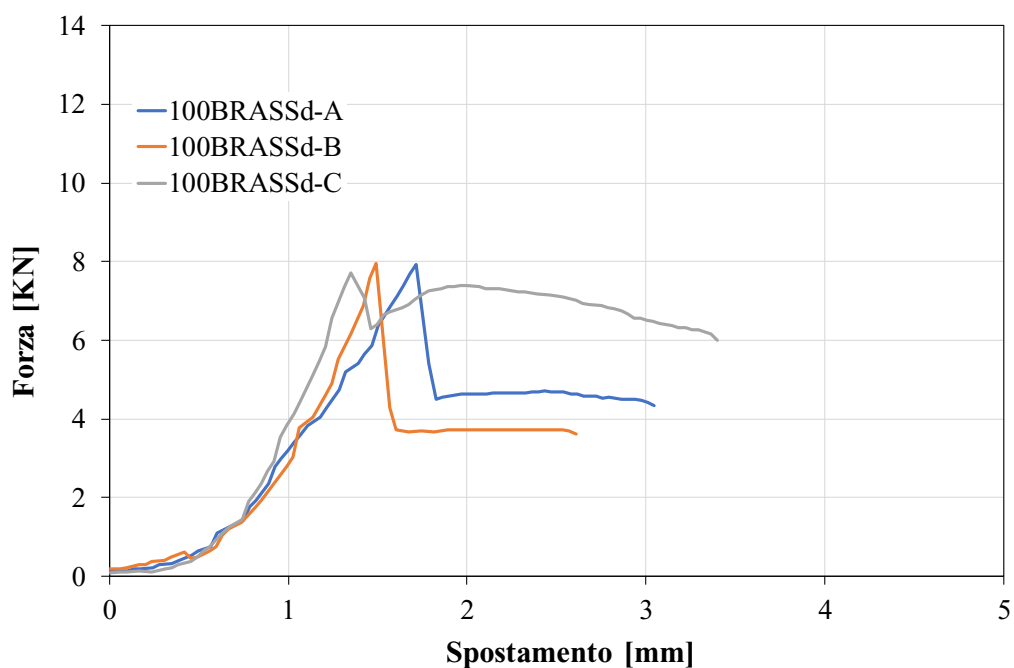


Fig.30 Curva Forza-Spostamento a flessione 100BRASSd 7 giorni

Risultati prova a flessione 100BRASSd 7 giorni			
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

Tabella 10 Risultati prova a flessione 100BRASSd 7 giorni

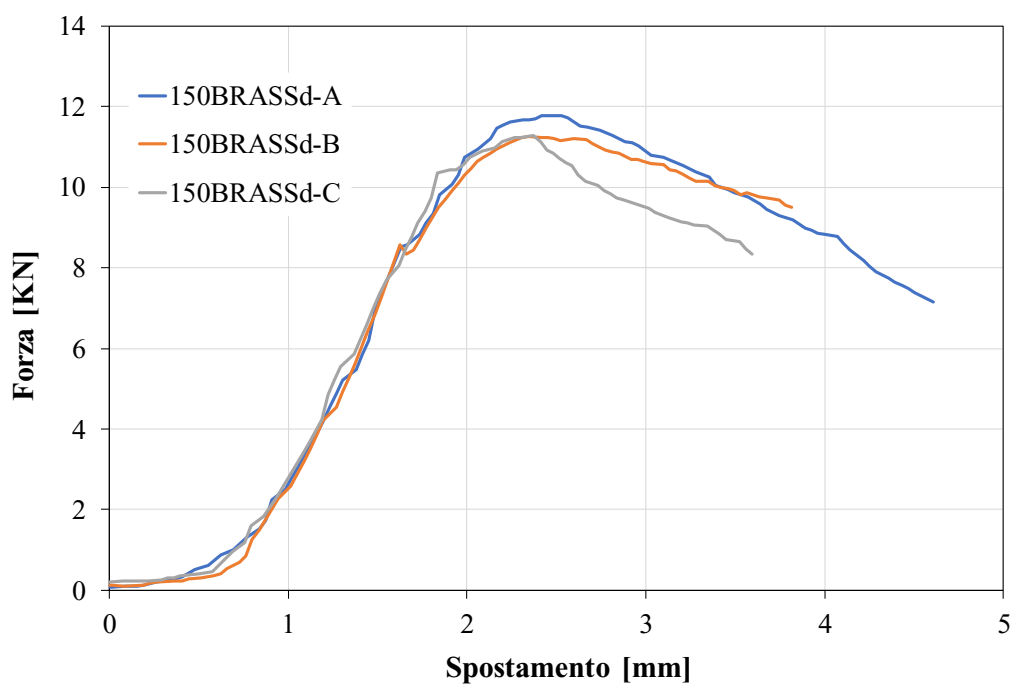


Fig.31 Curva Forza-Spostamento a flessione 150BRASSd 7 giorni

Risultati prova a flessione 150BRASSd 7 giorni			
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

Tabella 11 Risultati prova a flessione 150BRASSd 7 giorni

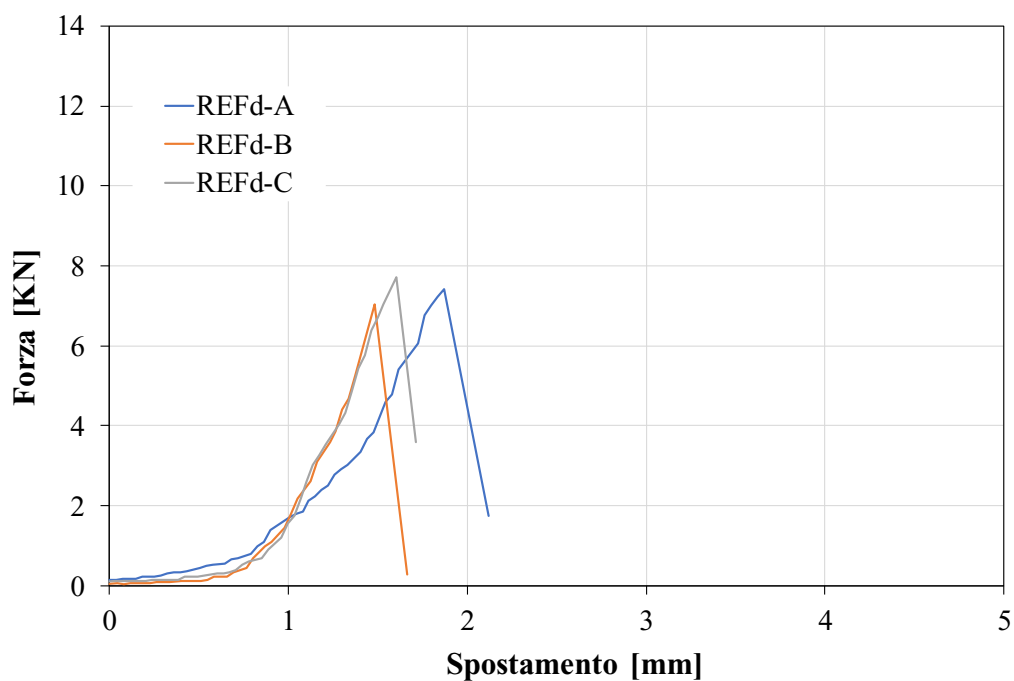


Fig.32 Curva Forza-Spostamento a flessione REFd 28 giorni

Risultati prova a flessione REFd 28 giorni			
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

Tabella 12 Risultati prova a flessione REFd 28 giorni

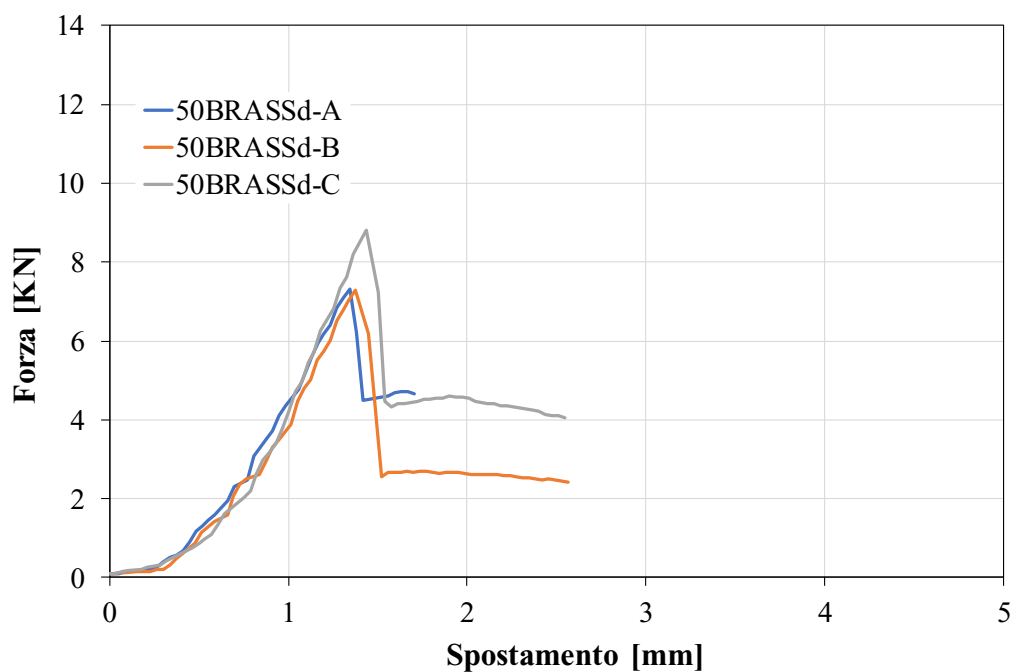


Fig.33 Curva Forza-Spostamento a flessione 50BRASSd 28 giorni

Risultati prova a flessione 50BRASSd 28 giorni			
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

Tabella 13 Risultati prova a flessione 50BRASSd 28 giorni

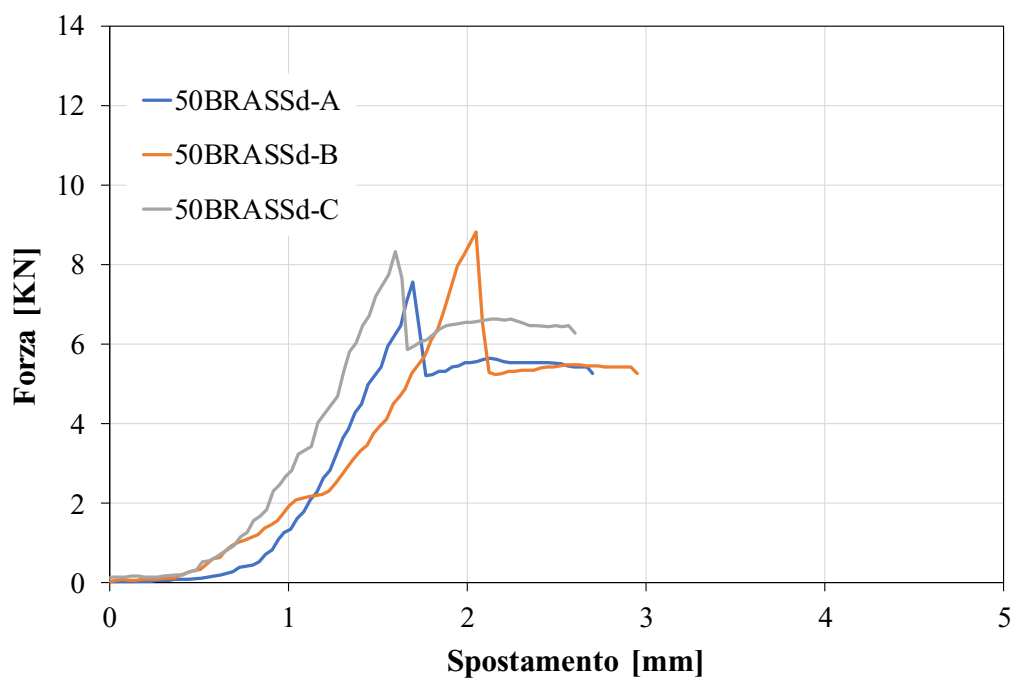


Fig.34 Curva Forza-Spostamento a flessione 100BRASSd 28 giorni

Risultati prova a flessione 100BRASSd 28 giorni			
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

Tabella 14 Risultati prova a flessione 100BRASSd 28 giorni

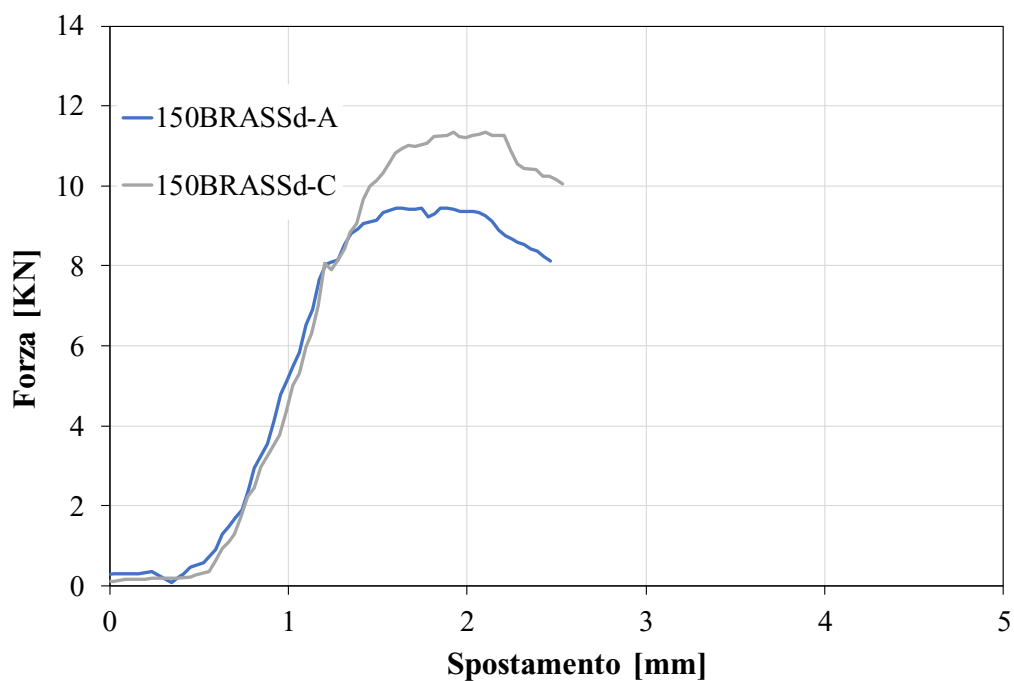


Fig.35 Curva Forza-Spostamento a flessione 150BRASSd 28 giorni

Risultati prova a flessione 150BRASSd 28 giorni			
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

Tabella 15 Risultati prova a flessione 150BRASSd 28 giorni

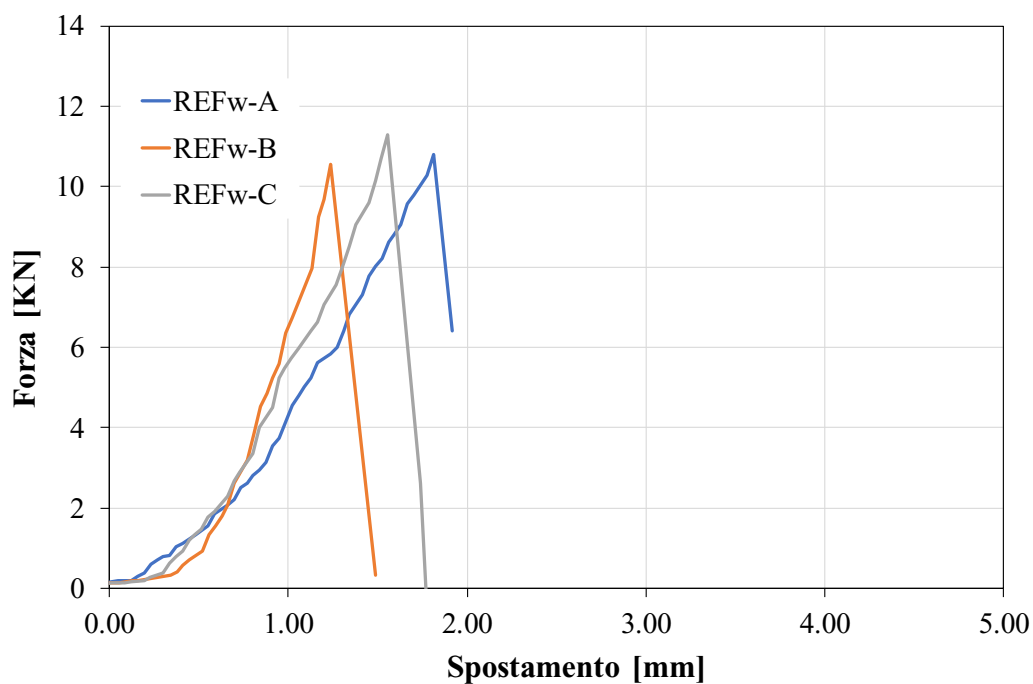


Fig.35 Curva Forza-Spostamento a flessione REFw 7 giorni

Risultati prova a flessione REFw 7 giorni			
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

Tabella 16 Risultati prova a flessione REFw 7 giorni

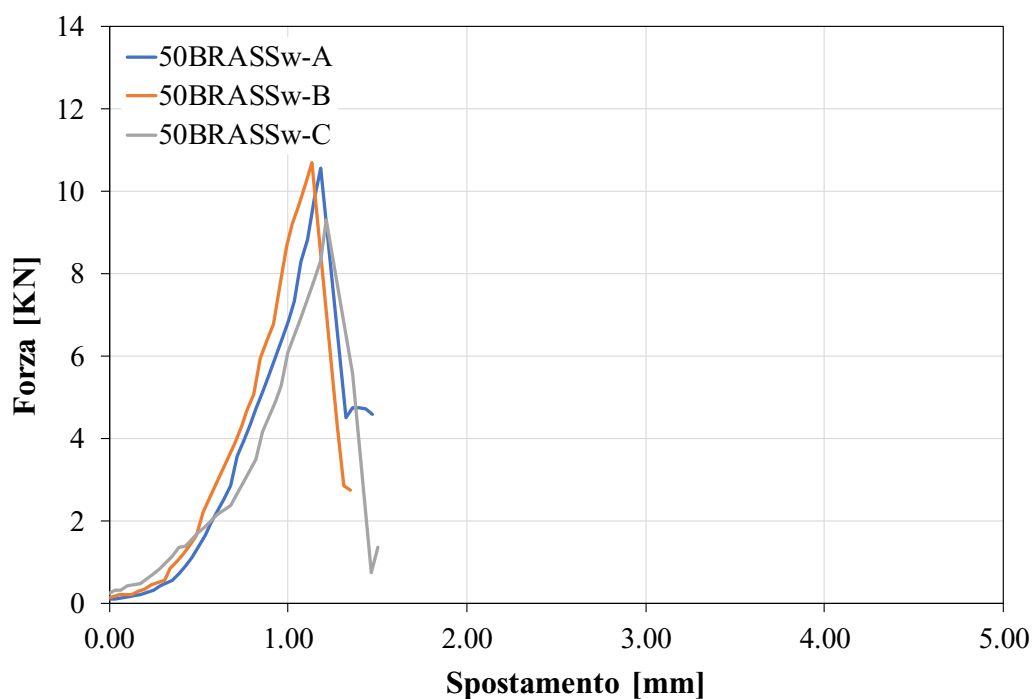


Fig.36 Curva Forza-Spostamento a flessione 50BRASSw 7 giorni

Risultati prova a flessione 50BRASSw 7 giorni			
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

Tabella 17 Risultati prova a flessione 50BRASSw 7 giorni

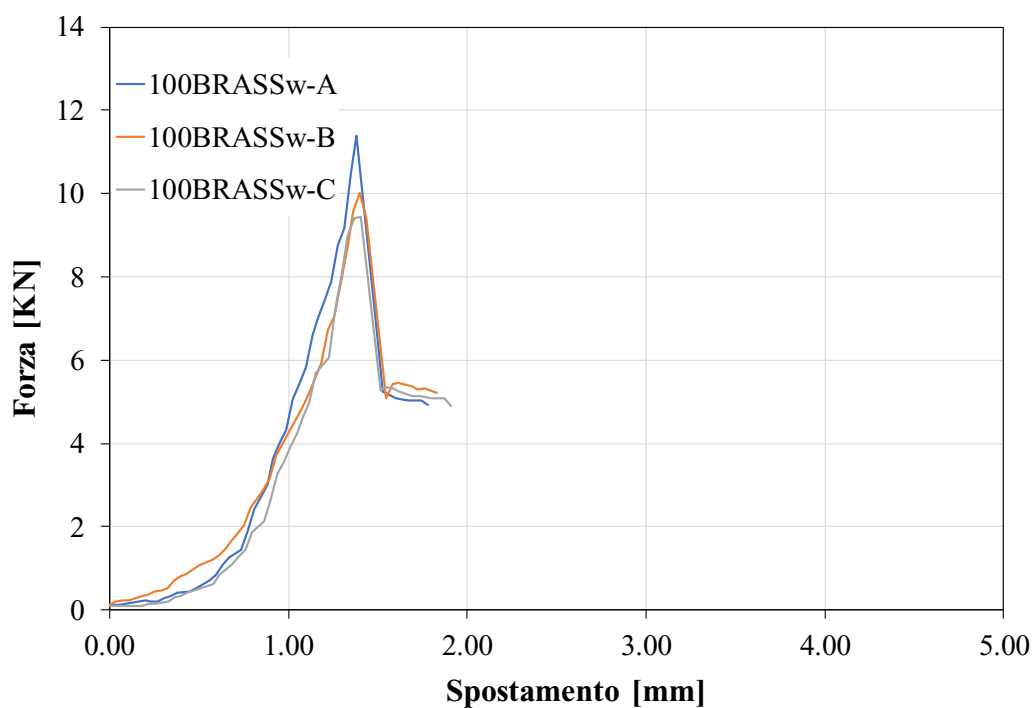


Fig.37 Curva Forza-Spostamento a flessione 100BRASSw 7 giorni

Risultati prova a flessione 100BRASSw 7 giorni			
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	23,47
100BRASSw-C	9,43	1,41	22,10
Media	10,28	1,40	24,10

Tabella 18 Risultati prova a flessione 100BRASSw 7 giorni

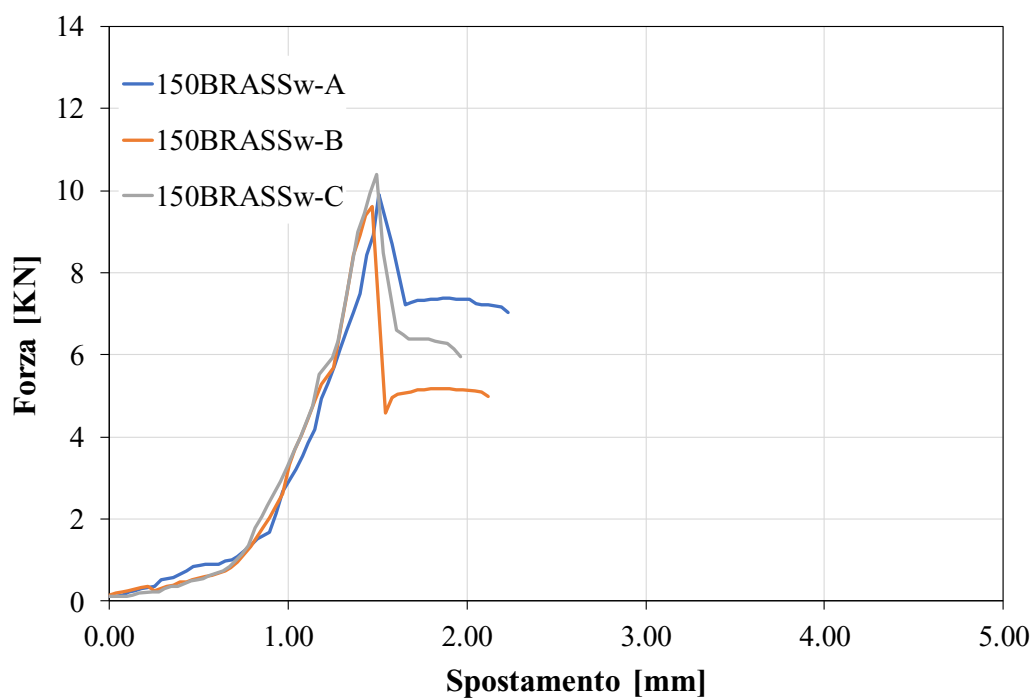


Fig.38 Curva Forza-Spostamento a flessione 150BRASSw 7 giorni

Risultati prova a flessione 150BRASSw 7 giorni			
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

Tabella 19 Risultati prova a flessione 150BRASSw 7 giorni

I risultati medi ottenuti di ciascuna prova a flessione vengono riassunti in Tabella 20, Tabella 21 per UR=80% (i quali risultati sono riportati nel grafico di cui alla Fig.39), in Tabella 22 per UR>95% (il quale risultato è riportato in Fig.40).

Risultati medi prova a flessione UR=80% a 7 giorni				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a flessione media	Incremento tensione massima
	F_{max} (kN)	s (mm)	σ_{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 20 Risultati medi prova a flessione UR=80% a 7 giorni, v.Fig.39

Risultati medi prova a flessione UR=80% a 28 giorni				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a flessione media	Incremento tensione massima
	F_{max} (kN)	s (mm)	σ_{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 21 Risultati medi prova a flessione UR=80% a 28 giorni, v. Fig.39

Risultati medi prova a flessione UR>95% a 7 giorni				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a flessione media	Incremento tensione massima
	F_{max} (kN)	s (mm)	σ_{max} (MPa)	(%)
REFw	10,89	1,54	25,52	
50BRASSw	10,19	1,28	23,88	-6,43
100BRASSw	10,28	1,40	24,10	-5,56
150BRASSw	9,97	1,49	23,37	-8,42

Tabella 22 Risultati medi prova a flessione UR>95% a 7 giorni, v. Fig.40

Risultati UR=80%

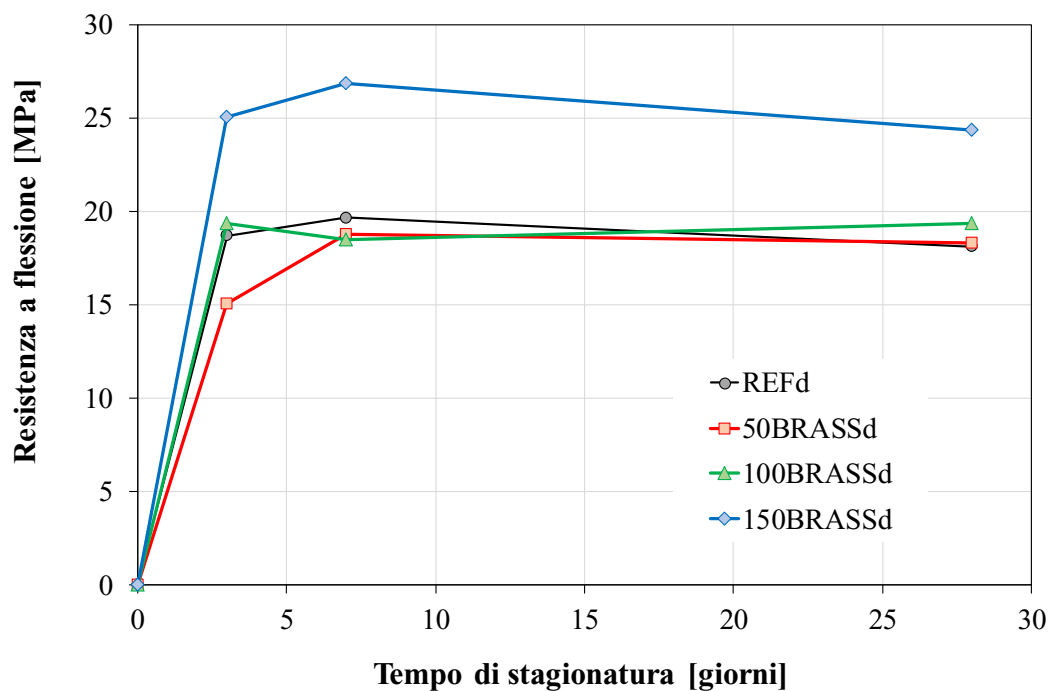


Fig.39 Andamento Resistenza a flessione nel tempo UR=80%

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) come se l'aggiunta di fibre andasse a rompere la coesione interna creando come un difetto nel materiale sia a 3 che a 7 giorni. 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 è registrato nuovamente un miglioramento.

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%.

Risultato UR>95%

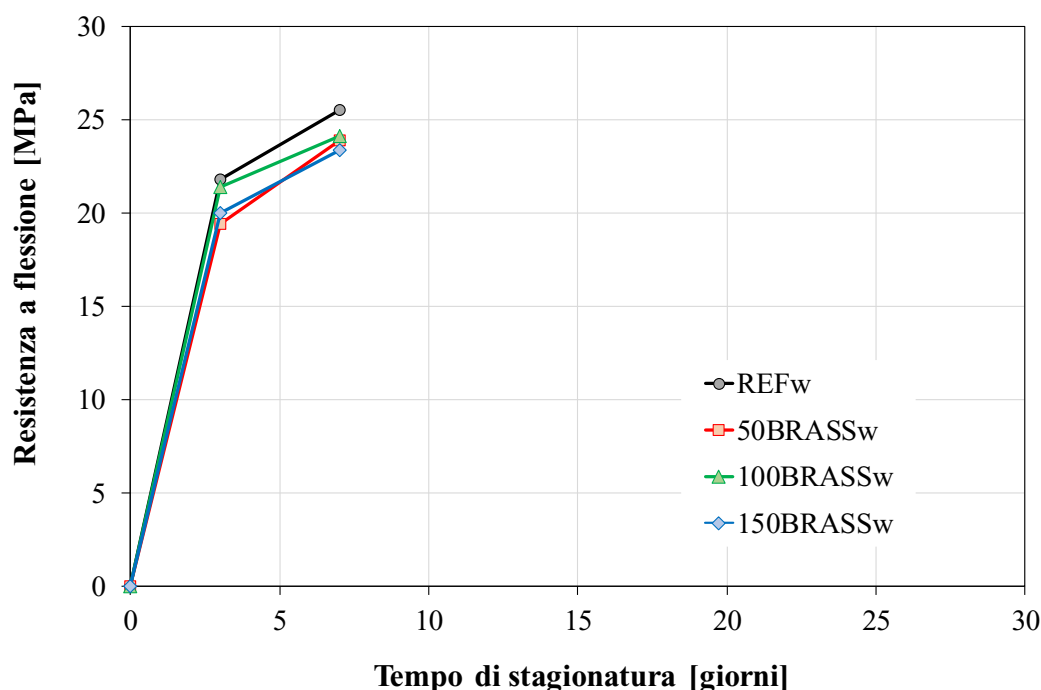
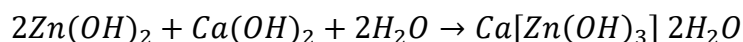


Fig.40 Andamento Resistenza a flessione nel tempo UR>95%

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 $Zn(OH)_2$.



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.

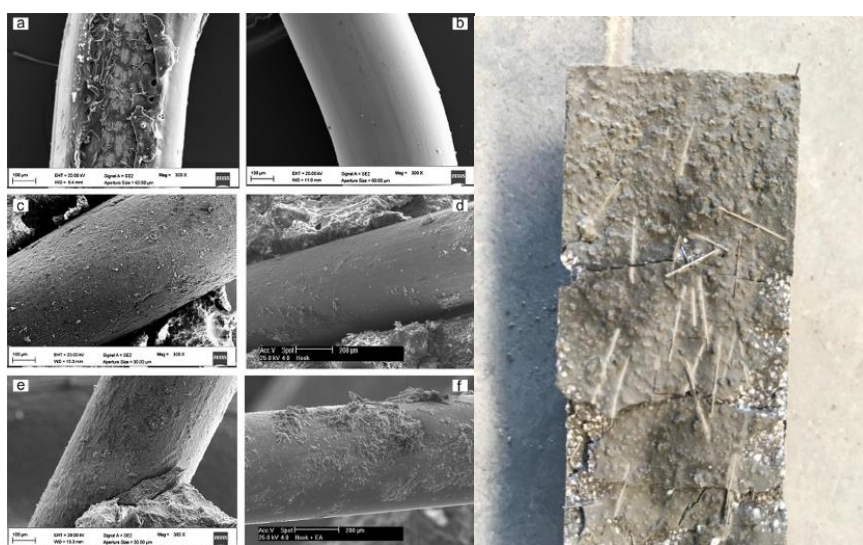
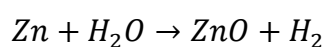


Fig.41 Analisi SEM e Dezincificazione dell'ottone in ambiente alcalino

Stagionando i provini ad umido è possibile notare come sia aumentata la resistenza del provino senza fibre, ma una volta aggiunte le fibre le prestazioni meccaniche diminuiscono. Infatti, è possibile notare come l'effetto delle fibre risulti negativo a 3 giorni mentre a 7 giorni viene sottolineato come all'aumentare delle fibre diminuisca di poco tale resistenza. 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.

Confronto risultati

La stagionatura in ambiente umido sembra migliorare, per il provino in assenza di fibre, le caratteristiche meccaniche rispetto ad una stagionatura all'aria. Considerando la stagionatura in ambiente umido, 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 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 $150 \frac{kg}{m^3}$, (Fig.42 a). I risultati, anche in termini di tenacità, rispecchiano quanto detto (Fig.42 b).

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.

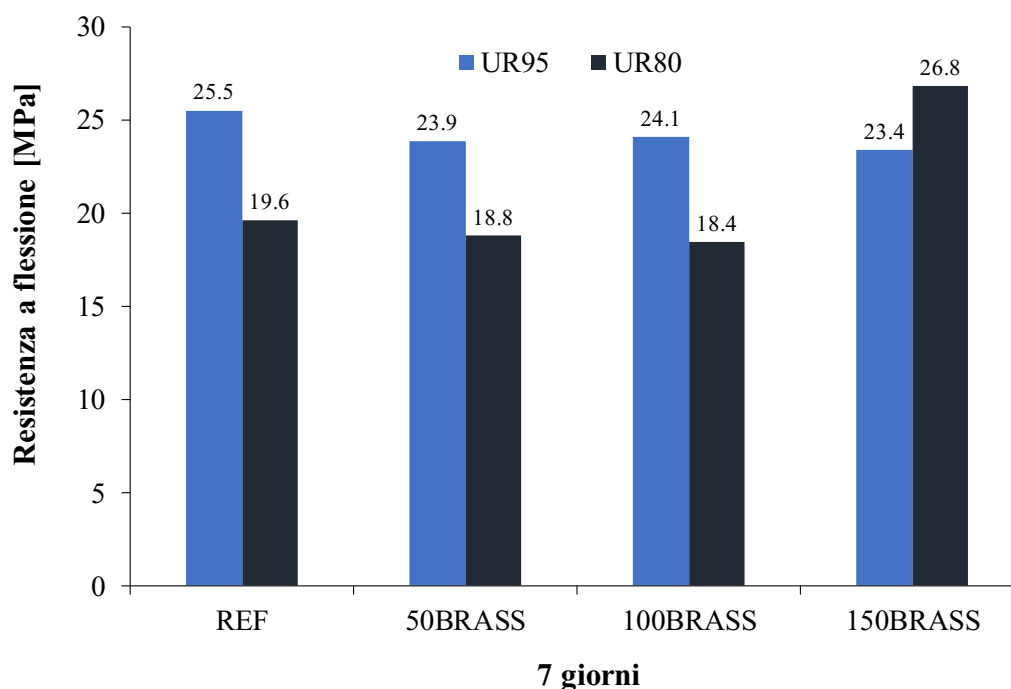


Fig.42 a Confronto Resistenza a flessione 7 giorni UR=80% -UR>95%

Denominazione	Tenacità al picco Fmax dry [kNmm]	Media dry [kNmm]	Tenacità al picco Fmax wet [kNmm]	Media wet [kNmm]
REF	5.30	4.78	8.60	7.20
	4.26		5.37	
			7.64	
50BRASS	4.90	4.45	4.89	5.00
	3.94		5.16	
	4.51		4.94	
100BRASS	5.41	4.40	5.09	4.64
	4.15		4.43	
	3.64		4.40	
150BRASS	13.76	12.78	4.60	4.55
	12.06		4.47	
	12.51		4.56	

Fig.42 b Confronto Tenacità 7 giorni UR=80% -UR>95%

5.2 Prova a compressione

I provini di dimensioni 4x4x16 cm³ sono stati caratterizzati meccanicamente con prove a compressione secondo le indicazioni della normativa UNI EN 1015-11 (*Metodi di prova per malte per opere murarie-Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita*).

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

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

Di seguito si riportano le curve forza (F) - spostamento (s) derivanti dai risultati delle prove a compressione eseguite sui provini 4x4x16 cm³. La relazione F - s è presentata nella forma di un diagramma x-y con lo spostamento sull'asse delle ascisse x e la forza su quello delle ordinate y.

Ogni grafico è preceduto da una tabella nella quale per tutti i provini, indicati con le lettere 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 σ_{max} in MPa. Non avendo a disposizione i risultati a 28 giorni per provini stagionati in ambiente umido il confronto tra le stagionature è stato fatto a 7 giorni in quanto ritenuto periodo già sufficiente per paragonare i risultati.

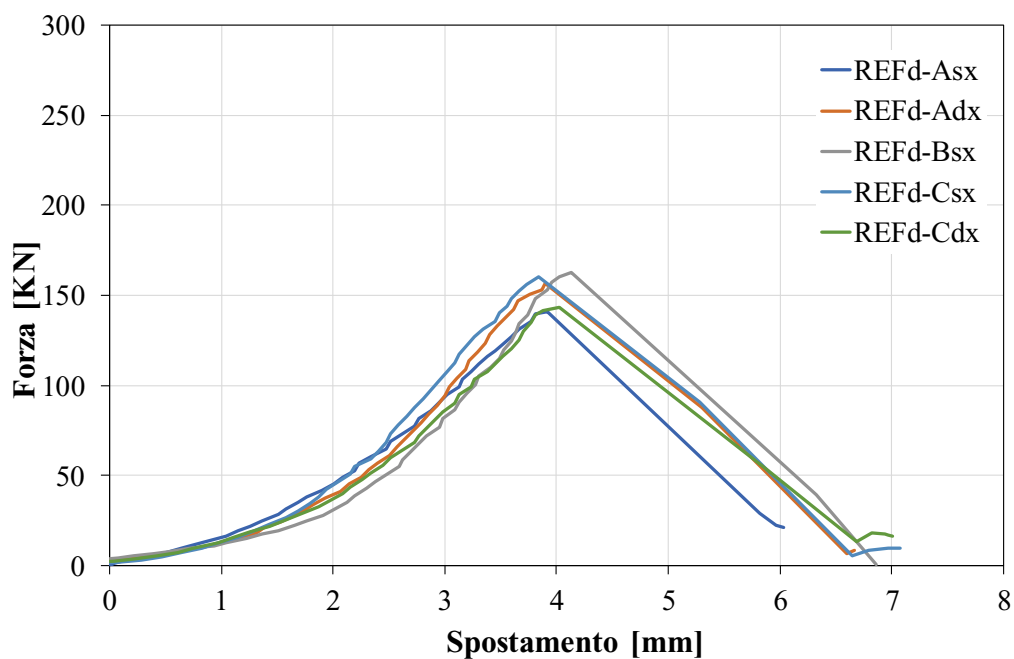


Fig.43 Curva Forza-Spostamento a compressione REFd 7 giorni

Risultati prova a compressione REFd			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	F_{max} (kN)	s (mm)	σ_{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

Tabella 23 Risultati prova a compressione REFd 7 giorni

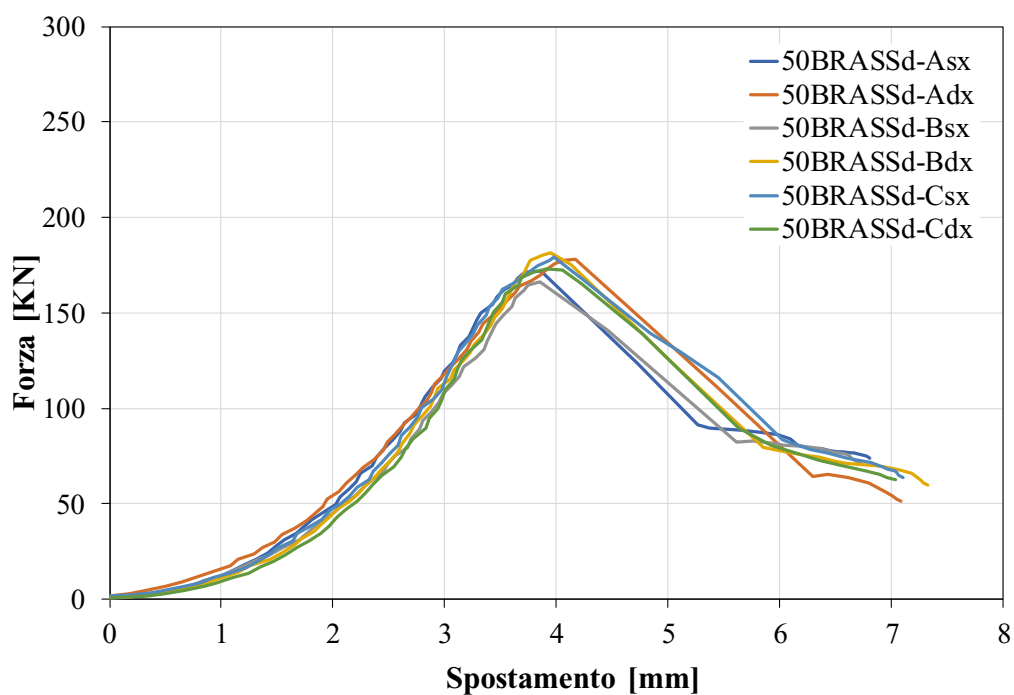


Fig.44 Curva Forza-Spostamento a compressione 50BRASSd 7 giorni

Risultati prova a compressione 50BRASSd 7 giorni			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	F_{max} (kN)	s (mm)	σ_{max} (MPa)
50BRASSd-Asx	171,66	3,86	171,66
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

Tabella 24 Risultati prova a compressione 50BRASSd 7 giorni

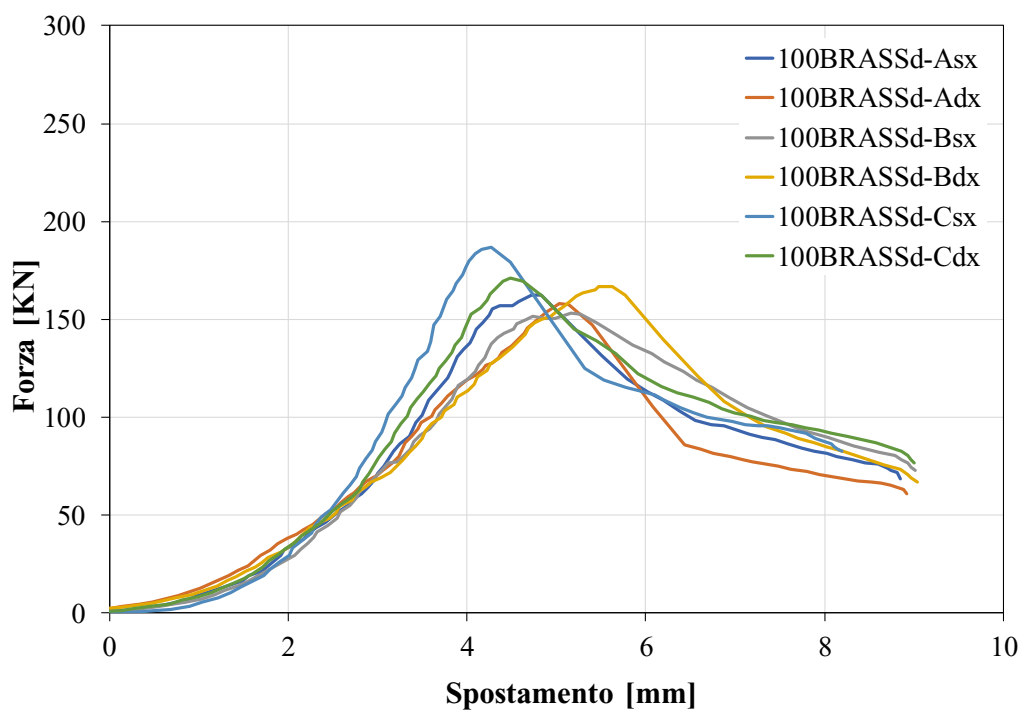


Fig.45 Curva Forza-Spostamento a compressione 100BRASSd 7 giorni

Risultati prova a compressione 100BRASSd 7 giorni			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	F_{max} (kN)	s (mm)	σ_{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

Tabella 25 Risultati prova a compressione 100BRASSd 7 giorni

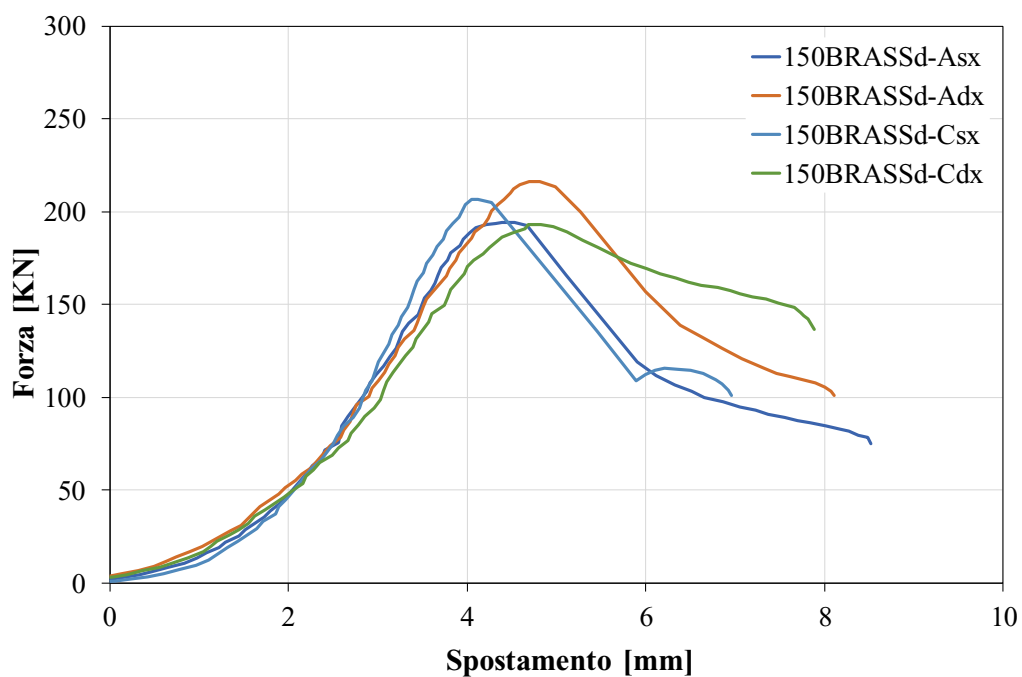


Fig.46 Curva Forza-Spostamento a compressione 150BRASSd 7 giorni

Risultati prova a compressione 150BRASSd 7 giorni			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	F_{max} (kN)	s (mm)	σ_{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

Tabella 26 Risultati prova a compressione 150BRASSd 7 giorni

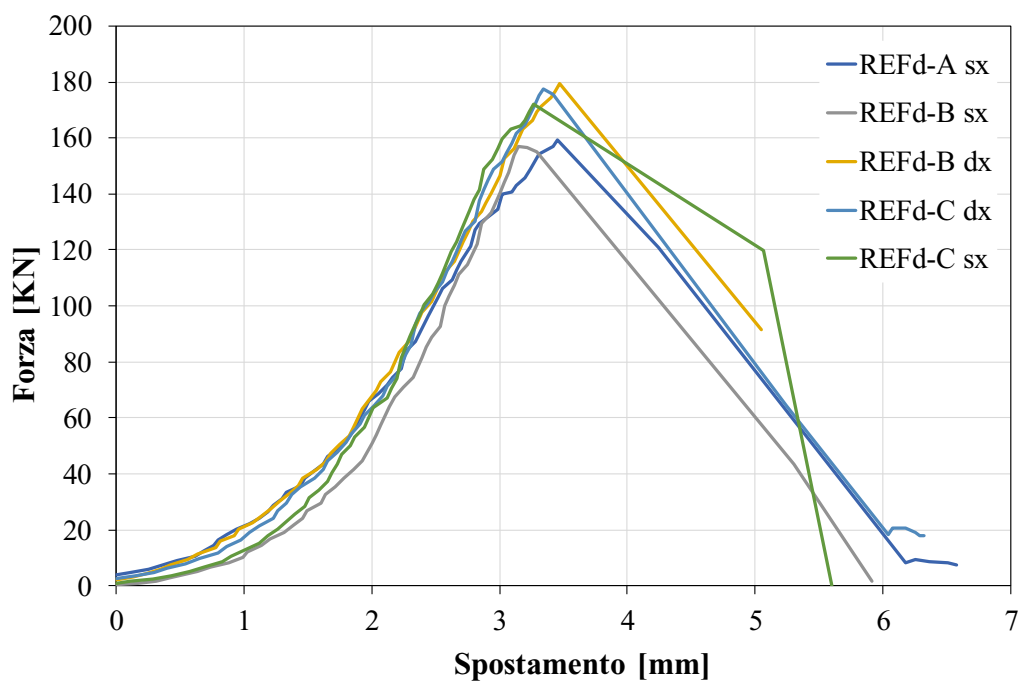


Fig.47 Curva Forza-Spostamento a compressione REFd 28 giorni

Risultati prova a compressione REFd 28 giorni			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	F_{\max} (kN)	s (mm)	σ_{\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	163,64	3,34	102,28

Tabella 27 Risultati prova a compressione REFd 28 giorni

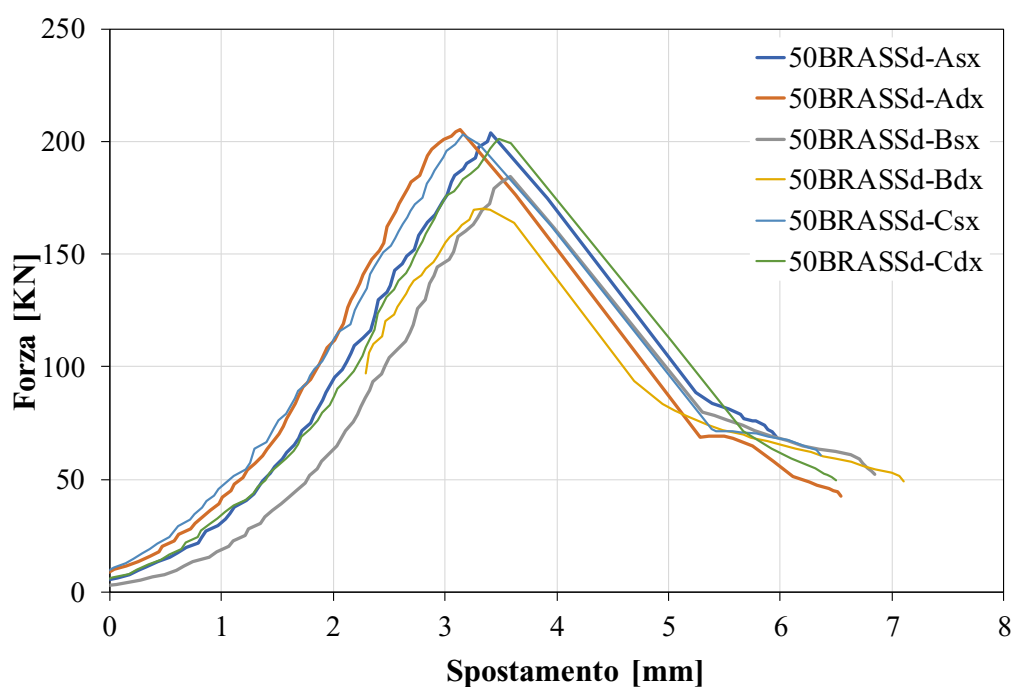


Fig.48 Curva Forza-Spostamento a compressione 50BRASSd 28 giorni

Risultati prova a compressione 50BRASSd 28 giorni			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	F_{max} (kN)	s (mm)	σ_{max} (MPa)
50BRASSd-Asx	203,83	3,14	127,39
50BRASS d-Adx	205,29	3,13	128,31
50BRASS d-Bsx	184,41	3,58	115,26
50BRASS d-Bdx	170,02	3,33	106,26
50BRASS d-Csx	203,33	3,16	127,08
50BRASS d-Cdx	201,15	3,48	125,72
Media	194,67	3,35	121,67

Tabella 28 Risultati prova a compressione 50BRASSd 28 giorni

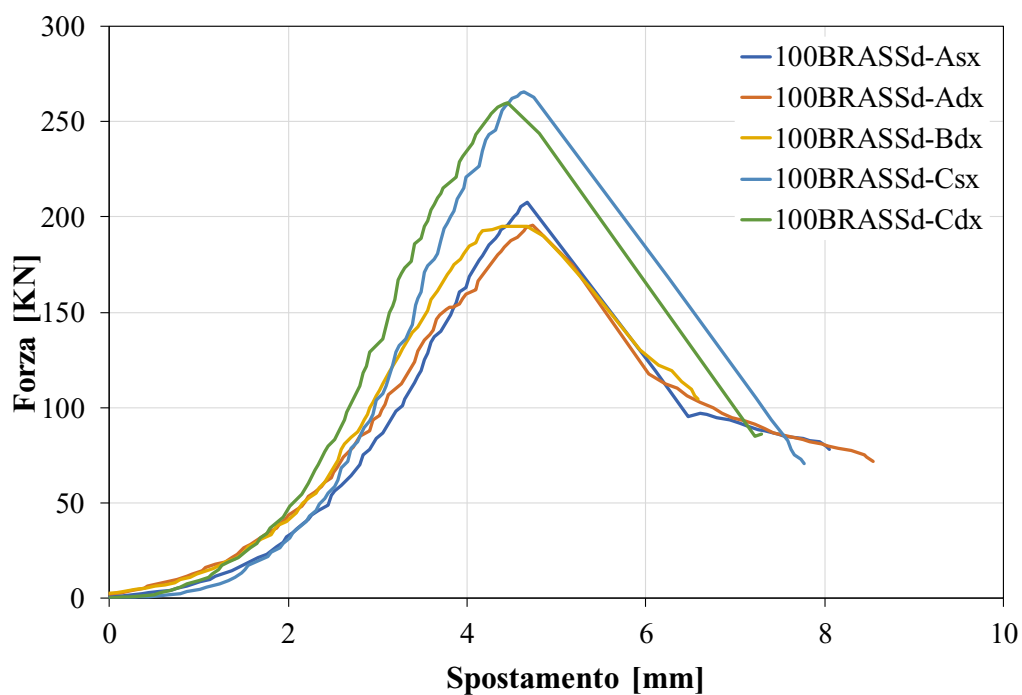


Fig.49 Curva Forza-Spostamento a compressione 100BRASSd 28 giorni

Risultati prova a compressione 100BRASSd 28 giorni

Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	F_{\max} (kN)	s (mm)	σ_{\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

Tabella 28 Risultati prova a compressione 100BRASSd 28 giorni

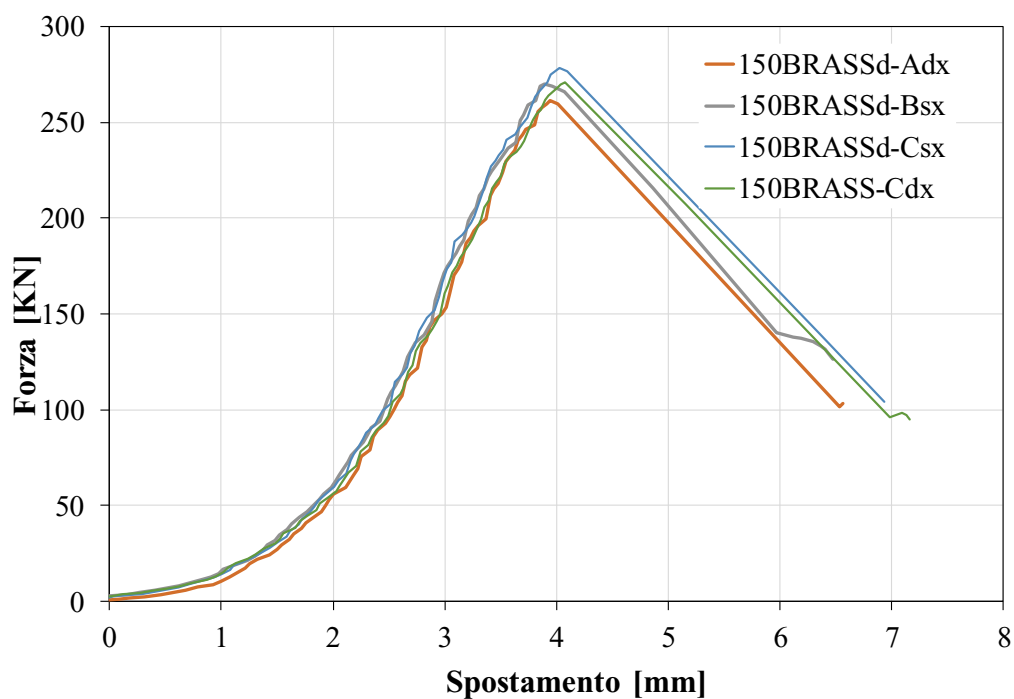


Fig.50 Curva Forza-Spostamento a compressione 150BRASSd 28 giorni

Risultati prova a compressione 150BRASSd 28 giorni			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	F_{\max} (kN)	s (mm)	σ_{\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	168,80

Tabella 29 Risultati prova a compressione 150BRASSd 28 giorni

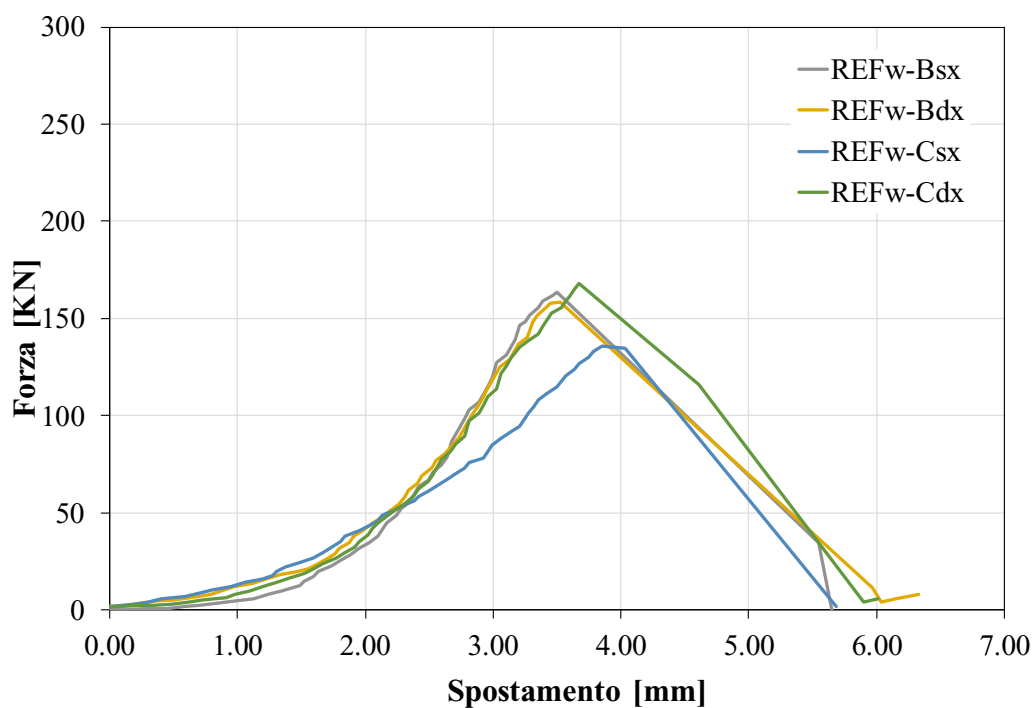


Fig.51 Curva Forza-Spostamento a compressione REFw 7 giorni

Risultati prova a compressione REFw 7 giorni			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	F_{\max} (kN)	s (mm)	σ_{\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

Tabella 30 Risultati prova a compressione REFw 7 giorni

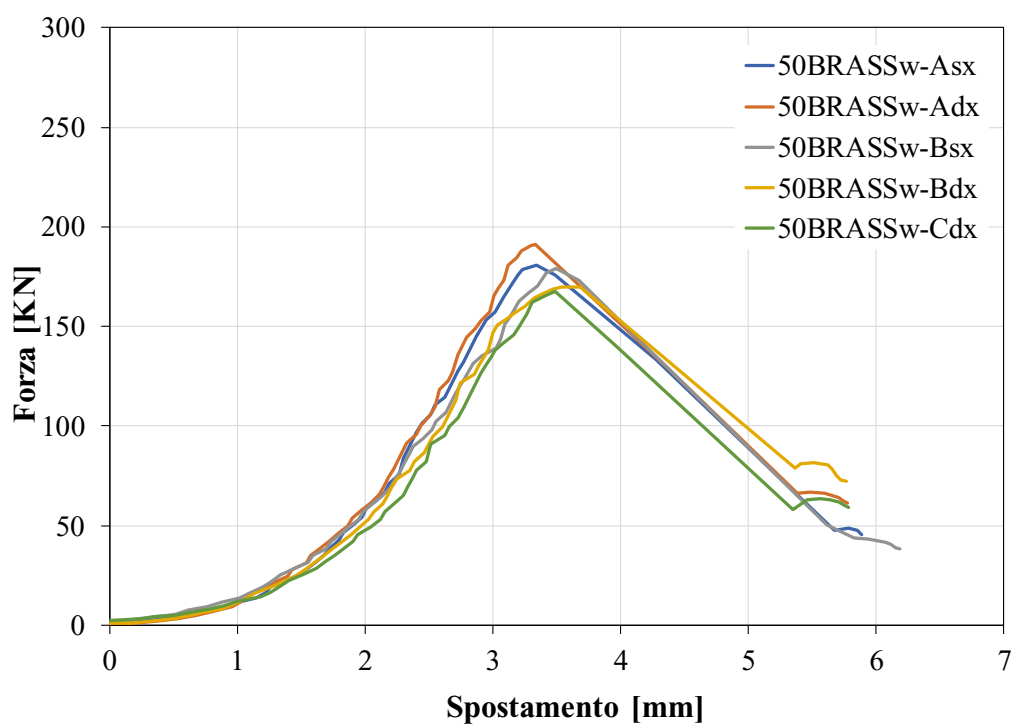


Fig.52 Curva Forza-Spostamento a compressione 50BRASSw 7 giorni

Risultati prova a compressione 50BRASSw 7 giorni			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	F_{\max} (kN)	s (mm)	σ_{\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

Tabella 31 Risultati prova a compressione 50BRASSw 7 giorni

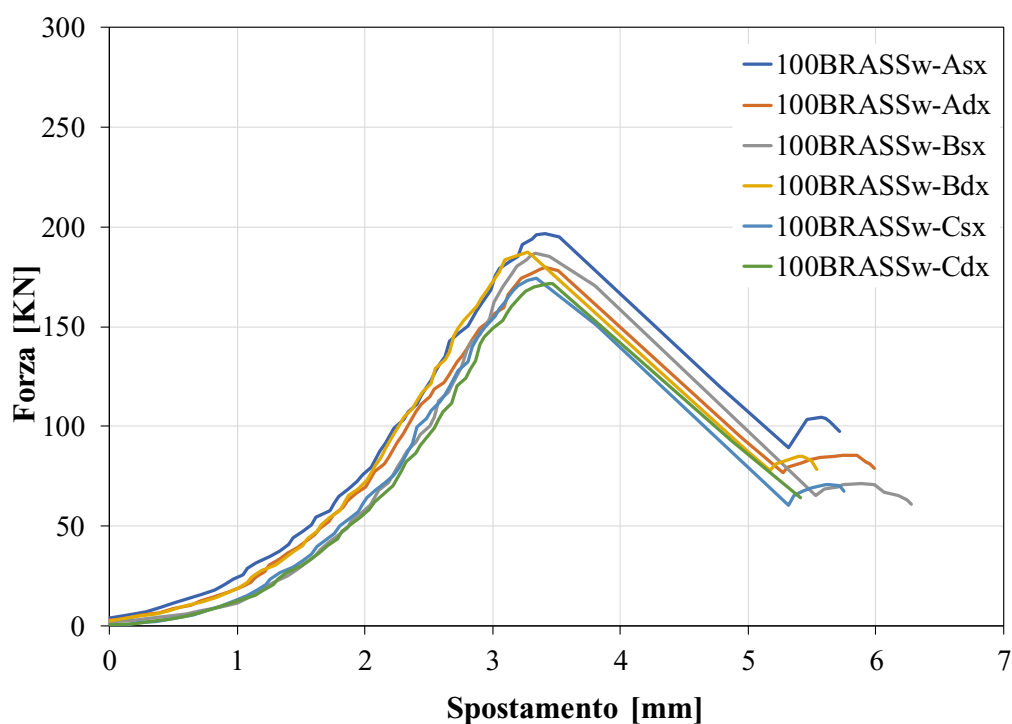


Fig.53 Curva Forza-Spostamento a compressione 100BRASSw 7 giorni

Risultati prova a compressione 100BRASSw 7 giorni			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	F_{\max} (kN)	s (mm)	σ_{\max} (MPa)
100BRASSw-Asx	196,73	3,41	112,96
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

Tabella 32 Risultati prova a compressione 100BRASSw 7 giorni

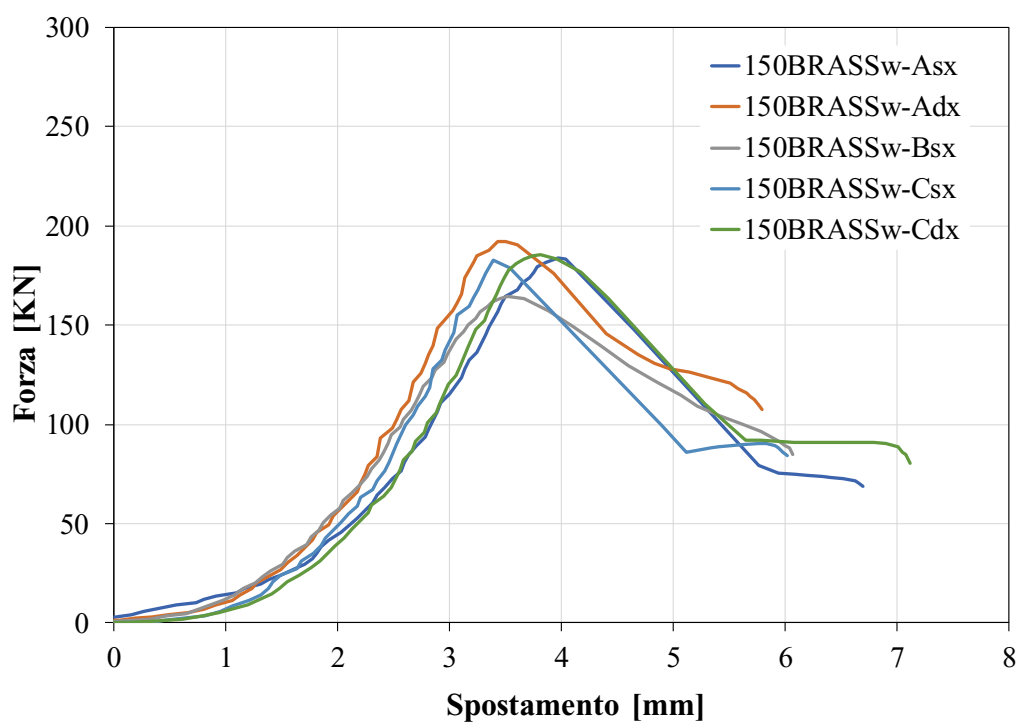


Fig.54 Curva Forza-Spostamento a compressione 150BRASSw 7 giorni

Risultati prova a compressione 150BRASSw 7 giorni			
Campione	Carico Massimo	Spostamento al carico massimo	Tensione massima
	F_{max} (kN)	s (mm)	σ_{max} (MPa)
150BRASSw-Asx	183,59	3,97	114,75
150BRASSw-Adx	192,34	3,50	120,21
150BRASSw-Bsx	164,23	3,52	102,64
150BRASSw-Csx	182,64	3,40	114,15
150BRASSw-Cdx	185,62	3,81	116,01
Media	181,68	3,64	113,55

Tabella 32 Risultati prova a compressione 150BRASSw 7 giorni

I risultati medi ottenuti di ciascuna prova a flessione vengono riassunti in Tabella 33, Tabella 34 per UR=80% (i quali risultati sono riportati nel grafico di cui alla Fig.55), in Tabella 22 per UR>95% (il quale risultato è riportato in Fig.56).

Risultati medi prova a compressione UR=80% a 7 giorni				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a compressione media	Incremento tensione massima
	F_{max} (kN)	s (mm)	σ_{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	14,42
150BRASSd	202,57	4,54	126,60	32,57

Tabella 33 Risultati medi prova a compressione UR=80% a 7 giorni, v.Fig.55

Risultati medi prova a compressione UR=80% a 28 giorni				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a compressione media	Incremento tensione massima
	F_{max} (kN)	s (mm)	σ_{max} (MPa)	(%)
REFd	163,64	3,34	102,28	
50BRASSd	194,67	3,35	121,67	18,96
100BRASSd	224,91	4,60	140,57	37,44
150BRASSd	232,04	3,98	168,80	65,04

Tabella 34 Risultati medi prova a compressione UR=80% a 28 giorni, v. Fig.55

Risultati medi prova a compressione UR>95% a 7 giorni				
Campione	Carico massimo medio	Spostamento al carico massimo medio	Resistenza a compressione media	Incremento tensione massima
	F_{max} (kN)	s (mm)	σ_{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 35 Risultati medi prova a compressione UR>95% a 7 giorni, v. Fig.56

Risultati UR=80%

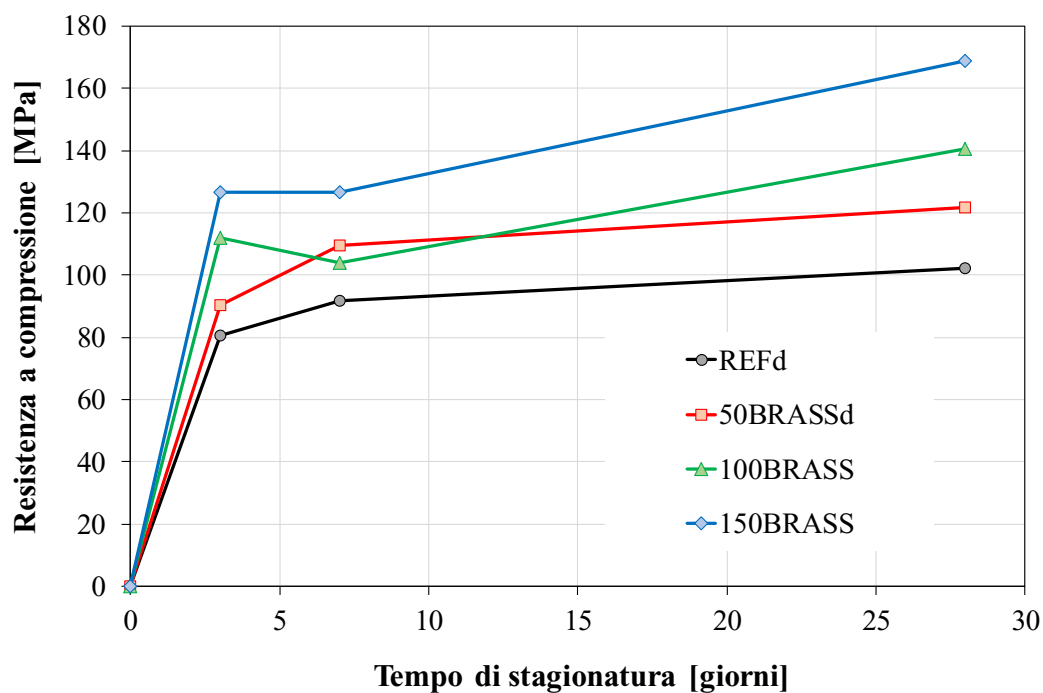


Fig.55 Andamento Resistenza a compressione nel tempo UR=80%

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. Come si evince infatti dalla Tabella 34 e dalla Tabella 35, i provini UHPC hanno mostrato una resistenza a compressione media pari a circa 100 MPa, decisamente più alta rispetto a quella di un calcestruzzo ordinario. 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 postpicco. 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 postpicco sia sempre meno pronunciato nei calcestruzzi ad elevate prestazioni meccaniche.

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: questo può essere derivato da un difetto del provino o da un errore della prova. Dunque, con $150 \frac{kg}{m^3}$ si è arrivati ad un incremento del 65,04% e ciò può essere derivato dall'effetto di confinamento che le fibre determinano sulla matrice cementizia.

Risultato $UR > 95\%$

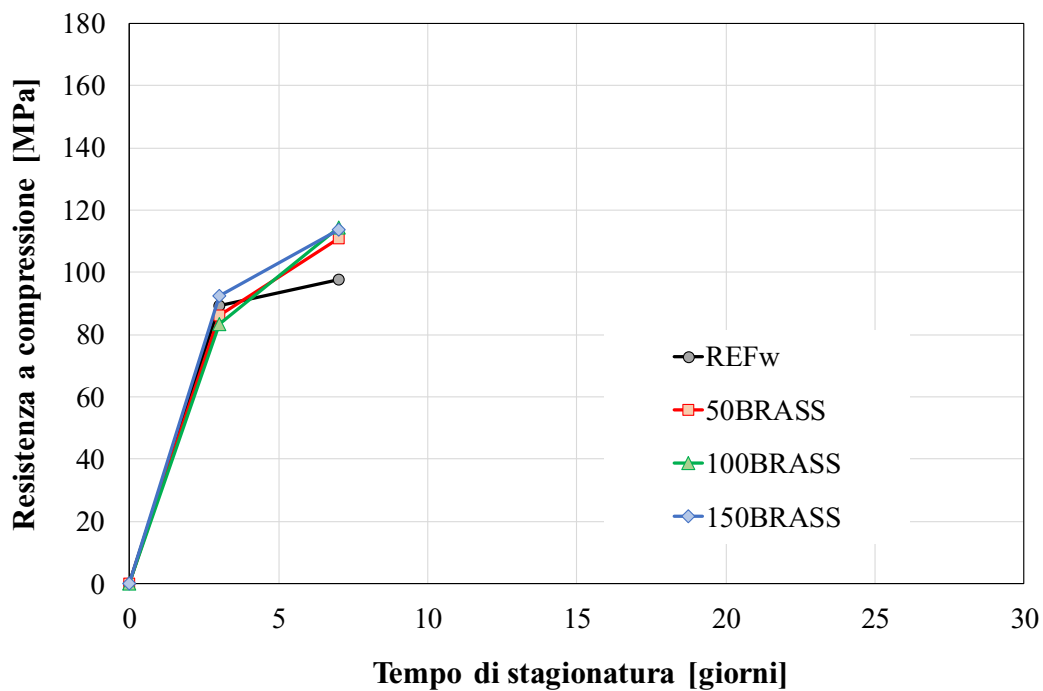


Fig.56 Andamento Resistenza a compressione nel tempo $UR > 95\%$

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 la calce che libera idrogeno gassoso ed espande il materiale. Dato che i risultati sono confrontabili a 7 giorni lo saranno molto probabilmente anche a 28 giorni.

Confronto risultati

Stagionando in ambiente umido le caratteristiche meccaniche sembrano in parte aumentare. 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 fibro rinforzati; 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 (Fig.56).

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 assegnare ai provini un quantitativo fibre ottonate inferiore al valore massimo (data l'espansione maggiore causa reazione dello zinco come verrà vista nei risultati delle deformazioni del provino nel tempo) 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.

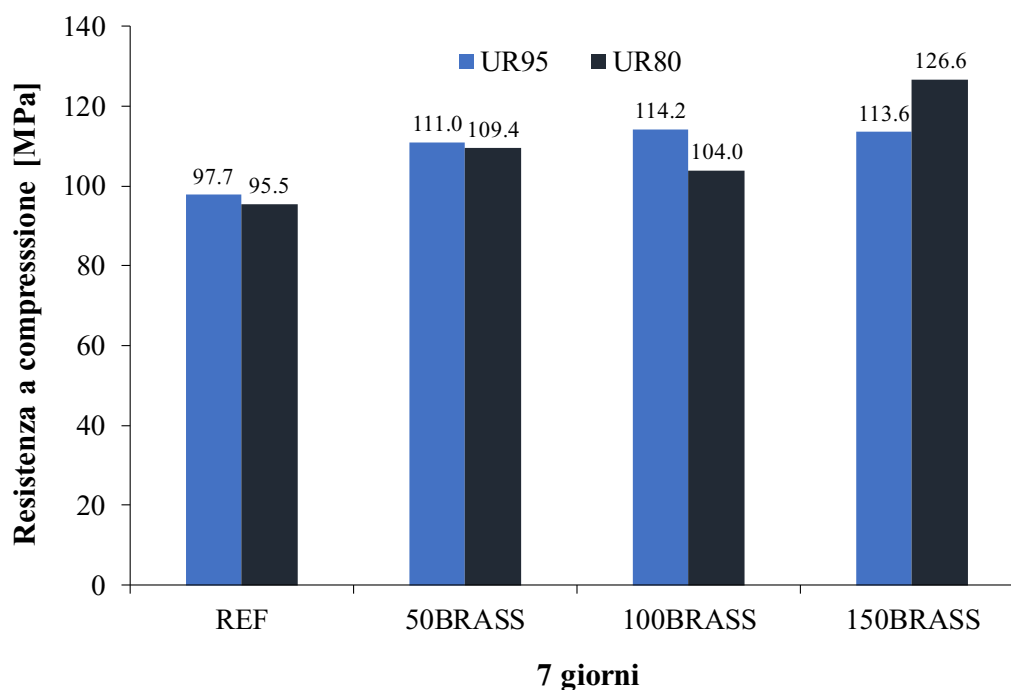


Fig.57 Confronto Resistenza a compressione 7 giorni UR=80% -UR>95%

5.3 Prova determinazione ritiro assiale

I provini di dimensioni 4x4x16 cm³ 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 $[\frac{\mu m}{m}]$

I risultati ottenuti sono tabellati e riportati in grafici $[\frac{\mu m}{m}]$, 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.

Risultati prova determinazione ritiro a UR=80%

Tempo	REFd-A	REFd-B
7h	0	0
1g	-12	-140
2g	-125	-150
3g	-140	-160
7gg	-170	-230
14gg	-160	-225
21 gg	-170	-230
28 gg	-170	-235

Tabella 36 Risultati prova determinazione ritiro REFd UR=80%

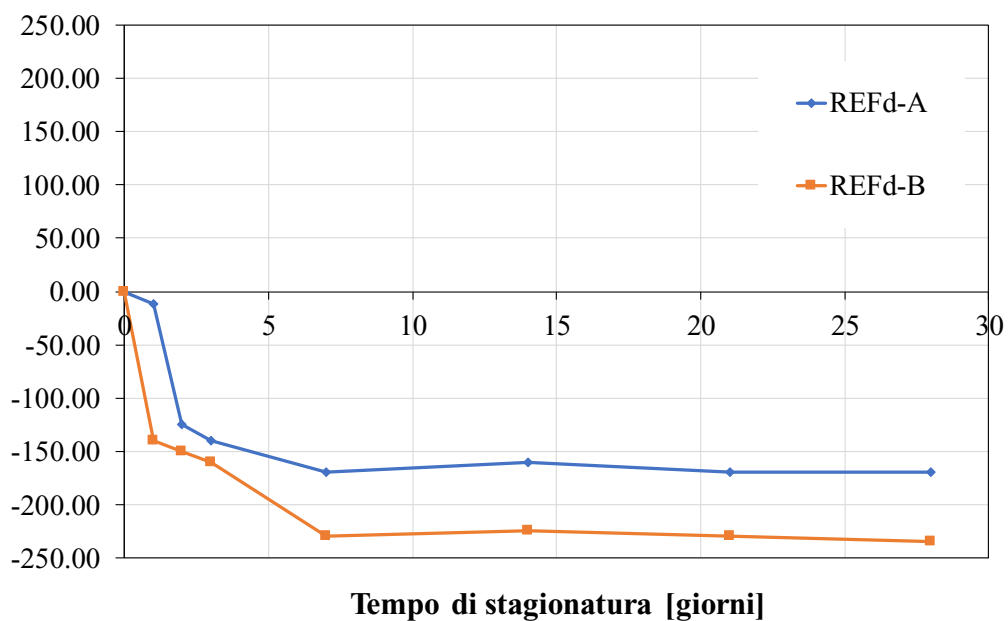


Fig.58 Curva deformazione nel tempo REFd UR=80%

Risultati prova determinazione ritiro a UR=80%

Tempo	50BRASSd-A	50BRASSd-B	50BRASSd-C
7h	0	0	0
1g	-75	-75	-70
2g	-115	-95	-120
3g	-120	-95	-120
7gg	-140	-140	-130
14gg	-150	-140	-130
21 gg	-160	-140	-135
28 gg	-90	-80	-90

Tabella 37 Risultati prova determinazione ritiro 50BRASSd UR=80%

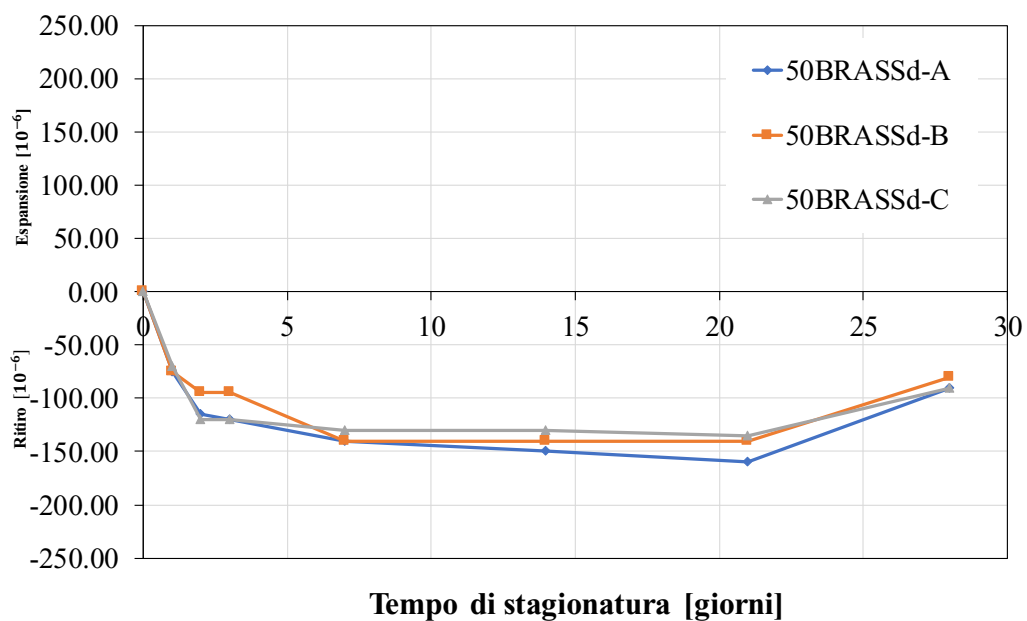


Fig.59 Curva deformazione nel tempo 50BRASSd UR=80%

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

Tabella 38 Risultati prova determinazione ritiro 100BRASSd UR=80%

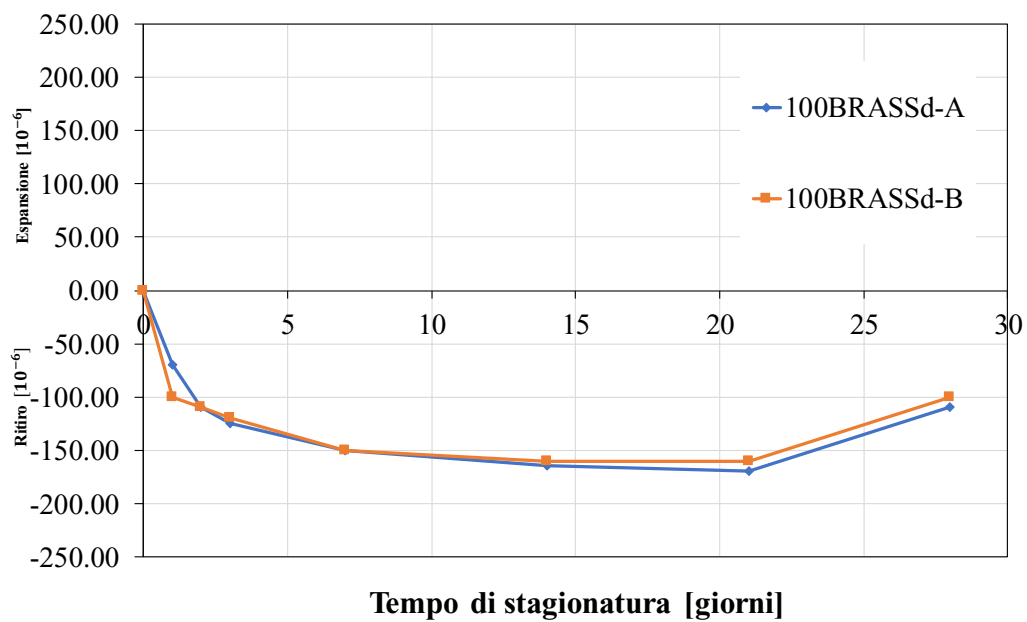


Fig.60 Curva deformazione nel tempo 100BRASSd UR=80%

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

Tabella 39 Risultati prova determinazione ritiro 150BRASSd UR=80%

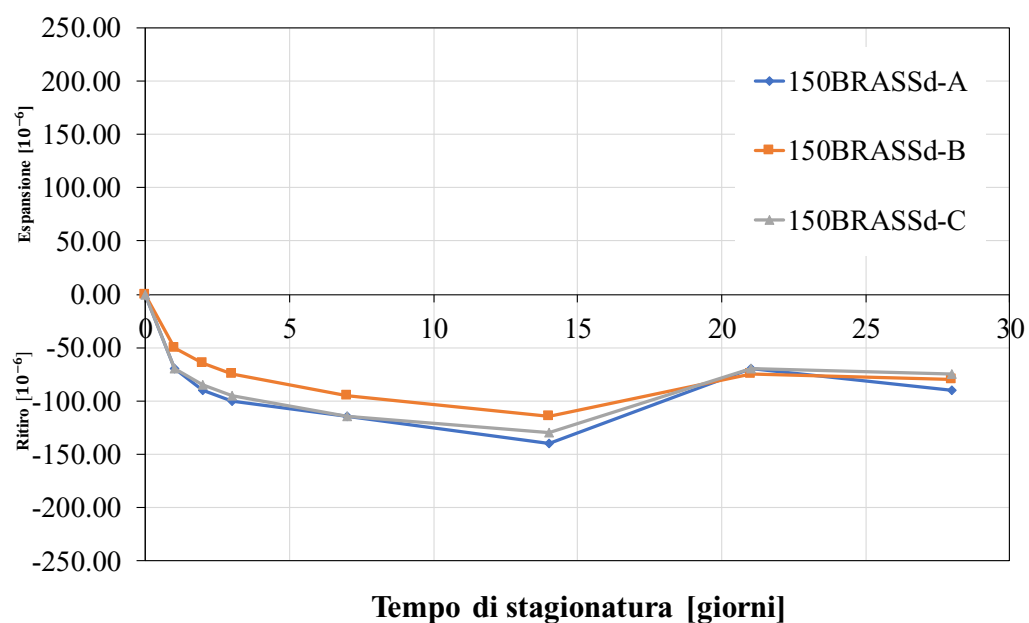


Fig. 61 Curva deformazione nel tempo 150BRASSd UR=80%

Risultati prova determinazione ritiro a UR>95%

Tempo	REFw-A	REFw-B	REFw-C
7h	0	0	0
1g	540	435	130
2g	510	400	125
3g	485	390	120
7gg	430	330	70
14gg	410	310	40

Tabella 40 Risultati prova determinazione ritiro REFw UR>95%

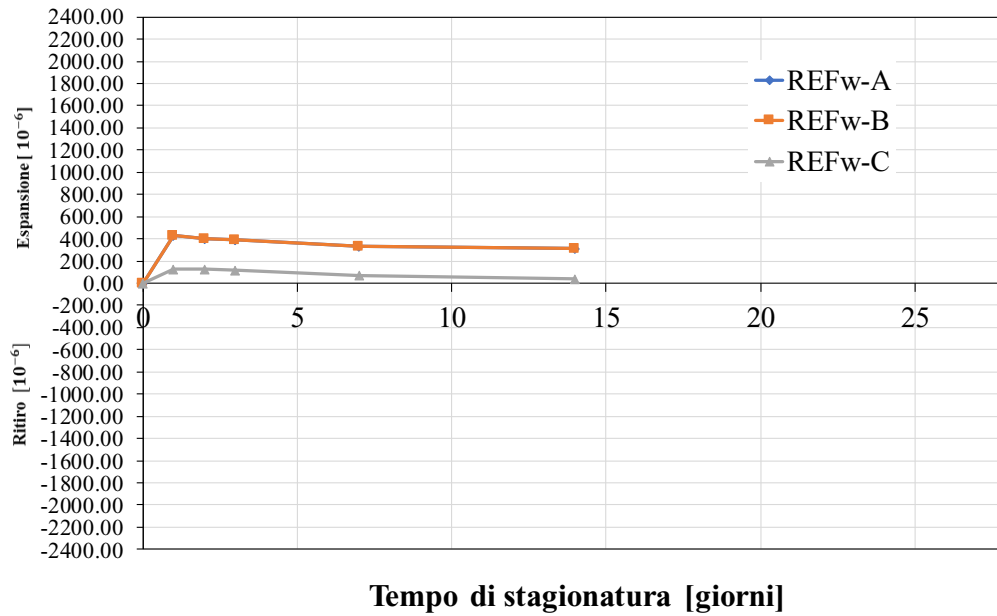


Fig.62 Curva deformazione nel tempo REFw UR>95%

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

Tabella 41 Risultati prova determinazione ritiro 50BRASSw UR>95%

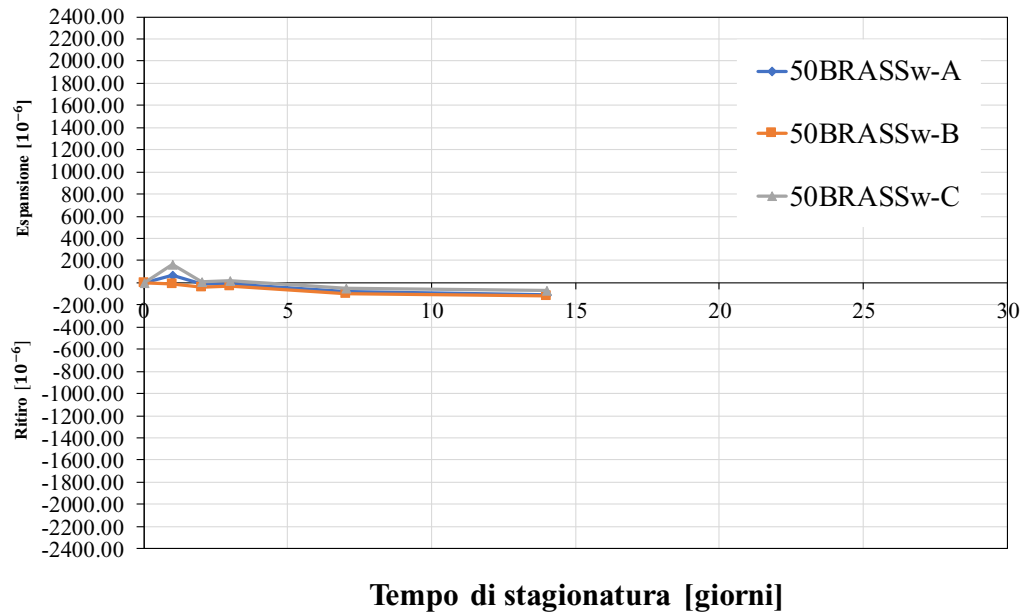


Fig. 63 Curva deformazione nel tempo 50BRASSw UR>95%

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

Tabella 42 Risultati prova determinazione ritiro 100BRASSw UR>95%

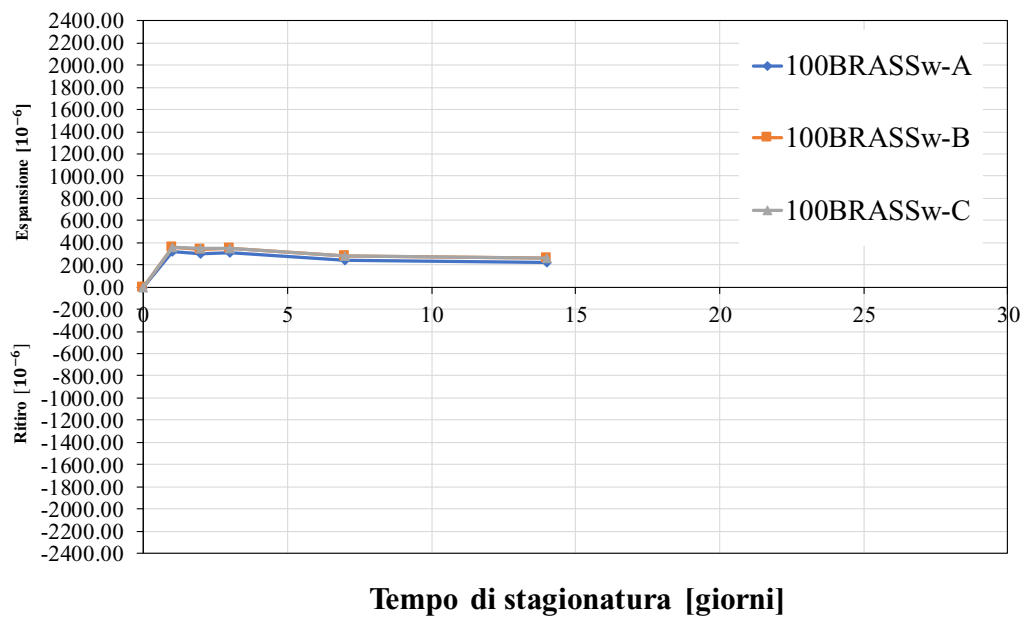


Fig. 64 Curva deformazione nel tempo 100BRASSw UR>95%

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

Tabella 43 Risultati prova determinazione ritiro 150BRASSw UR>95%

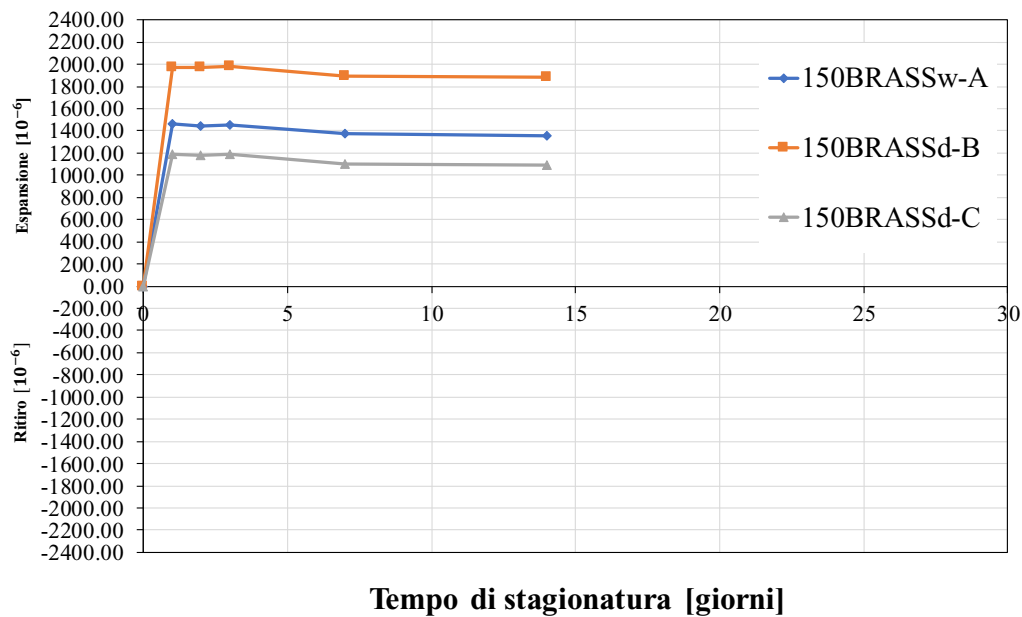


Fig.65 Curva deformazione nel tempo 150BRASSw UR>95%

È possibile stabilire che le deformazioni medie da ritiro autogeno (Fig.66) sono importanti se il provino viene stagionato all'aria a UR=80%. C'è da sottolineare comunque come all'aumentare delle fibre vada a diminuire il ritiro autogeno a causa dell'alto modulo di elasticità delle fibre che appunto impedisce il rigonfiamento anche in presenza di agente espansivo e di riduttore antiritiro.

Stagionando invece ad UR>95% il ritiro è pressoché annullato (Fig.67), in particolare il provino senza fibre subisce un'espansione e il provino con un contenuto di fibre a $50 \frac{kg}{m^3}$ mostra un leggero rigonfiamento ma un successivo ritiro causa maggiore resistenza della matrice che impedisce un'espansione. In seguito, aggiungendo $100 \frac{kg}{m^3}$ e $150 \frac{kg}{m^3}$ di fibre 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.

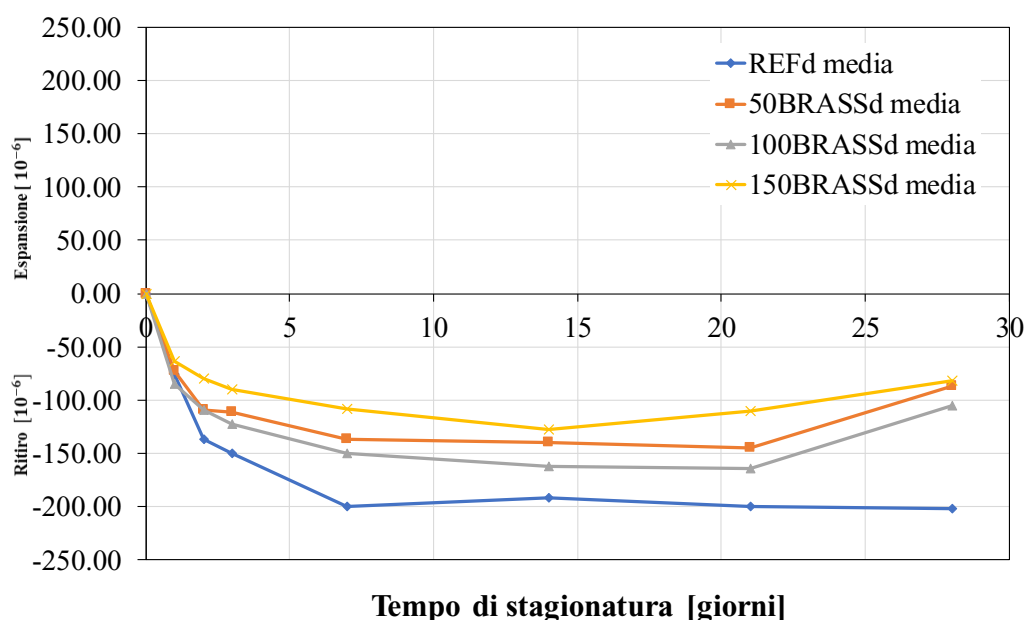


Fig.66 Curva deformazione nel tempo media provini UR=80%

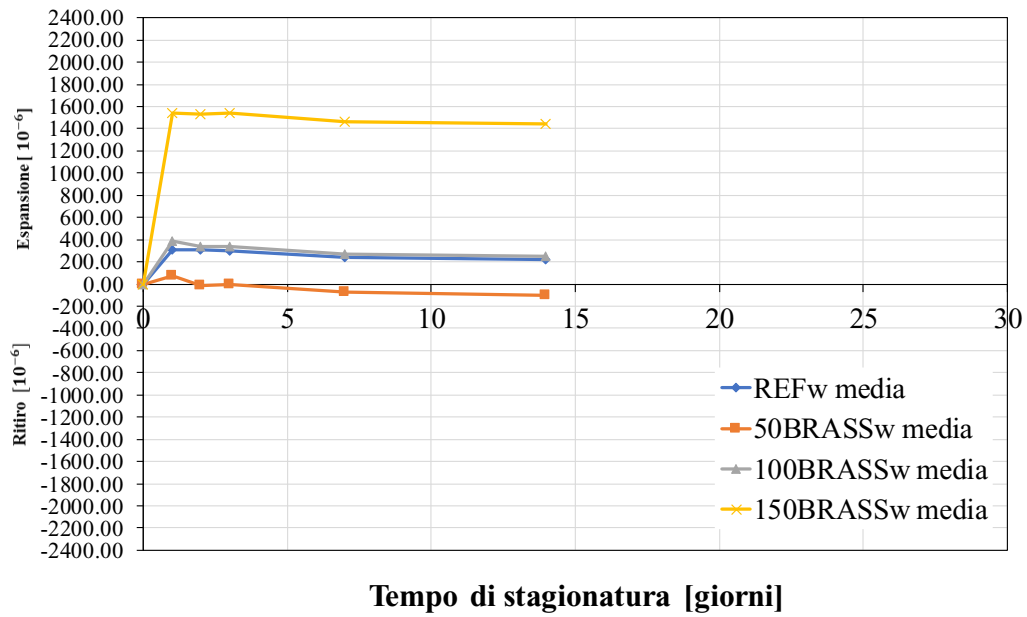


Fig.67 Curva deformazione nel tempo media provini UR>95%

Tali analisi in termini di deformazioni coincidono con le precedenti trattazioni del materiale da un punto di vista meccanico.

6. Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di studiare gli effetti dovuti all'inclusione di fibre d'acciaio rivestite in ottone su calcestruzzi ad elevate prestazioni non armati, in termini di prestazioni meccaniche e deformazioni da ritiro nel tempo. A questo scopo sono state eseguite prove di flessione e compressione su provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Tutti i provini avevano stessa composizione ma contenuti di fibre diversi: quattro getti sono stati stagionati all'aria per valutare gli effetti del ritiro autogeno e altri quattro stagionati in acqua per annullare gli effetti di tale ritiro e aumentare dunque le prestazioni meccaniche. I risultati ottenuti dalla campagna sperimentale hanno in parte confermato le prestazioni attese, soprattutto in termini di aumento della resistenza e annullamento del ritiro mediante una corretta stagionatura del provino privo di fibre, ma hanno anche permesso degli spunti di riflessione importanti per quanto riguarda la reazione dello zinco con l'acqua che si genera nei provini con fibre creando un'espansione del materiale (con vuoti) che si ripercuote in termini di prestazioni meccaniche. I confronti sono stati effettuati in riferimento al settimo giorno di stagionatura in assenza di risultati a 28 giorni per il provino stagionato in ambiente umido e oltretutto 7 giorni sono già sufficienti per elaborare i risultati.

La ricetta di ogni provino prevedeva l'uso combinato di agente espansivo ($25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) e additivo antiritiro ($9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) il cui utilizzo si è mostrato inefficiente stagionando i provini all'aria, cioè in ambiente ad UR=80% tant'è che il provino in assenza di fibre non è espanso e ha presentato maggiori deformazioni da ritiro. All'aumentare del contenuto di fibre tale ritiro è diminuito progressivamente, mostrando determinate caratteristiche meccaniche a flessione e compressione.

L'obbiettivo dunque era quello di diminuire il ritiro e aumentare le resistenze del materiale effettuando una stagionatura ad umido (UR>95%) degli stessi provini. In tal modo gli effetti del ritiro sono stati annullati già con il provino senza fibre e oltretutto, stagionandolo ad umido le resistenze a flessione sono aumentate rispetto

alla stagionatura all'aria. Tuttavia, aggiungendo ad esso le fibre ottonate la resistenza a flessione non mostra miglioramenti. Questo può essere spiegato col fatto che all'aumentare del volume di fibre il provino espande a causa della reazione tra zinco e acqua che libera gas, di conseguenza si crea una decoesione del materiale tale da far sì che la struttura non sia tale da rimanere confinata ed avere una compressione che aumenta all'aumentare delle fibre, poiché i valori sono tutti pressoché uguali.

In conclusione, la soluzione potrebbe essere non quella di usare il massimo quantitativo di fibre ottonate (poiché il materiale espande di più e ne risente in termini di prestazioni meccaniche) ma quella di utilizzare un quantitativo di fibre inferiore e più agente espansivo per contrastare sia il ritiro che migliorare le prestazioni soprattutto in termini di flessione.

Tuttavia, data la reazione chimica che si genera in presenza di ottone, la soluzione ottimale con tale tecnologia sarebbe quella di non usare fibre metalliche dritte ottonate, utili per la formazione del calcio idrozincato (CHZ) che aumenta l'adesione tra fibre e pasta di cemento avendo migliori prestazioni, ma ricorrere a fibre metalliche non ottonate o con una forma geometrica diversa.

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.Collepari, 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*.

Ringraziamenti

Giunti al termine di questo percorso è opportuno ringraziare principalmente la mia famiglia che mi ha dato l'opportunità di raggiungere tale traguardo. Ringrazio la professoressa Valeria Corinaldesi che mi ha permesso di studiare approfonditamente un materiale essenziale nella vita di un ingegnere.

Ringrazio oltretutto nonni, zii, amici per esserci sempre stati, in particolar modo Davide un amico prima di un cugino che ha contribuito più di tutti ad essere quello che sono.