



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
Facoltà di Ingegneria

---

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

**Comportamento a flessione di calcestruzzi UHPFRC  
sottoposti a carichi statici e ciclici**

**Bending behaviour of Ultra High Performance Fiber  
Reinforced Concrete (UHPFRC) under static and cyclic  
loads**

*Relatore:*  
Prof.ssa Ing. Valeria Corinaldesi

*Tesi di Laurea di:*  
Alessandro Marchegiani

---

Anno Accademico 2020-2021

# Indice

1.	Introduzione .....	4
1.1	Generalità .....	4
1.2	Finalità e benefici dei calcestruzzi ad altissime prestazioni.....	6
1.3	Ambiti applicativi degli UHPFRC .....	8
1.4	Quadro di riferimento normativo .....	12
2.	Composizione tipica degli UHPFRC .....	15
2.1	Tecnologia degli UHPFRC .....	15
2.2	Cemento .....	16
2.3	Aggregati.....	18
2.4	Fumi di silice.....	19
2.5	Ruolo degli additivi.....	20
2.6	Fibre .....	22
3.	Proprietà meccaniche e chimico-fisiche degli UHPFRC.....	25
3.1	Comportamento a compressione .....	25
3.2	Comportamento a trazione .....	26
3.3	Durabilità.....	28
3.4	Stagionatura.....	29
4.	Fase sperimentale.....	31
4.1	Materiali utilizzati .....	31
4.2	Mix-design .....	34
4.3	Fasi operative .....	35
4.4	Misurazione e identificazione dei provini.....	36
4.5	Prova di flessione su quattro punti statica e ciclica.....	37
5.	Risultati e discussione.....	42
5.1	Prova di flessione statica su quattro punti.....	42

5.1.1	Discussione dei risultati .....	52
5.2	Caratterizzazione della tenacità flessionale.....	56
5.2.1	Discussione dei risultati .....	59
5.3	Prova di flessione ciclica su quattro punti.....	61
5.3.1	Discussione dei risultati .....	72
6.	Conclusioni .....	76
6.1	Possibili sviluppi .....	77
	Bibliografia .....	79
	Ringraziamenti .....	81

## Sommario

Gli UHPC (Ultra High Performance Concrete) sono calcestruzzi ad altissime prestazioni che presentano una migliore risposta meccanica rispetto ai calcestruzzi tradizionali. La nascita degli UHPC è molto recente ed il loro primo impiego è da datarsi alle fine degli anni '90, dapprima in Francia e successivamente negli USA. Tale materiale rientra nella categoria dei materiali cementizi innovativi e nasce per ovviare alle problematiche connesse all'impiego dei calcestruzzi ordinari soprattutto in termini di scarsa duttilità e durabilità. Gli UHPC infatti, presentano una microstruttura ottimizzata, con un basso grado di imperfezioni e impurità, in grado di consentire una durabilità assai migliore rispetto ai materiali cementizi ordinari riducendo drasticamente i costi di manutenzione delle strutture e mitigando gli impatti ambientali propri del normale ciclo vitale di un manufatto in calcestruzzo ordinario.

Questa tesi è incentrata sullo studio di una particolare tipologia dei materiali sopra descritti, che sono gli UHPFRC (calcestruzzi ad altissime prestazioni fibrerforzati). In letteratura il termine UHPFRC sta ad indicare un materiale a matrice cementizia con resistenza a compressione nell'ordine dei 150 Mpa o anche maggiore, contenente un certo quantitativo di fibre (che possono essere di diverso materiale), in questo caso di studio sono state utilizzate fibre metalliche. Questo materiale può essere trattato come la combinazione di tre tecnologie di calcestruzzo, ovvero: l'SCC (self compacting concrete), l'FRC (fiber reinforced concrete) e l'HPC (high performance concrete); rispetto ad un calcestruzzo ordinario è quindi caratterizzato da una elevata resistenza a compressione, maggiore resistenza a trazione, elevata duttilità e durabilità ed una buona capacità di lavorare in campo plastico.

Al fine di indagare le caratteristiche meccaniche e deformative di tale materiale sono stati realizzati, presso il Laboratorio di Materiali (Dipartimento SIMAU) dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona, una serie di provini di calcestruzzo di diverse dimensioni e con differenti dosaggi di fibre. Con questa metodologia si sono potute mettere in evidenza le differenze sostanziali nel calcestruzzo ad altissime prestazioni rinforzato con fibre e quello non rinforzato.

# 1. Introduzione

## 1.1 Generalità

Le opere in calcestruzzo sono state ampiamente costruite nell'antichità già dai romani come si evince dalle trattazioni di Vitruvio il calcestruzzo utilizzato dai romani (opus caementitium) era di differente composizione rispetto a quello attuale, era costituito da rottami di pietra o mattoni mescolati con calce, acqua e pozzolana vulcanica o cocchiopesto in sostituzione totale o parziale della sabbia comune. Il calcestruzzo utilizzato dai romani aveva la caratteristica di essere durabile nel tempo, rimanendo inalterato fino ai giorni nostri, esempi ne sono il Pantheon o l'acquedotto sul Pont du Gard, per avere questa durabilità misero in atto delle regole, come ad esempio: l'utilizzo di pozzolane vulcaniche o artificiali come il cocchiopesto (garantiscono durabilità), o ancora alleggerimento delle strutture con materiali come Tufo o Anfore in relazione ai carichi statici.

Con il passare degli anni, gli studi sul materiale hanno portato numerose innovazioni le quali hanno permesso ai progettisti di coniugare le esigenze funzionali degli edifici moderni e le problematiche connesse alla loro progettazione; grazie alle caratteristiche del materiale, quali: facilità di esecuzione, costi ridotti e versatilità di utilizzo in opera, è stato possibile realizzare opere architettoniche mai viste prima. Al contempo però parallelamente a questi vantaggi sono sorte anche problematiche dal punto di vista prestazionale, della durabilità e dell'eco sostenibilità che spesso hanno portato a far preferire altri materiali come ad esempio l'acciaio rispetto al calcestruzzo. Nel decennio 1980-1990 sono state condotte in Italia una serie di indagini su 142 strutture in c.a. ed il 70% di queste hanno evidenziato condizioni di degrado avanzato, attribuibili alle seguenti motivazioni: utilizzo di materiali facilmente attaccabili dagli agenti ambientali, confezionamento scadente del calcestruzzo, modalità di posa in opera scadente. Con l'intento di far fronte a queste problematiche negli anni a seguire vi è stata la nascita di un settore di ricerca con lo scopo di implementare le caratteristiche intrinseche del materiale e di migliorarne specificatamente le prestazioni meccaniche, la durabilità delle strutture e ridurre anche l'impatto ambientale. Per far ciò sono stati sviluppati nuovi additivi, aggiunte minerali e non, ed oltre a questi nuovi apporti vi è stato anche un attento studio per quanto riguarda i processi di stagionatura e soprattutto del mix design; tutto questo ha portato il calcestruzzo ad esprimere prestazioni sempre

più avanzate e diversificate, ampliando il campo di applicazioni di tale materiale. Si assiste così alla nascita dei calcestruzzi DSP (densified with small particles), termine coniato da Bache per il calcestruzzo con fumo di silice, proprio per sottolineare l'addensamento microstrutturale derivante dall'allocazione delle piccole sferette silicee tra i granuli di cemento, tale addensamento permette di avere un materiale meno poroso, quindi meno penetrabile dagli agenti corrosivi e meccanicamente più resistente, ma al tempo stesso, l'elevata area superficiale specifica (fino a 20/30 m<sup>2</sup>/g) fa aumentare enormemente la richiesta d'acqua per il confezionamento del calcestruzzo, questo inconveniente si "aggira" tramite l'utilizzo dei superfluidificanti i quali favoriscono un basso rapporto a/c. Anche i DSP presentano però dei limiti prestazionali, soprattutto nel comportamento deformazionale sotto sforzo, dati dal carattere fragile del materiale che presenta un'energia di frattura relativamente modesta; un altro limite è rappresentato dalla scarsa resistenza al fuoco perché l'impermeabilità della matrice cementizia impedisce al vapore acqueo, che si forma nel calcestruzzo ad alte temperature, di fuoriuscire finché non provoca l'espulsione (spalling) delle parti corticali del calcestruzzo.

Verso gli inizi degli anni '90 è stato fatto un ulteriore passo in avanti rispetto ai DSP, con gli studi di Richard e Cheyrezy i quali hanno introdotto delle innovazioni tecnologiche che hanno portato alla nascita degli RPC (reactive powder concrete) i quali si differenziano dai DSP sotto vari aspetti, quali:

- Cemento a basso tenore di C<sub>3</sub>A;
- Aggiunta di micro fibre metalliche;
- Assenza di aggregato grosso e presenza solo di polvere reattiva.

L'aspetto più caratterizzante dell'RPC non è tanto la maggiore resistenza meccanica a compressione (120 contro 200 N/mm<sup>2</sup>) e neanche la velocità di conseguimento di questa prestazione, quanto l'enorme aumento della duttilità del materiale sollecitato a trazione o flessione.

Sulla scia di questi studi negli anni sono state sviluppate e brevettate nuove tipologie di RPC; tra queste annoveriamo gli UHPFRC.

## **1.2 Finalità e benefici dei calcestruzzi ad altissime prestazioni**

Il calcestruzzo è il materiale da costruzione più utilizzato al mondo, con una produzione annua di circa 10 miliardi di m<sup>3</sup>, l'industria di tale materiale rappresenta circa l'8% del totale delle emissioni di CO<sub>2</sub> su scala globale, di cui il 90% attribuibile al cemento Portland. Consapevoli di questo impatto ambientale nasce l'interesse per i nuovi materiali da costruzione ed in particolare un approccio percorribile potrebbe essere quello di utilizzare calcestruzzo UHPFRC, il quale grazie alla sua eccezionale resistenza, durabilità e duttilità, porta ad una riduzione della quantità di calcestruzzo necessaria in opera, permettendo di progettare strutture più snelle, leggere e al tempo stesso più durabili e quindi anche con meno costi di manutenzione nel ciclo di vita utile della struttura.

Alcuni studi hanno mostrato i benefici ambientali della progettazione di ponti utilizzando UHPC invece del calcestruzzo ordinario; Habert et al (2013) hanno modellato il processo di riabilitazione di un ponte stradale con tre diversi sistemi; uno con calcestruzzo tradizionale con membrana impermeabilizzante, il secondo con UHPC e il terzo con un nuovo tipo di eco-UHPC. Hanno scoperto che le emissioni di CO<sub>2</sub> degli UHPC sono circa 5-6 volte maggiori rispetto a quelle di un calcestruzzo a resistenza normale, se si confronta la stessa quantità di materiale; tuttavia considerando il ridotto impiego di calcestruzzo per la minore dimensione delle sezioni e il miglioramento della vita utile dell'opera, l'impatto ambientale delle soluzioni UHPC ed eco-UHPC risulta inferiore rispettivamente del 60 e 72% rispetto alla soluzione con calcestruzzo tradizionale.

Il calcestruzzo UHPC è quindi un materiale con un costo unitario al m<sup>3</sup> più alto rispetto al calcestruzzo ordinario, ma i benefici sia in termini prestazionali che ambientali giustificano questo divario economico. Si riportano di seguito i principali benefici di un UHPFRC rispetto ad un calcestruzzo tradizionale:

- Assenza di fenomeni fessurativi (anche in ambiente caldo), impiego di aggiunte minerali ad attività pozzolanica che conferiscono resistenza negli ambienti aggressivi, con conseguenze positive in termini di vita utile delle strutture e notevole risparmio nei costi di manutenzione.

- Diminuzione dell'assorbimento di acqua, minore predisposizione alla diffusione di ioni cloruro e minore velocità di corrosione, grazie alla struttura compatta e meno porosa del materiale (utilizzo di fumo di silice e aggregato fine) e alla grande energia di frattura che evita il formarsi di lesioni.
- Resistenza a trazione e flessione notevolmente aumentata con conseguente diminuzione delle sezioni necessarie e dei costi (il contributo del calcestruzzo in fase progettuale nella zona tesa diventa un fattore da tenere in considerazione).
- Attenzione per l'ambiente grazie all'utilizzo di sottoprodotti industriali per l'attivazione chimica della matrice cementizia; l'utilizzo di aggiunte minerali quali fumo di silice, ceneri volanti e loppa d'altoforno microfine, rifiuti solidi recuperati da processi industriali, riducono il consumo energetico e le emissioni legate alla produzione di clinker;
- Risparmio in termini di tempi di realizzazione dell'opera e nei costi della manodopera, dovuti al minore impiego di armature metalliche (in particolare le staffe); risparmi anche in fase di trasporto ed assemblaggio grazie alla riduzione delle sezioni degli elementi strutturali e conseguente alleggerimento delle strutture;
- Comportamento post-fessurativo incrudente (aumento della duttilità) che garantisce una notevole tenacità a rottura e un ottimo comportamento a fatica sottoposto a carichi ciclici (maggiore resistenza alle sollecitazioni legate al vento, sisma o traffico veicolare).

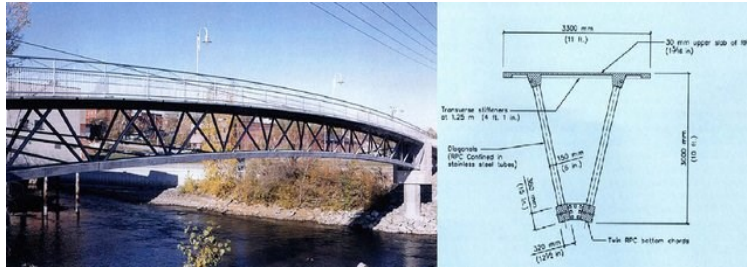


### **1.3 Ambiti applicativi degli UHPFRC**

Le eccellenti prestazioni messe in mostra dagli UHPC offrono nuove opportunità per opere infrastrutturali, costruzioni edili e molti altri mercati di nicchia con un numero sempre crescente di applicazioni osservate negli ultimi anni. Secondo la ricerca di mercato riportata da Grand View Research (GVR), la capitalizzazione di mercato globale degli UHPC è stata valutata nell'intorno dei 900 milioni di dollari nel 2016 ed è previsto un incremento secondo le stime fino a circa 1.9 bilioni di dollari nel 2025. Negli ultimi due decenni questo materiale ha attirato sempre di più l'attenzione mondiale grazie anche agli ingegneri ed accademici che hanno condotto ampi progetti di ricerca al fine di industrializzare la tecnologia degli UHPC come materiale da costruzione sostenibile; ad oggi in molti paesi nel mondo viene commercializzato come ad esempio, Australia e Nuova Zelanda, Austria, Canada, Stati Uniti; Germania, Francia, Italia, Giappone, Malesia, Paesi bassi ed altre nazioni; sia gli enti privati che quelli governativi stanno rivolgendo attualmente la loro attenzione e le loro iniziative per sviluppare gli UHPC come futuro materiale da costruzione sostenibile.

Una ricerca completa di letteratura ha identificato più di 200 ponti costruiti utilizzando UHPC in uno o più dei suoi componenti, questo materiale trova applicazione anche negli edifici, utilizzato come rinforzo strutturale o retrofitting di edifici in determinate zone a rischio, come dimostra uno studio dell'Università di Napoli, in cui è stato indagato il rischio vulcanico nell'area Vesuviana, con caduta di cenere e il fenomeno dei flussi piroclastici; vista la fenomenologia del sito è stata programmata una strategia di intervento per salvaguardare il patrimonio edilizio ed infrastrutturale attraverso il retrofit tecnologico della rete su ferro, tramite uso di UHPC i quali offrono plus prestazionali in risposta al rischio vulcanico.

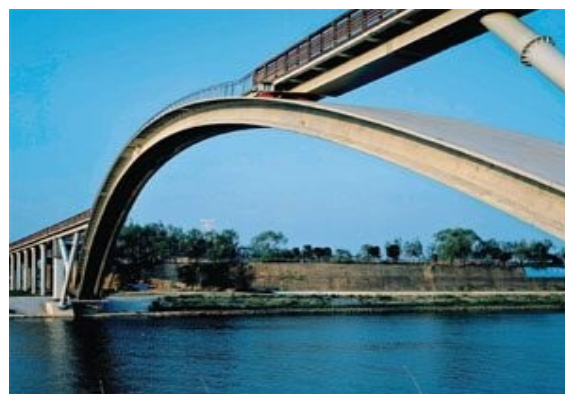
La prima opera al mondo con utilizzo di UHPC risulta essere il ponte pedonale ibrido sul fiume Magog a Sherbrooke, Canada (figura 1) costruito nel 1997, ha garantito al manufatto un'elevata durabilità in condizioni di esercizio non favorevoli (cicli di gelo e disgelo, sbalzi termici, acqua di condensa, ecc) permettendo inoltre al progettista una straordinaria libertà architettonica ed estetica.



*Figura 1 – ponte pedonale di Sherbrooke (Canada)*

Si tratta di una passerella con campata di 60 m composta da sei elementi prefabbricati assemblati in opera mediante post-tensione; la struttura portante è realizzata con una trave reticolare spaziale la quale garantisce elevate inerzia della sezione e al contempo una riduzione dei carichi permanenti. La soletta superiore ha uno spessore di soli 3 cm, larghezza di 330 cm ed è priva di armatura, è collegata a due travi disposte inferiormente realizzate da elementi tubolari in acciaio riempiti con RPC privo di fibre.

A seguito di questa prima realizzazione sono stati condotti diversi studi soprattutto in Francia, sulle varie tecnologie e sezioni da poter utilizzare attraverso questo materiale, ed a seguito di tali indagini nel 2002 è stato costruito il ponte pedonale “peace footbridge” a Seonyu, Corea del Sud (figura 2), caratterizzato da una campata di 120 m (costituita da 6 conchi prefabbricati assemblati e post-tesi in opera lunghi 20 metri e alti 1,3m) che fa di questo ponte pedonale il più lungo mai realizzato con UHPC.



*Figura 2 – footbridge of peace, (Corea del Sud)*

I calcestruzzi ad altissime prestazioni sono stati utilizzati a partire dal 2005 anche per ponti pedonali e ferroviari, è il caso del Mars Hill Bridge in Wapello County, Iowa (figura 3) costituito da un'unica campata di 33,50 metri formata da tre travi prefabbricate a doppio T, con cavi precompressi e senza armatura di rinforzo passivo. Altro esempio di ponte stradale costruito nello stesso anno è il Bourge les Valence, Francia (figura 4), la realizzazione con calcestruzzo ad altissime prestazioni ha reso possibile una riduzione dei rinforzi in acciaio del 90% e un conseguente alleggerimento della struttura del 65% rispetto a quello che si sarebbe ottenuto con un calcestruzzo tradizionale.



*Figura 3 – Mars hill bridge, Wapello County, Iowa (2005)*



*Figura 4 – Bourge-les-Valence, France*

Oltre queste applicazioni, nell'ultimo decennio grazie alle peculiarità di questo materiale altamente resistente, modellabile e con sezioni ridotte è stato possibile per i progettisti, realizzare nuove forme e volumi, molto appaganti anche dal punto di vista estetico, per componenti edilizi come ad esempio schermature, rivestimenti di edifici o componenti delle coperture. A tal proposito si menzionano: la struttura di copertura della pensilina della stazione Shawnessy LRT in Canada, caratterizzata da ridotti costi manutentivi, leggerezza della struttura e facilità di posa in opera; altro esempio è la Luis Vuitton foundation, Parigi; il rivestimento è composto da pannelli prefabbricati in UHPC attraverso degli stampi, caratterizzati da un'elevata complessità geometrica; un altro grande esempio è il Mucem, ovvero il Museo delle Civiltà dell'Europa e del Mediterraneo, situato nella zona del porto di Marsiglia, è il primo edificio al mondo a fare un uso così estensivo di UHPC. (fig. 5-6-7)



*Fig. 5 – RLT station, Shawnessy, Canada*



*Fig. 6 – Louis Vuitton Foundation, Parigi*



*Fig. 7 – Mucem, Marsiglia*

Da segnalare altre interessanti applicazioni degli UHPC dovute alle sue eccellenti proprietà, quali ad esempio interventi di recupero e miglioramento di porzioni di strutture in calcestruzzo ammalorate, significativo il retrofit dei muri di contenimento del reattore nucleare in Francia; diversi utilizzi sono stati riscontrati anche nelle aree marine, dove questo materiale denota grande resistenza agli agenti aggressivi.

#### **1.4 Quadro di riferimento normativo**

Dal punto di vista normativo il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) è una delle novità più interessanti introdotte dal D.M. 17/01/2018, il quale assegna finalmente a questo materiale lo status di “materiale da costruzione” da impiegare in usi strutturali. Le NTC definiscono il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) come “*caratterizzato dalla presenza di fibre discontinue nella matrice cementizia*” e stabiliscono che sia per la sua qualificazione che per la progettazione delle strutture in FRC, si dovrà far esclusivo riferimento a specifiche disposizioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Servizio Tecnico Centrale, rese attraverso apposite Linee Guida approvate nel 2019 con il testo della “*Linea guida per l’identificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)*”. Tale linea guida specifica che secondo le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) al punto 11.1, tutti i materiali e prodotti da costruzione, quando impiegati per uso strutturale, debbano essere identificati e in possesso di specifica qualificazione all’uso previsto e debbano altresì essere oggetto di controlli in fase di accettazione da parte del Direttore dei Lavori. A tal fine le NTC prevedono che i materiali ed i prodotti da costruzione per uso strutturale, quando non marcati CE ai sensi del Regolamento UE n.305/2011, o non provvisti di ETA (European Technical Assessment) ai sensi dell’art. 26 del Regolamento UE n.305/2011, debbano essere in possesso di un “*Certificato di Valutazione Tecnica*” rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale, sulla base di linee guida approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Nella sopracitata linea guida si asserisce che richiamando quanto previsto dalla Circolare esplicativa delle Norme tecniche (emanata nel 2019) al C 11.2.12, si precisa che un calcestruzzo fibrorinforzato ad uso strutturale, per essere definito tale, oltre ai

requisiti minimi prestazionali descritti nel seguito, deve essere caratterizzato da un dosaggio minimo delle fibre al suo interno “*non inferiore allo 0,3% in volume*”.

Per quanto riguarda la matrice cementizia di un FRC è costituita da un calcestruzzo o una malta. Al fine di garantire un buon accoppiamento con le fibre ed una buona lavorabilità dell’impasto, la granulometria della matrice deve essere progettata prestando particolare attenzione alla frazione fine dell’aggregato; le caratteristiche fisiche e chimiche della matrice cementizia e dei suoi costituenti devono essere conformi alle specifiche norme di riferimento valide per il calcestruzzo privo di fibre.

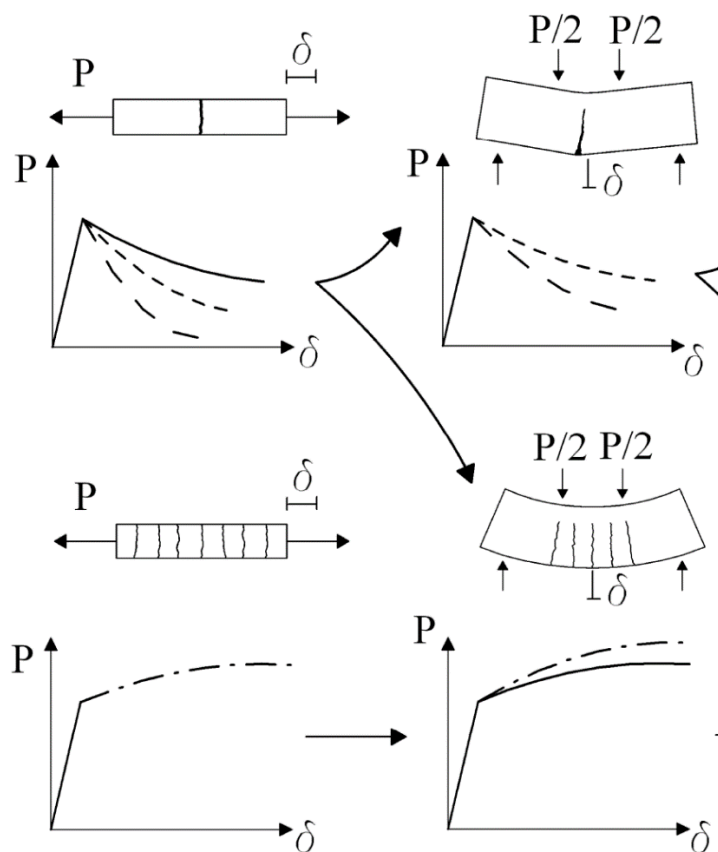
Le fibre invece sono caratterizzate, oltre che dal tipo di materiale, da parametri geometrici quali la lunghezza, il diametro equivalente, il rapporto d’aspetto (rapporto tra la lunghezza della fibra e diametro equivalente) e la forma. Le fibre devono essere marcate CE, in accordo con le norme europee armonizzate EN 14889-1 (per le fibre in acciaio) e EN 14889-2 (per le fibre in materiale polimerico). La linea guida specifica inoltre i parametri previsti dalla norma armonizzata EN 14889-2 come riportato in *tabella 1*; in aggiunta la confezione delle fibre deve riportare anche il lotto di produzione.

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

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

Un’altra novità riguarda il fatto che le Linee Guida ammettano che il comportamento post-fessurativo in trazione uniassiale possa essere diverso dal comportamento post-fessurativo in una prova di flessione. Per lo stesso motivo la capacità redistributiva della

struttura può garantire una risposta meccanica incrudente a partire da un comportamento in trazione uniassiale degradante, come esemplificato in Figura 8.



*Fig. 8 – Risposta meccanica di strutture caratterizzate da capacità redistributive differenti: trazione uniassiale e flessione.*

La prova utilizzata è quella di flessione su tre punti in accordo alle norme europee armonizzate EN 14651. Come tutte le norme per la qualificazione dei materiali, le Linee Guida specificano tutte le prove per la caratterizzazione meccanica e di durabilità del materiale.

## 2. Composizione tipica degli UHPFRC

### 2.1 Tecnologia degli UHPFRC

Con gli UHPFRC si ottengono ultra-prestazioni meccaniche, con oltre 150 MPa a compressione e oltre 35 MPa a flessione ed eccellente durabilità, grazie ad una composizione differente rispetto ad un calcestruzzo ordinario. La composizione tipica di un UHPFRC è data da: aggregati, acqua, cemento, aggiunte minerali, additivi e fibre. Questa miscela si differenzia in maniera netta da quella di un calcestruzzo convenzionale (tabella 2) per la selezione degli aggregati, ovvero non vi è presenza dell'aggregato grosso; per l'alto contenuto di cemento a basso tenore di C<sub>3</sub>A (oltre 700 kg/m<sup>3</sup>), e per il bassissimo rapporto acqua/cemento inferiore a 0,25. Altre caratteristiche della miscela oltre all'uso di fibre metalliche, sono: l'uso di additivi superfluidificanti che permette una riduzione della richiesta di acqua, l'utilizzo del fumo di silice che grazie al suo ridotto diametro va a riempire i vuoti tra aggregati e cemento così da ottenere un materiale denso ed estremamente compatto.

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

Tabella 2 – Esempio di composizione di un cls ordinario, un hpc ed un uhpc  
[Spasojevic 2008]

I principali componenti di un UHPFRC si possono raggruppare in tre parti:

- Un *premix*, che comprende la miscela granulare composta da cemento, fumo di silice e vari aggregati quali basalto o quarzo e sabbia; la finezza rende l'impasto omogeneo e compatto, il fumo di silice riduce la porosità migliorando le caratteristiche meccaniche e di impermeabilità.



- I *liquidi*, ovvero acqua e i superfluidificanti utilizzati per garantire la lavorabilità dell'impasto, poiché l'inerte, date le piccole dimensioni si aggrega durante la lavorazione dell'impasto;
- Le *fibre* metalliche che aumentano la resistenza a trazione e la duttilità del materiale, con un dosaggio superiore al 2% del volume.

I materiali costituenti vengono proporzionati attraverso un adeguato “mix design”, vale a dire la composizione del calcestruzzo, per far sì che venga ottimizzata la miscela granulare così da ottenere una matrice cementizia con trama finissima ed altamente omogenea. Dal punto di vista dimensionale i diametri più grandi sono quelli della sabbia fine (tra i 150 e i 600  $\mu\text{m}$ ), a seguire si ha il cemento (diametro medio 15  $\mu\text{m}$ ), il quarzo frantumato (diametro medio 10  $\mu\text{m}$ ) ed infine il fumo di silice (diametro tra 0.01 ed 1  $\mu\text{m}$ ); le fibre hanno un ordine di grandezza decisamente maggiore.

Si riportano brevemente di seguito alcune specifiche riguardanti i costituenti degli UHPFRC, mettendone in risalto le peculiarità per soddisfare i requisiti prestazionali di tale materiale.

## 2.2 Cemento

Se è vero che è impossibile produrre un calcestruzzo in assenza di uno dei suoi tre componenti principali, è anche vero che il cemento è il cuore del calcestruzzo; esso gioca il ruolo di protagonista al punto che tante opere in calcestruzzo sono spesso chiamate, in modo improprio, “opere in cemento”.

Le prestazioni del calcestruzzo nella fase esecutiva, e soprattutto in servizio, possono variare significativamente in funzione del cemento che si impiega, a tal proposito i calcestruzzi ad alta resistenza richiedono l'utilizzo di cementi ad alta resistenza meccanica. La normativa europea distingue, come è noto, tre classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici come riportato in Tabella 3, tratta dalla UNI EN 197-1 (2011).

Classe	Resistenza a compressione (N/mm <sup>2</sup> )			Tempo di inizio presa (min)
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata	
	2 gg	7 gg	28 gg	
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5    ≤ 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 3 – Resistenza meccanica a compressione per le classi di resistenza dei cementi*

Tutti i cementi conformi alla UNI EN 197-1 (2011) possono essere usati. Il numero (32.5 oppure 42.5) individua la soglia minima di resistenza meccanica a compressione in N/mm<sup>2</sup>, misurata a 28 giorni dal getto; la presenza del simbolo invece N o R sta ad indicare il comportamento del cemento alle brevi stagionature: per esempio sia il cemento di classe 32.5N che quello di classe 32.5R debbono superare a 28 giorni la resistenza meccanica di 32.5 N/mm<sup>2</sup>; tuttavia il cemento 32.5R (“R” sta per rapido) deve anche superare la soglia di 10 N/mm<sup>2</sup> a 2 giorni.

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 ( $C_3A$ ). 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.

## 2.3 Aggregati

Gli aggregati giocano un ruolo di fondamentale importanza nei calcestruzzi ad altissime prestazioni meccaniche, in quanto gli UHPFRC presentano un meccanismo di frattura del tutto diverso rispetto ad un calcestruzzo ordinario in quanto l'elemento debole del conglomerato non è più la pasta cementizia ma l'aggregato stesso. La premessa da fare riguardo l'inerte è che non tutti sono idonei alla produzione del calcestruzzo, esistono alcuni requisiti fondamentali (criteri di accettazione o di idoneità) senza i quali il calcestruzzo rischia di essere degradato anche se esposto in ambienti non aggressivi, inoltre vanno sottoposti a particolari analisi non solo dal punto di vista della granulometria ma anche di resistenza meccanica. Devono essere conformi con relativa certificazione CE, alla norma europea EN 12620 e ai requisiti minimi richiesti dalla UNI 8520-1 (2015) che descrive le prove da eseguire sugli aggregati e UNI 8520-2 che precisa i requisiti di accettazione.

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 UHPFRC è anche funzione di altri parametri connessi alla natura propria degli aggregati presenti nel premix; si è visto come la resistenza a compressione migliora quando il rapporto tra gli aggregati e cemento è pari a 1.1 e che l'utilizzo combinato di aggregati di diversa pezzatura migliora notevolmente le prestazioni di un UHPFRC 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  $\mu\text{m}$ ) che fungono al pari dei SF (fumo di silice) nel ruolo di filler e allo stesso tempo non hanno reazioni chimiche con il cemento. I diametri ridotti degli aggregati permettono non solo una posa in opera più agevole, ma anche il raggiungimento di una ottima omogeneità del calcestruzzo all'interno dei getti, evitando eventuali fenomeni di "blocking" nei punti più critici nelle sezioni dell'elemento strutturale, dove l'attraversamento del conglomerato tra i ferri d'armatura potrebbe portare ad una segregazione del calcestruzzo.

## 2.4 Fumi di silice

Come già accennato nei paragrafi precedenti, molti dei vantaggi ricavati dagli UHPC sono dovuti alla presenza nella matrice cementizia dei fumi di silice. Il fumo di silice (Silica Fume, SF o micro silice) si presenta in forma di microsferiche di colore grigio o bianco, con dimensioni prevalentemente al di sotto di 0,1  $\mu\text{m}$ , che presentano dal punto di vista chimico un alto contenuto di silice amorfa con piccole quantità di acciaio e magnesio; è un materiale capace di allocarsi, grazie alle ridotte dimensioni, negli interstizi che si creano tra i granuli di cemento. L'elevata complessità delle reazioni chimiche per la produzione, oltre ad una scarsa disponibilità e una forte richiesta dettata dalle ottime prestazioni fornite dal materiale, spiegano le ragioni per cui il prezzo del fumo di silice sia così elevato, circa dalle due alle otto volte il prezzo del cemento.

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);

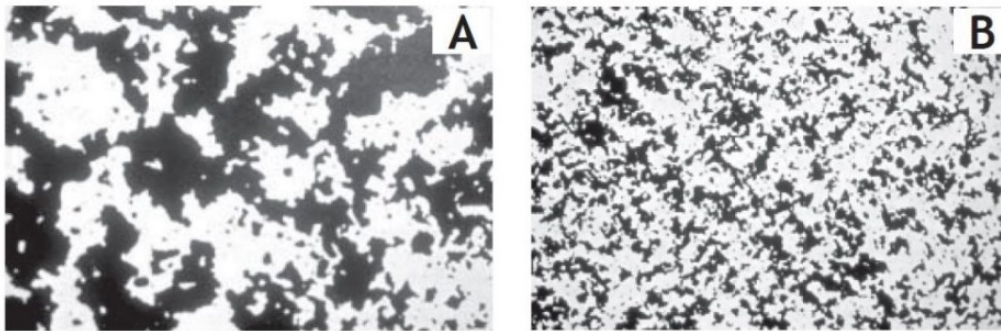
- reazione con la calce libera, creando gel di C-S-H maggiormente resistente;
- miglioramento della zona di interfaccia tra pasta di cemento e aggregati.

I vantaggi che ne derivano comportano sia l'incremento delle proprietà meccaniche (resistenza a compressione, flessione, modulo elastico, ecc) sia il miglioramento della durabilità (bassissima permeabilità all'acqua ed alta resistenza agli attacchi chimici). In particolare si è visto che: l'aggiunta di SF aumenta la resistenza a compressione a 28 giorni (Koksal et al, 2008) ; l'uso di SF migliora il legame tra fibre d'acciaio e matrice cementizia: le SF impiegate con dosaggi ottimali, si depositano sulla superficie delle fibre e ne aumentano la resistenza allo scivolamento e l'attrito, raddoppiando in tal modo l'energia di pull-out delle fibre (Chan et al, 2004).

## **2.5 Ruolo degli additivi**

È stato detto come dagli anni settanta in poi è stata determinante, per la nascita degli UHPC e più in generale degli RPC, la scoperta e lo sviluppo degli additivi fluidificanti e superfluidificanti, il loro utilizzo infatti risulta necessario a seguito dell'aggiunta di fumo di silice all'interno della matrice cementizia, il quale a seguito delle dimensioni finissime e dell'elevata area superficiale aumentano la richiesta d'acqua per la lavorabilità dell'impasto (Moser e Pfeifer, 2008).

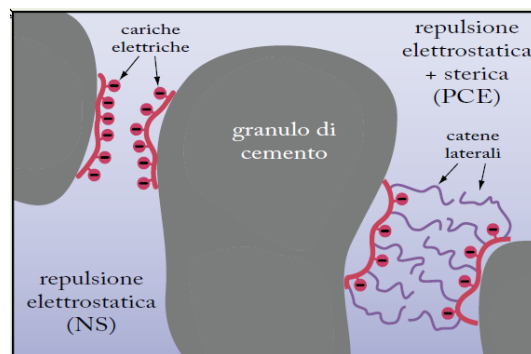
Tutti i superfluidificanti sono basati su polimeri idrosolubili, dapprima basati su polinaftalen-solfonati (PNS) poi più recentemente dal 1990 sono stati introdotti i policarbossilati o poli-acrilici. Il principale effetto di questi additivi sui granuli di cemento è il cosiddetto effetto *deflocculante*, ovvero provocare una dispersione dei granuli di cemento che tendono ad addensarsi in un mezzo acquoso (figura 8).



*Fig. 8 – Osservazione al microscopio di una pasta di cemento flocculata (A) ed una dispersa (B) grazie all'utilizzo di superfluidificante.*

In presenza quindi di additivi superfluidificanti, i granuli sono deflocculati, cioè dispersi, a seguito di uno dei due possibili meccanismi (Figura 9):

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



*Fig. 9 – Repulsione elettrostatica ed impedimento sterico*

## 2.6 Fibre

Con l'impiego di fibre è possibile modificare alcune proprietà del calcestruzzo dando vita a nuovi materiali con caratteristiche che non si riscontrerebbero nei calcestruzzi ordinari. Esistono diverse tipologie di fibre che hanno trovato impiego come rinforzo nei calcestruzzi e sono fibre di vetro, metalliche, di carbonio, polimeriche o materiale naturale (legno o cellulosa). L'aggiunta di fibre conferisce al calcestruzzo, dopo la fessurazione una significativa resistenza residua a trazione (tenacità), che è funzione di alcune caratteristiche proprie delle fibre e da parametri geometrici quali: lunghezza, forma, diametro equivalente e rapporto d'aspetto.

Per quanto riguarda la *lunghezza delle fibre*  $l_f$ , intesa come la distanza tra le due estremità, è generalmente compresa tra i 6 e i 70 mm; la resistenza a trazione è normalmente compresa tra i 2400 MPa e i 3000 MPa. La *forma* può variare, possono essere schiacciate e rettilinee, o deformate con un uncino o una piccola testa all'estremità che migliora il legame tra fibre e matrice cementizia (Figura 10).

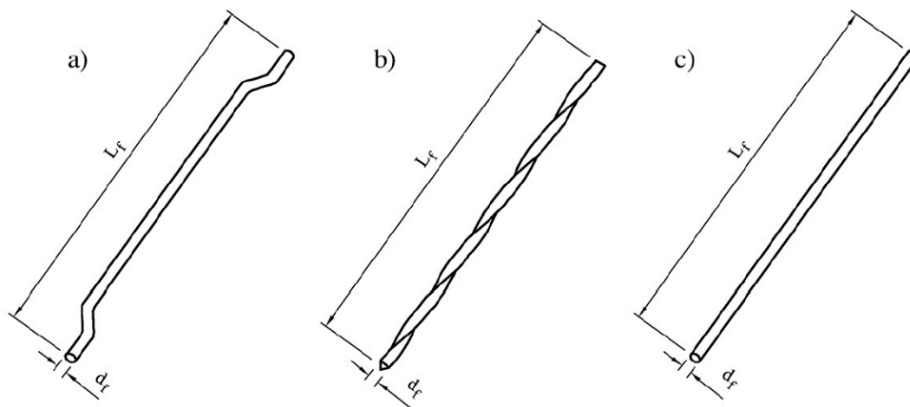


Figura 10 – Tipologie di fibre: a) fibra uncinata; b) fibra ondulata; c) fibra rettilinea e liscia.

Il *diametro equivalente*,  $d_f$  è compreso tra 0,1 mm e 1,2 mm; il *rapporto d'aspetto* invece viene definito come il rapporto tra la lunghezza della fibra e il suo diametro equivalente, l'aderenza è funzione proprio del rapporto d'aspetto, da cui dipende la funzione di cucitura che ha le fibre sul conglomerato.

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 (Figura 11a); 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 micro-fessurazione diffusa del composito. Questo fenomeno conferisce al materiale un comportamento "hardening", ovvero incrudente (Figura 11b), con conseguente aumento dell'energia assorbita e, quindi, della duttilità.



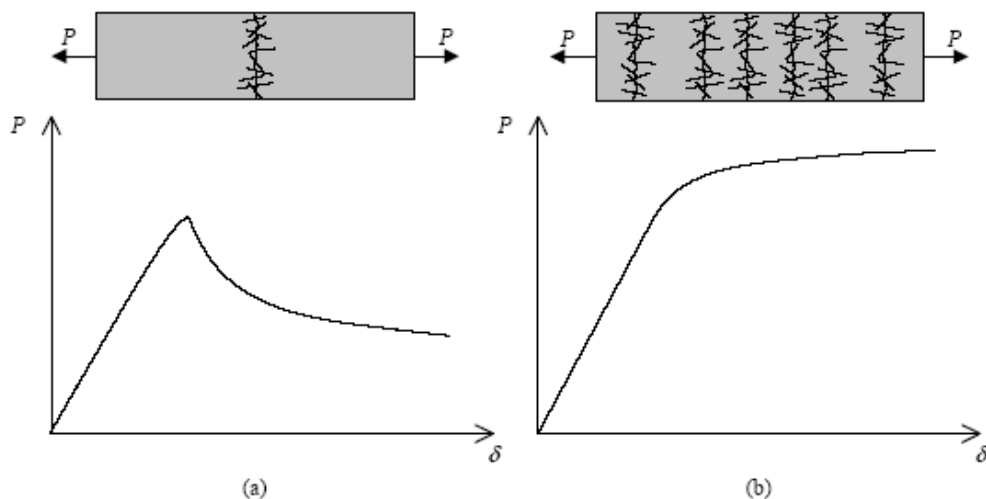


Figura 11 – Comportamento “softening” (a) e “hardening” (b)

Se si vuole che un materiale cementizio fibroso abbia un comportamento hardening, come quello della Figura 10b, è necessario che il volume di fibre disperso nella matrice superi un “volume critico”. Questo rappresenta quindi quel volume di fibre che, dopo la fessurazione della matrice, può sopportare tutto il carico che precedentemente gravava sul composito.

L’efficacia del rinforzo con fibre è funzione del dosaggio e del rapporto d’aspetto. Per quanto riguarda il dosaggio di fibre questo deve essere tale da garantire una presenza continua del rinforzo all’interno della matrice cementizia. Le varie norme prevedono i seguenti dosaggi minimi:

- CNR DT 204/2006: percentuale volumetrica minima di fibre pari al 0,3%;
- UNI 11039: dosaggio minimo di fibre di acciaio pari a  $25 \text{ kg/m}^3$  (0,32% in volume).

A parità di composizione e di dosaggio, l’efficacia delle fibre migliora al crescere del rapporto d’aspetto. Infatti con l’aumentare del rapporto d’aspetto cresce l’aderenza tra i due materiali e di conseguenza migliorano le prestazioni del rinforzo fibroso, in quanto le fibre sollecitate a trazione tendono a sfilarsi più difficilmente. L’adesione migliora anche in funzione della forma della fibra, quelle con estremità uncinata o piegate consentono di massimizzare l’ancoraggio della fibra nella matrice.

### 3. Proprietà meccaniche e chimico-fisiche degli UHPFRC

#### 3.1 Comportamento a compressione

Le prestazioni meccaniche a compressione di un UHPC sono funzione del miglioramento della microstruttura della matrice cementizia ed è quindi opportuno a tal proposito analizzare in un primo momento il comportamento meccanico di un UHPC senza fibre il quale ha già delle differenze notevoli rispetto ai calcestruzzi ordinari e a quelli ad alta resistenza.

Infatti un calcestruzzo UHPC è in grado di garantire una resistenza a compressione a 28 giorni pari o superiore ai 150 MPa; la figura 11 (Tue et al. 2004) illustra una tipica risposta a compressione di un UHPC senza fibre confrontato con un NSC (36 MPa) e con un HSC (96 MPa), sia in termini di deformazioni assiali che longitudinali.

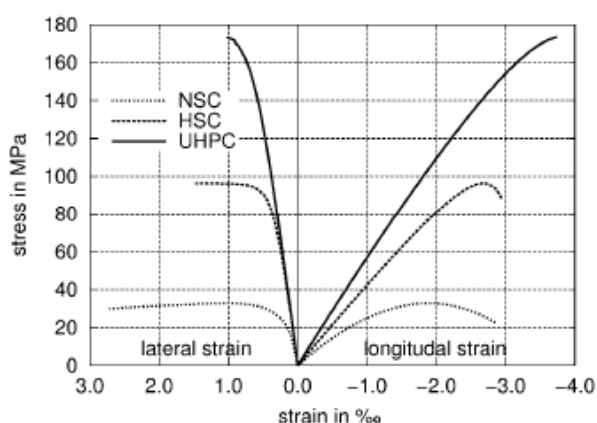


Figura 12 – confronto del comportamento a compressione tra NSC, HSC ed UHPC (senza fibre).

Si nota innanzitutto il comportamento prevalentemente elastico lineare del materiale, superata una soglia del 70/80% della capacità resistente a compressione c'è una perdita di linearità, in funzione di alti valori di deformazione assiale, intorno allo 0,4% per i compositi con aggregati fini. Inoltre altra evidenza importante il materiale manifesta una rottura estremamente fragile, di natura esplosiva, e non presenta ramo discendente.

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 a trazione**

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

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

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

L'approccio ideale (Figura 12) distingue il comportamento a trazione in tre differenti rami:

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

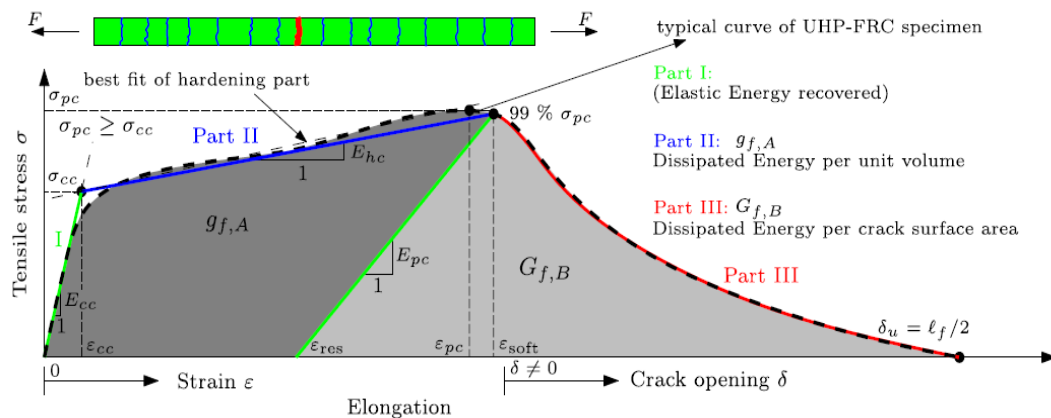


Figura 12 - Comportamento ideale, incrudente positivo di un UHPFRC sottoposto a carico di trazione (Wille and Naaman 2013)

Secondo il modello ideale, nella parte 2, si verifica la multifessurazione 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 macrofessura 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

I materiali cementizi innovativi ad altissime prestazioni si presentano quindi con proprietà migliorate rispetto ai calcestruzzi tradizionali, e non solo dal punto di vista meccanico ma soprattutto per quanto riguarda la loro durabilità; il nuovo materiale si propone come maggiormente ecologico dato che i componenti (aggregati, acqua e aggiunte minerali) sono utilizzati al loro massimo al fine di produrre un materiale che presenti un ciclo di vita nettamente più lungo rispetto ai calcestruzzi ordinari.

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 Stagionatura

Per far sì che il calcestruzzo abbia una corretta idratazione e quindi possa maturare in modo tale che raggiunga le specifiche prestazionali prefissate dal progettista, è necessario uno stretto monitoraggio della stagionatura con opportuni accorgimenti.

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

La stagionatura di un UHPC è alquanto differente rispetto a quella di un calcestruzzo ordinario a causa, del differente comportamento di ritiro. Se l'UHPC non viene da subito stagionato nell'acqua, è incline a sviluppare un discreto ritiro plastico dato che non è protetto dall'acqua di bleeding e successivamente può sviluppare un notevole ritiro autogeno dovuto per lo più alla rapidità con cui avviene l'idratazione. Mentre la membrane utilizzate per la stagionatura provvedono a fornire una adeguata protezione per il calcestruzzo ordinario, nell'UHPC possono soltanto prevenire il fenomeno del ritiro plastico ma non riescono ad inibire quello autogeno. Il periodo critico per questi conglomerati inizia dalla posa in opera fino a 2-3 giorni dopo, tra le 12 e le 36 ore. Applicare acqua nebulizzata al getto, per il breve periodo consigliato, è di importanza notevole; in modo particolare si deve essere consapevoli che possono esserci conseguenze anche drammatiche alla mancata somministrazione di acqua durante l'iniziale processo di maturazione. Iniziare la stagionatura ad acqua dopo 24 ore risulta essere deleterio e tardivo, dato che sono già iniziati sia il ritiro plastico sia quello autogeno e la rete di capillari e pori risulta essere disconnessa in molti punti e la microstruttura è già compatta al punto tale che l'acqua esterna non ha alcuna possibilità di penetrare in profondità nel materiale.

La migliore stagionatura dell'UHPC avviene mediante inondamento e nebulizzazione: uno di questi due metodi dovrebbe essere utilizzato il prima possibile, immediatamente dopo la posa in opera o la finitura. Se, per qualsiasi ragione, non è possibile attuare né l'inondamento né la nebulizzazione per un periodo di 7 giorni, allora la superficie del

calcestruzzo deve essere coperta con una tela umida o preferibilmente con un tessuto organico (geotessile) precedentemente bagnato, l'importante è mantenerlo sempre umido. Inoltre, è stato osservato che quando un qualsiasi calcestruzzo viene sottoposto a stagionatura all'acqua durante la presa, non si ritira ma piuttosto si gonfia.

La stagionatura ad acqua può essere interrotta dopo 7 giorni poiché la gran parte del cemento presente sulla superficie del calcestruzzo è stato idratato e quindi non possono essere ricavati ulteriori vantaggi da tale operazione.

## **4. Fase sperimentale**

Col presente capitolo si vuole descrivere nel dettaglio l'attività sperimentale condotta presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, e nel Laboratorio di Progettazione Meccanica e Costruzione di Macchine del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona.

Ad oggi sono presenti alcune raccomandazioni, linee guida o direttive riguardanti il comportamento a fatica degli UHPC, come ad esempio il fib model code 2010, o le French Standards, tuttavia la quasi totalità di questi documenti prende in considerazione il comportamento a fatica del composto sottoposto a compressione solo una piccola parte prende in considerazione la risposta a flessione.

Con tale premessa la sperimentazione svolta si pone l'obiettivo di caratterizzare dal punto di vista meccanico, con riferimento alla norma UNI EN 1015-11, provini di materiale UHPFRC di diverse dimensioni, ed additivati con diversi dosaggi di fibre lisce non uncinato in acciaio rivestite in ottone. Sono state eseguite una serie di prove a flessione su quattro punti, con lo scopo di valutare come le differenti percentuali di dosaggi di fibre influenzano la risposta del provino stesso alla somministrazione di carichi statici e ciclici. Dopo una prima parte in cui si illustrano i materiali impiegati e la preparazione dei provini, verrà riportata nel dettaglio la descrizione delle prove eseguite.

### **4.1 Materiali utilizzati**

Di seguito vengono riportati i materiali impiegati nella sperimentazione per il confezionamento dei provini.

- Il cemento utilizzato (Figura 13), CEM I 52,5 R, è un cemento Portland commerciale, avente requisiti in accordo con la norma EN 197-1 e la composizione riportata in Tabella 4



Tabella 4 – Composizione CEM I 52,5 R

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



Figura 13 – CEM I 52,5 R

- Gli additivi utilizzati sono i seguenti: DRACRIL P16S, additivo superfluidificante policarbossilico di ultima generazione per migliorare la lavorabilità dell'impasto ed evitare i rischi di segregazione della miscela; additivo antischiuma chimico che riduce e ostacola la formazione di schiuma e bolle d'aria durante la miscelazione. In aggiunta a questi sono stati utilizzati anche un agente espansivo (Figura 15) e un additivo antiritiro (SRA shrinkage reducing admixture, Figura 16), in quanto nelle prime 24/36 ore i calcestruzzi ad altissime prestazioni tendono a presentare un forte ritiro, usati insieme evitano la formazione del ritiro poiché l'agente espansivo fa espandere il materiale ritardando il tempo in cui si contrae e quindi l'innescarsi della contrazione e conseguente fessurazione.



Figura 15 – agente espansivo



*Figura 16 – additivo antiritiro*

- Gli aggregati utilizzati sono di due tipologie: sabbia di quarzo Po 0\1 (Figura 17), di granulometria compresa tra 0-1 mm e sabbia di quarzo con granulometria compresa tra 0,5-1,1 mm.



*Figura 17 - Sabbia 0/1 Po*

- Il fumo di silice (SF) utilizzato (fig. 18), è un sottoprodotto dell'industria del silicio e delle leghe metalliche ferro-silicio, si presenta sotto forma di sferette con dimensioni comprese tra 0,01 e 1  $\mu\text{m}$ , cioè circa 50-100 volte più piccole di quelle del cemento, queste ridotte dimensioni fanno sì che le sferette di fumo di silice si allocano negli interstizi dei granuli di cemento con il risultato di ottenere un sistema meno poroso, più densificato, e quindi meccanicamente più resistente oltreché impenetrabile da qualsiasi agente aggressivo. D'altro canto però l'elevata area superficiale specifica di questo materiale (fino a 20-30  $\text{m}^2/\text{g}$ ) fa aumentare di molto la richiesta d'acqua e per non comprometterne tutti i vantaggi del suo utilizzo è necessario l'impiego di additivi superfluidificanti.



*Figura 18 - Fumo di silice*

- Le fibre utilizzate (Figura 19) sono micro fibre d'acciaio rivestite in ottone, lisce, non presentano estremità piegate o uncinata, di lunghezza  $l_f$  13 mm ed un diametro  $\Phi_f$  di 0,2 mm ed un rapporto d'aspetto ( $l_f / \Phi_f$  ovvero rapporto tra lunghezza della fibra e il suo diametro equivalente)



*Figura 19 - Fibra in acciaio rivestita di ottone*

## **4.2 Mix-design**

Il mix-design è letteralmente il “progetto della miscela”, o meglio è “il calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste al materiale (lavorabilità, res. Meccanica, durabilità, ecc.) e dalle caratteristiche delle materie prime”. Non esiste un codice da seguire per un mix design ottimale, ma piuttosto si basa su correlazioni sperimentali esistenti tra la composizione del calcestruzzo, da una parte, e le prestazioni del calcestruzzo e le caratteristiche delle materie dall'altra.

Nel caso di studio sono stati realizzati 2 diversi impasti, aventi stessa composizione ma diverso dosaggio di fibre. Si riporta in Tabella 5 la mix proportion (cioè la “ricetta”) con i dosaggi, in kg/m<sup>3</sup> dei vari ingredienti.

*Tabella 5 – Mix proportion UHPFRC (Kg/m<sup>3</sup>)*

<b>campione</b>	<b>CEM I 52.5R</b>	<b>acqua</b>	<b>sabbia 0/1</b>	<b>sabbia 0.5/1.1</b>	<b>fumo di silice</b>	<b>WRA</b>	<b>SRA</b>	<b>EA</b>	<b>AF</b>	<b>fibre</b>
<b>UHPFRC_1</b>	720	240	410	945	100	10	9	25	6	78
<b>UHPFRC_2.5</b>	720	240	410	945	100	10	9	25	6	195

### 4.3 Fasi operative

I provini sono stati realizzati secondo la seguente procedura:

- Pesate dei vari componenti in base alle proporzioni riportate nella tabella 5;
- Una volta pesati tutti i componenti “secchi”, ovvero quelli del premix (escluse fibre e acqua), il tutto è stato inserito in un miscelatore da 5l (Figura 20), fino all’ottenimento di un impasto omogeneo ed uniforme. Le fibre aggiunte come ultime componenti, devono essere distribuite omogeneamente all’interno dell’impasto, non deve esserci accumuli di fibre, per cui bisogna assicurarsi anche manualmente se necessario con una sessola che la distribuzione sia ottimale.



*Figura 20 – Miscelatore da 5l*

- Getto all'interno degli appositi casseri metallici precedentemente trattati con disarmante per facilitare la successiva scasseratura dei provini.
- Rasatura e compattazione tramite tavola vibrante, per circa dieci secondi;



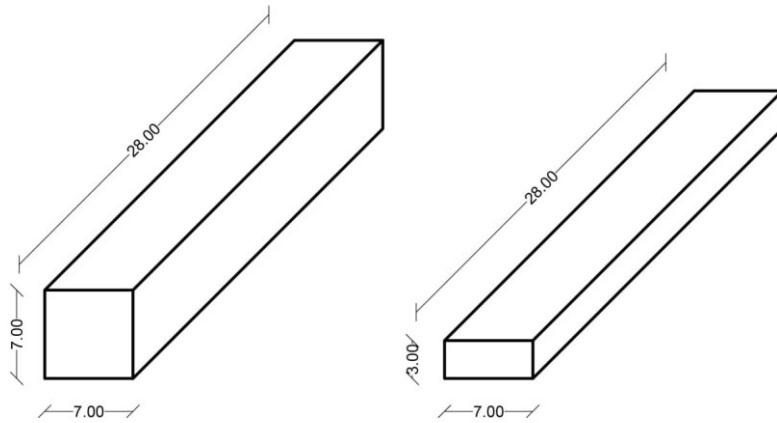
*Figura 21 – Getto della miscela negli appositi casseri*

- I provini sono poi stati ricoperti con uno strato di pellicola impermeabile per evitare il fenomeno di essudazione dell'acqua e conseguente ritiro;
- Disarmo dei provini dopo 24 ore dal getto, in condizioni di 20 °C e 65% UR; con successiva maturazione in acqua per 28 giorni.
- Prima di effettuare i test, ai provini è stata applicata della vernice con spray di colore nero e bianco al fine di migliorare l'identificazione della successiva multi-fessurazione del provino mediante la tecnica DIC (digital image correlation).

#### **4.4 Misurazione e identificazione dei provini**

Sono stati realizzati otto provini per ognuno degli impasti riportati in tabella 5, per un totale di sedici provini: otto provini di dimensioni  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ , quattro dei quali con un contenuto all'1% in volume di fibre, e gli altri 4 con il 2,5% in volume di fibre; i restanti otto provini di dimensioni  $3 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ , anch'essi quattro realizzati con l'1% di fibre e gli altri quattro con il 2,5% di fibre.

Per chiarezza si riportano in figura 22 la geometria e le dimensioni delle due tipologie di provini realizzati.



*Figura 22 – Provini 7x7x28 cm<sup>3</sup> e 3x7x28 cm<sup>3</sup>*

#### **4.5 Prova di flessione su quattro punti statica e ciclica**

In questo capitolo sono descritte nel dettaglio la strumentazione, la tipologia delle prove e la modalità con cui tali prove sono state eseguite.

I provini, sia i 7x7x28 cm<sup>3</sup> che i 3x7x28 cm<sup>3</sup> sono stati sottoposti a prova di flessione su quattro punti, in controllo di spostamento, 1 mm/min; con carico montono per quanto riguarda la prova statica; con cicli di scarico e ricarica ogni 0,5 mm per quanto riguarda la prova ciclica; attraverso l'utilizzo del macchinario Zwick/Roell Z050 (Figura 23) presso il Laboratorio di Progettazione Meccanica e Costruzione di Macchine del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona.



*Figura 23 – Macchina Zwick/Roell Z050 utilizzata per la prova di flessione*

Il setup di prova è costituito da una base di acciaio dove poter poggiare il provino su due punti, distanti 24 cm l'uno dall'altro (Figura 24), e una parte superiore costituita da un punzone metallico che applica la pressione al provino su due punti, il loro interasse è di 8 cm. I dettagli del setup di prova sono riportati in figura 25.



Figura 24 – Dettaglio setup di prova e base di appoggio

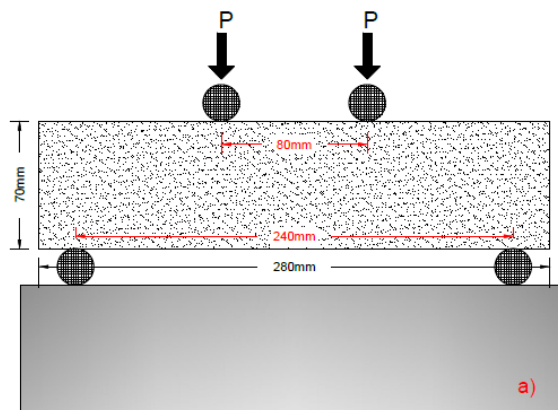


Figura 25 – Dimensioni delle componenti del setup di prova

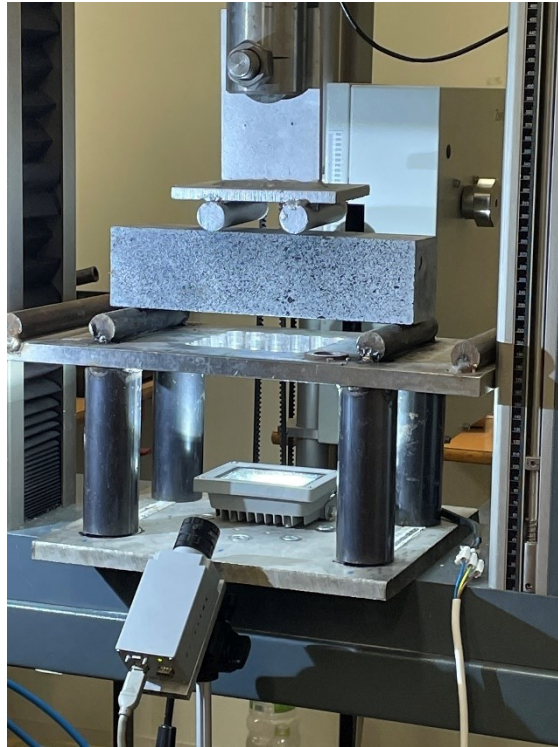
Sono state installate due fotocamere digitali (modello Pixelink B371F) a due frame al secondo, per catturare le immagini della superficie frontale dei provini; le fotocamere sono dotate di un obiettivo avente una lunghezza focale di 16 mm, sono state posizionate a circa 1 m di distanza dal campione di prova (Figura 26) al fine di ridurre gli errori prospettici dovuti ad eventuali movimenti fuori piano.



Il campione è stato illuminato utilizzando un faretto a led, permettendo una più nitida visione dell'innescarsi delle fessurazioni nel provino; in aggiunta alle altre due è stata posizionata una terza telecamera (Figura 27) posta poco sotto il provino, utilizzata per monitorare con maggiore dettaglio la propagazione delle cricche di frattura sulla superficie inferiore dei provini. Il posizionamento delle tre videocamere è studiato appositamente per controllare l'andamento fessurativo e deformativo del provino tramite la tecnica denominata DIC. La DIC (*Digital Image Correlation*) è una tecnica di misura senza contatto, utile alla stima degli spostamenti e delle deformazioni. Il suo funzionamento si basa sull'elaborazione di immagini digitali acquisite ritraendo l'oggetto da esaminare nelle diverse condizioni di sollecitazione. I punti di forza della DIC risiedono, oltre che nella relativa semplicità dell'acquisizione dei dati, nella sua capacità di fornire una misurazione particolarmente densa e nella possibilità di analizzare campi di spostamenti/deformazioni anche ingenti se comparati con i tradizionali metodi di misura. Per consentire questa metodologia di osservazione ogni provino è stato spruzzato con uno spray bianco e nero che facilita l'individuazione delle cricche e delle deformazioni.



*Figura 26 – Posizionamento videocamere nel setup*



*Figura 27 – dettagli fotocamera ravvicinata, faretto led e posizionamento provino*

Una volta posizionate le videocamere ed i faretti, ogni provino è stato installato attentamente secondo il setup di prova. Prima di ogni prova, è stata applicata una leggera pretensione ed il provino è stato posizionato e centrato manualmente con cura per cercare il miglior allineamento del provino con l'asse della traversa mobile. La prova è stata eseguita in controllo di spostamento ad un valore costante pari a 1 mm/min. Durante il test, sono state misurate la forza applicata mediante apposito trasduttore e lo spostamento della traversa mobile.

## 5. Risultati e discussione

In questo capitolo vengono riportati i dati ed i grafici ottenuti con le prove di laboratorio descritte nel capitolo precedente, nonché una dettagliata esposizione dei risultati delle stesse al fine di caratterizzare ogni evidenza scientifica riscontrata.

### 5.1 Prova di flessione statica su quattro punti

Come già indicato nel capitolo precedente la prova di flessione quasi statica su quattro punti è stata svolta su entrambe le tipologie di provini sia i  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$  che sui  $3 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ , con la configurazione di carico riportata in Figura 28 e 29; i campioni nella prova statica sono stati testati con un carico flessionale monotono fino al cedimento, le prove sono state svolte in controllo di spostamento ad  $1 \text{ mm/min}$ .

La prova è stata eseguita in ottemperanza alla norma 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*. I provini sono stati poggiati singolarmente e manualmente sulla base di appoggio facendo in modo che fossero ben allineati con la traversa di carico;

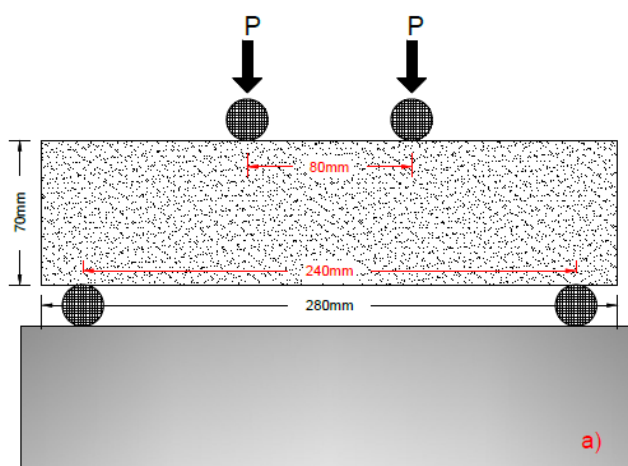


Figura 28 – schema di carico provino  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$

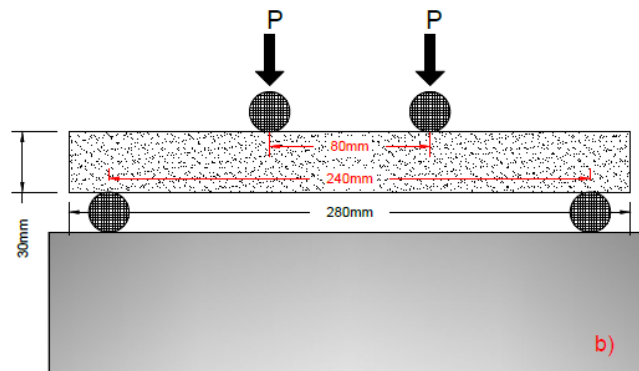


Figura 29 – schema di carico provino 3x7x28

La sollecitazione di carico a flessione ( $\sigma$ ) è stata calcolata come segue:

$$\sigma = \frac{F l}{b d^2}$$

In cui  $F$  è il carico a flessione (N),  $l$  è la luce della campata del supporto cioè l'interasse tra i due punti di appoggio alla base (280 mm nel caso in esame),  $b$  e  $d$  sono rispettivamente i valori di larghezza ed altezza del provino (in mm).

Di seguito si riportano le curve *sforzo-deformazione* ( $\sigma - \varepsilon$ ), derivanti dai risultati delle prove di flessione statiche su quattro punti. La relazione  $\sigma - \varepsilon$  è esposta con la forma di un diagramma x-y, in cui troviamo la deformazione lungo l'asse delle ascisse x e lo sforzo lungo l'asse delle ordinate y.

Ogni grafico è seguito poi da una tabella in cui vengono riportate: la tensione di prima fessurazione ( $\sigma_t$ ), cioè la tensione alla quale corrisponde la formazione della prima fessura nel provino; la resistenza massima a flessione ( $\sigma_{max}$ ) la quale si evince in modo grafico o attraverso i valori tabulati.

Si riporta in ogni tabella il valore dei due provini con stessi dosaggi e stesse dimensioni per ogni prova eseguita.

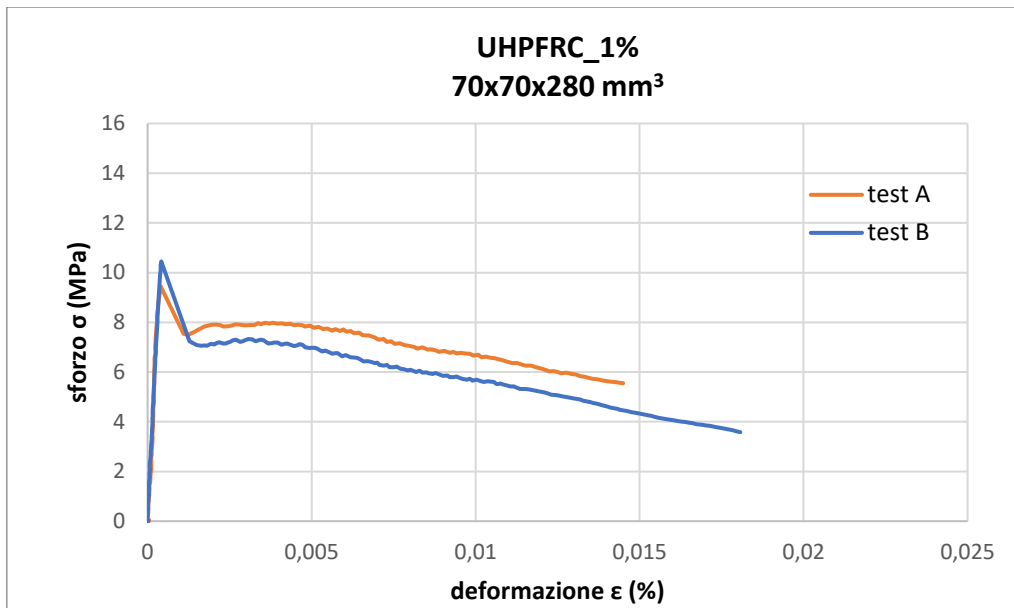


Figura 30 – Curva sforzo-deformazione campione 1% fibre 70x70x280 mm<sup>3</sup>

**RISULTATI PROVA A FLESSIONE STATICA**

dimensioni (mm)	campione	$\sigma_t$ (Mpa)	$\sigma_{max}$ (Mpa)
70X70X280	UHPFRC_1% test A	9,45	9,45
	UHPFRC_1% test B	10,45	10,45
	media	9,95	9,95

Tabella 6 – Risultati in termini di sforzo di prima fessurazione e sforzo massimo a flessione



a)



b)

*Figura 31 – a) dettaglio fessurazione vista laterale provino A 1% fibre; b) dettaglio fessurazione vista frontale provino B 1% fibre*



*Figura 32 – Frame durante la prova di carico statica con fotocamera ravvicinata dal basso provino A.*

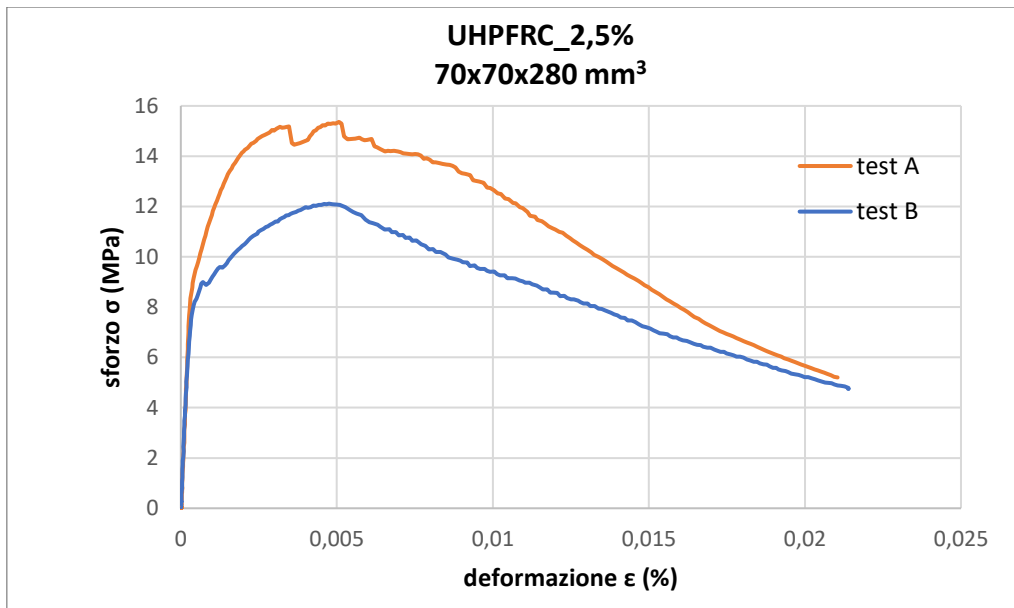


Figura 33 – Curva sforzo-deformazione provino 2,5% fibre 70x70x280 mm<sup>3</sup>

**RISULTATI PROVA A FLESSIONE STATICA**

dimensioni (mm)	campione	$\sigma_t$ (Mpa)	$\sigma_{max}$ (Mpa)
70X70X280	UHPFRC_2,5% test A	15,1	15,3
	UHPFRC_2,5% test B	8,9	12,1
	media	12	13,7

Tabella 7 – Risultati in termini di sforzo di prima fessurazione e sforzo massimo a flessione



**a)**



**b)**

*Figura 34 – a) dettaglio multifessurazione provino A 2,5% fibre vista laterale; b) dettaglio multifessurazione provino B 2,5% fibre vista laterale*



*Figura 35 – Inquadratura dal basso durante la prova di carico statica, dettaglio multifessurazione.*



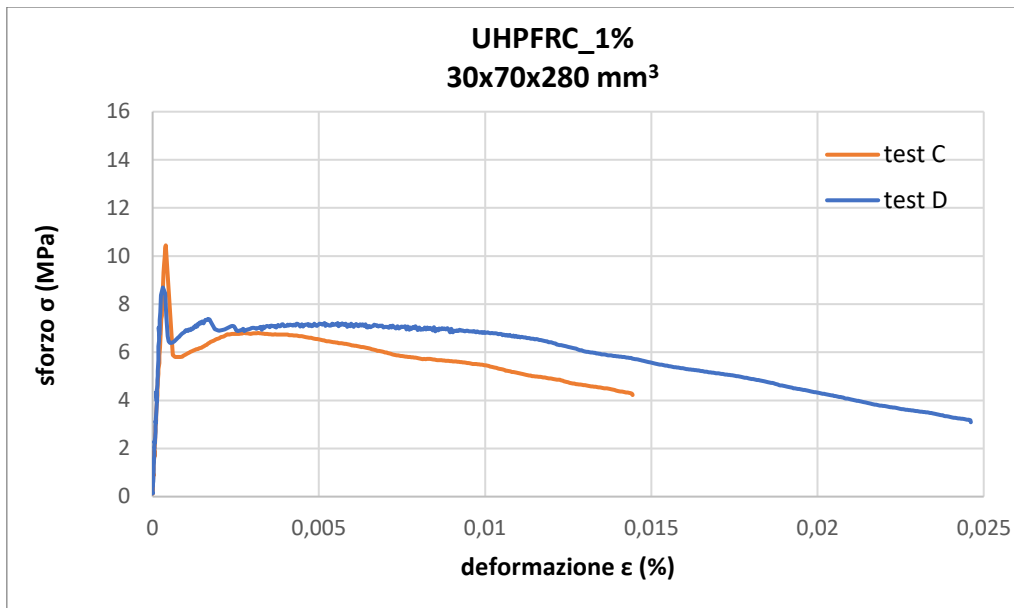


Figura 36 – Curva sforzo-deformazione provino 1% fibre 30x70x280 mm<sup>3</sup>

**RISULTATI PROVA A FLESSIONE STATICA**

dimensioni (mm)	campione	$\sigma_t$ (Mpa)	$\sigma_{max}$ (Mpa)
30X70X280	UHPFRC_1% test C	10,4	10,4
	UHPFRC_1% test D	8,7	8,7
	media	9,55	9,55

Tabella 8 – Risultati in termini di sforzo di prima fessurazione e sforzo massimo a flessione



**a)**



**b)**

*Figura 37 – a) vista laterale fessurazione provino C 1% fibre; b) vista frontale fessurazione provino D 1% fibre.*



*Figura 38 – formazione di singola fessura inquadratura dal basso ravvicinata provino C.*

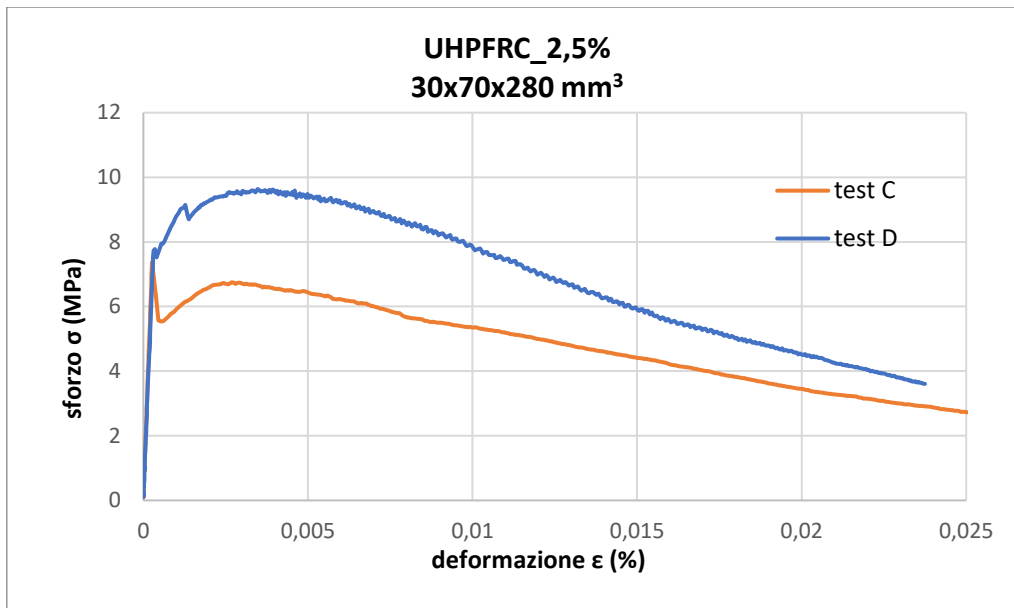


Figura 39 – Curva sforzo-deformazione provini 2,5% fibre 30x70x280 mm<sup>3</sup>

**RISULTATI PROVA A FLESSIONE STATICA**

dimensioni (mm)	campione	$\sigma_t$ (Mpa)	$\sigma_{max}$ (Mpa)
30X70X280	UHPFRC_2,5% test C	7,4	7,4
	UHPFRC_2,5% test D	7,8	9,6
	media	7,6	8,5

Tabella 9 – Risultati in termini di sforzo di prima fessurazione e sforzo massimo a flessione

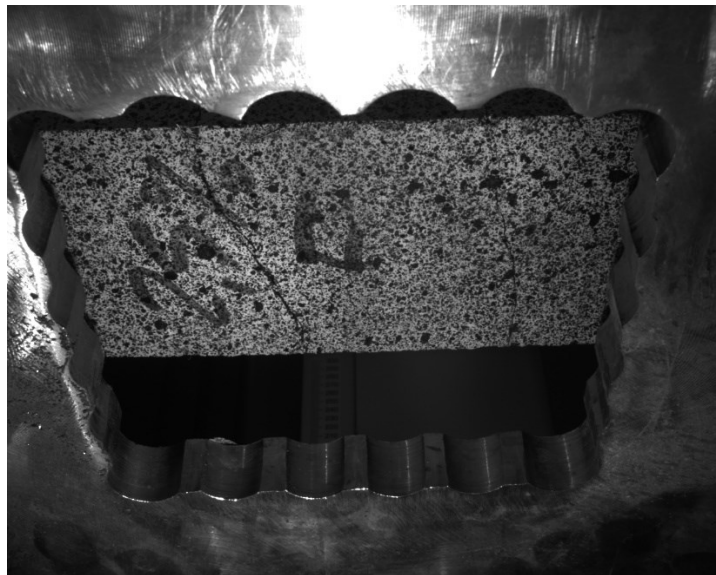


**a)**



**b)**

*Figura 40 – a) vista frontale provino C; b) dettaglio del provino D portato a rottura, le fibre tengono insieme le due parti del provino che quindi non si disunisce.*



*Figura 41 – dettaglio multifessurazione provino D in quadratura dal basso.*

### 5.1.1 Discussione dei risultati

Dalla prova a flessione statica sia per i provini con dimensione 70x70x280 mm sia quelli 30x70x280mm si evince come i differenti dosaggi di fibre non incrementano sostanzialmente la resistenza alla prima fessurazione, infatti si va dai circa 10 MPa dei provini con l'1% di volume in fibre ai 12 MPa dei provini con il 2,5% in volume di fibre, è un aumento quasi trascurabile, rispettando quelli che sono infatti i risultati e le evidenze riportate anche in letteratura, in cui si specifica che l'introduzione di fibre in un composito o l'aumento delle stesse se già presenti non portano in nessuno dei due casi ad un grande aumento della resistenza del materiale alla prima fessurazione.

Ciò che invece è evidente dai risultati tabellari e anche visivamente dai grafici riguardo ai provini con il quantitativo di 1% di fibre, è il comportamento così detto di "softening", ovvero si assiste ad un rammollimento che porta ad un comportamento degradante del materiale con perdita abbastanza rapida di resistenza a carico flessionale; infatti si può notare come per questi provini lo sforzo di prima fessurazione corrisponda anche allo sforzo massimo che il materiale è in grado di sopportare.

Anche in questo caso le nozioni che si trovano in letteratura sono rispettate ovvero che uno degli aspetti maggiormente migliorati nei calcestruzzi fibrorinforzati è il comportamento post fessurativo, infatti possiamo osservare come aumentando il dosaggio di fibre al 2,5% nel grafico sforzo deformazione si può notare un ramo cosiddetto di "hardening" ovvero il materiale ha un comportamento incrudente, dopo la prima fessurazione lo sforzo cui il materiale è in grado di resistere può essere lo stesso di prima della fessurazione o addirittura aumentato; il ruolo delle fibre in questo caso è quello del cosiddetto effetto ponte, che è quello che si richiede ad un materiale fibrorinforzato con un adeguato dosaggio di fibre; ovvero la fibra agisce dopo la prima fessurazione per far sì che non si continui ad aprire quella fessura ma se ne formino altre di modeste dimensioni.

A tal proposito attraverso la tecnologia DIC che utilizza un sistema di correlazione dell'immagine digitale è stato studiato il comportamento post fessurativo, la tecnica DIC risulta essere uno strumento indispensabile ai fini della misurazione e monitoraggio dell'apertura delle fessure nel provino o più in generale nella caratterizzazione dell'evoluzione del danno.

Sulla base delle misurazioni attraverso la DIC, può essere catturato e studiato nel dettaglio il processo di frattura di ciascun campione durante il processo di caricamento, in modo particolare nelle mappe di deformazione è possibile rilevare la propagazione di microfratture, invisibili ad occhio nudo e soprattutto riuscire a contestualizzarle riportandole nel punto esatto della curva nel grafico sforzo deformazione. Le figure a) e b) mostrano due processi di frattura rappresentativi di due campioni con rispettivamente 1% e 2,5% in contenuto di fibre sottoposti a prova di flessione statica.

In generale si evince come per entrambi i provini il punto A corrisponde al limite elastico, che è coincidente con l'attivazione della prima microcricca, dopo il punto A le curve sforzo deformazione cambiano significativamente.

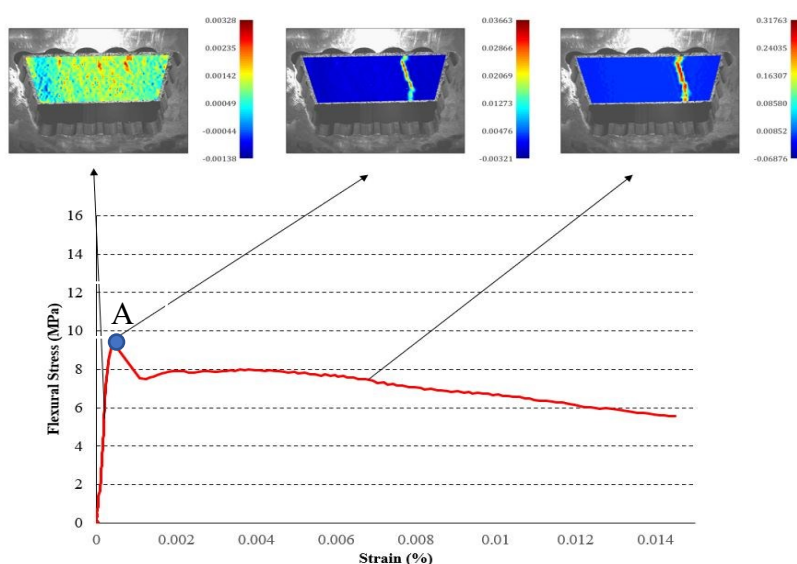


Figura a – Sequenza di frattura provino  $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$  con 1% di fibre

Nel primo caso (Fig. a) si può notare come il campione con contenuto in fibra pari all'1% in volume, ha manifestato un comportamento di rammollimento, infatti nel punto A la formazione della prima fessurazione corrisponde anche al massimo sforzo che il provino è in grado di sopportare, inoltre si può vedere come nell'evoluzione fessurativa ci sia solo una macro fessurazione localizzata.

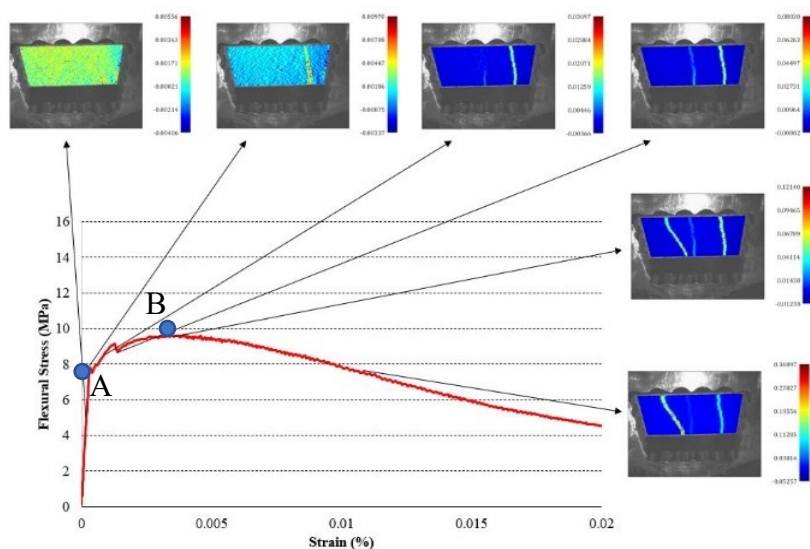
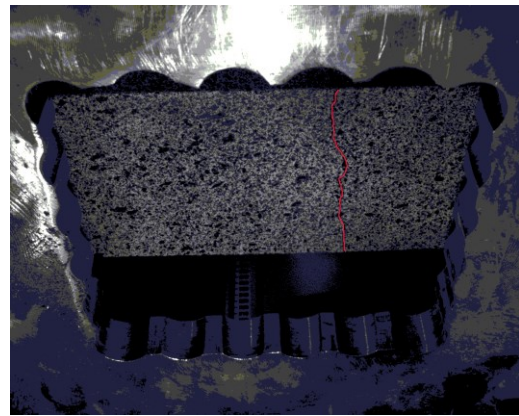
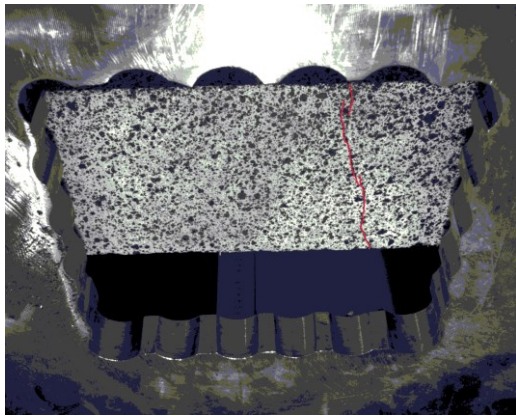


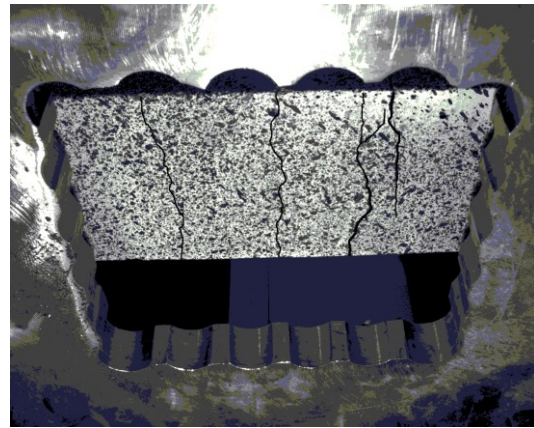
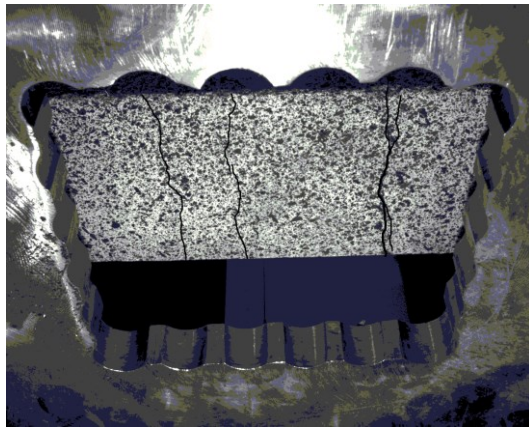
Figura b – Sequenza di frattura provino 70x70x280 mm<sup>3</sup> con 2,5% di fibre

Il campione con il 2,5% di contenuto in fibre ha sviluppato un comportamento incrudente subito dopo l'attivazione della prima microcricca (punto A) che corrisponde anche all'inizio della risposta di incrudimento, con un aumento della capacità resistente e la formazione di più microfessure, comportamento atteso quando il dosaggio delle fibre risulta essere adeguato, fino al punto B dove finisce la risposta incrudente del materiale e si torna ad avere un'unica fessura localizzata.

Per completezza di quanto detto sopra si riportano alcune immagini di provini sottoposti a prova di flessione statica in cui sono state evidenziate le differenti tipologie di danno riscontrate a seconda del quantitativo di fibre presente nella miscela. In rosso troviamo la fessurazione relativa a provini con un quantitativo di fibre all'1%, mentre evidenziate in nero le multifessurazioni relative ai provini con un quantitativo di fibre del 2,5%.



a)



b)

*Figura 43 – Dettaglio fessure visibili sulla superficie inferiore dei provini UHPFRC per differenti dosaggi di fibre:*

*a) UHPFRC\_1% b) UHPFRC\_2,5%.*



## 5.2 Caratterizzazione della tenacità flessionale

Per caratterizzare nel dettaglio la resistenza flessionale del materiale in esame, è stato condotto anche uno studio sulla tenacità flessionale dei vari provini;

Si riportano a seguire i valori della tenacità flessionale ( $U_f$ ) in N/mm di ogni gruppo di provini, questi valori sono stati ottenuti integrando l'area sottesa dalla curva relativa al grafico sforzo-spostamento, fino ad uno spostamento comune per ogni provino che corrisponde a 3,5 mm.

La tenacità è la capacità di un materiale di assorbire energia prima di arrivare a rottura, è funzione della resistenza, intesa come modulo elastico e della duttilità. Si riportano in tabella il valore della tenacità flessionale relativa ad ogni gruppo di provini con stesso dosaggio e stesse dimensioni e la relativa variazione percentuale della tenacità in seguito ai diversi dosaggi di fibre utilizzati.

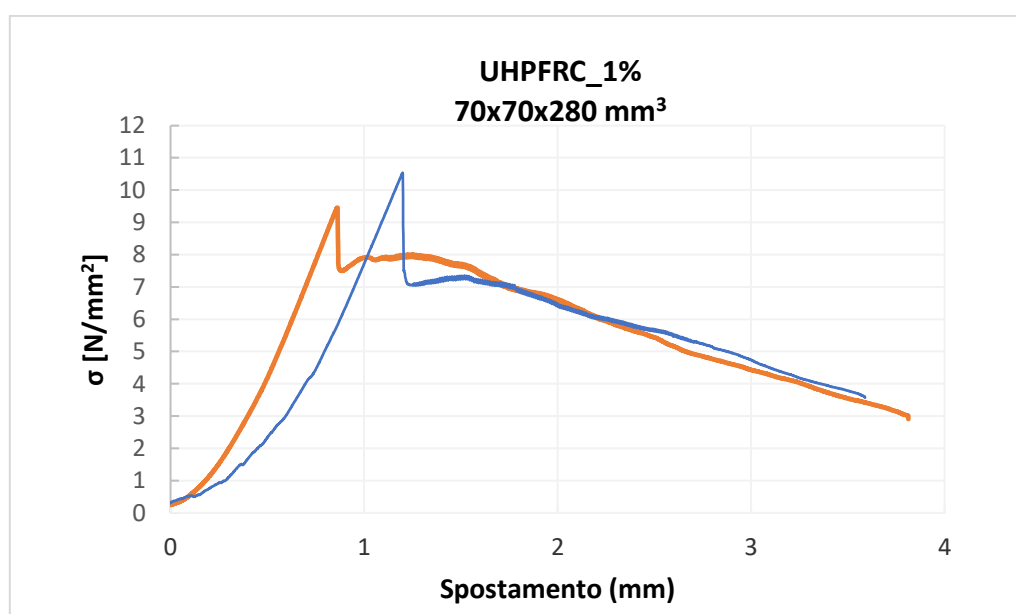


Figura 44 – Curva sforzo-spostamento (prova statica) 1% di fibre provini 70x70x280 mm

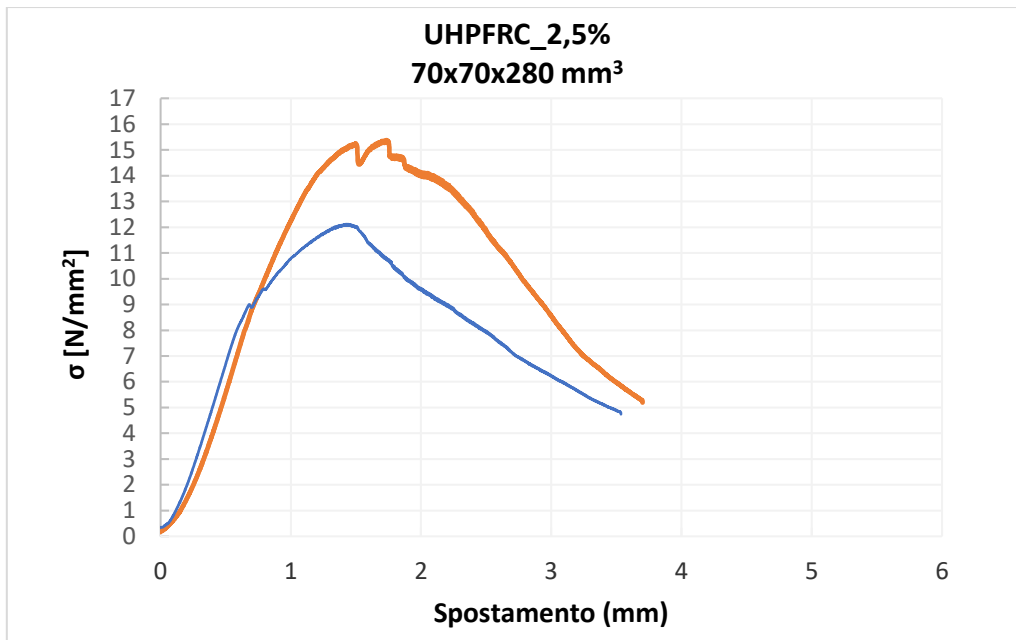


Figura 45 – Curva sforzo-spostamento (prova statica) 2,5% di fibre provini 70x70x280 mm

**RISULTATI PROVA A FLESSIONE STATICA**

dimensioni (mm)	campione	tenacità flessionale Uf [N/mm]	variazione tenacità flessionale [%]
70X70X280	UHPFRC_1%	18,8	-
	UHPFRC_2,5%	32,1	70,7

Tabella 10 – Risultati in termini di tenacità flessionale e relativa variazione tra i due diversi dosaggi

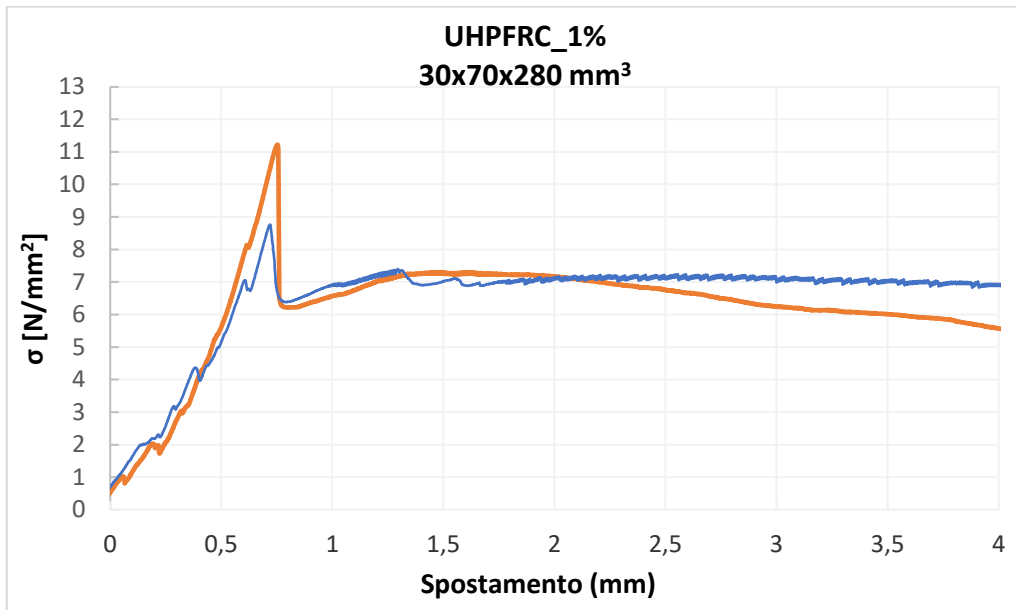


Figura 46 – Curva sforzo-spostamento (prova statica) 1% di fibre provini 30x70x280 mm

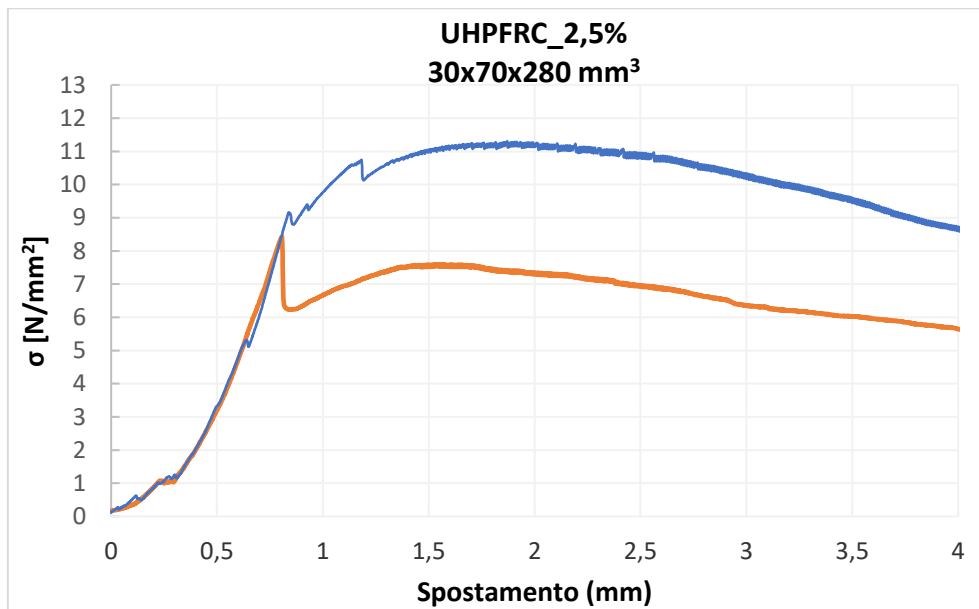


Figura 47 – Curva sforzo-spostamento (prova statica) 2,5% di fibre provini 30x70x280 mm

RISULTATI PROVA A FLESSIONE STATICA			
dimensioni (mm)	campione	tenacità flessionale Uf [N/mm]	variazione tenacità flessionale [%]
30X70X280	UHPFRC_1%	22,0	-
	UHPFRC_2,5%	26,6	20,9

*Tabella 11 – Risultati in termini di tenacità flessionale e relativa variazione tra i due diversi dosaggi*

### 5.2.1 Discussione dei risultati

La tenacità flessionale, cioè l'energia assorbita dal materiale prima che arrivi a rottura, risulta aumentata per dosaggi di fibre superiori, nel dettaglio nei provini 70x70x280 mm con il 2,5% di quantitativo di fibre la tenacità è incrementata di circa il 70% in positivo rispetto ai provini con l'1% di fibre. Anche nei provini con dimensione 30x70x280 mm il risultato è il medesimo seppure con un incremento più modesto passando dal quantitativo del 2,5% all'1% di fibre, si registra infatti un aumento della tenacità prossimo al 21%. La massima tenacità flessionale si registra per il provino 70x70x280 mm, intorno ai 32 N/mm.

Facendo un confronto tra i provini con diverse dimensioni ma stesso dosaggio di fibre, è interessante notare come la geometria del provino non influenzi in modo significativo la tenacità del conglomerato, si riportano di seguito i grafici con tale confronto.

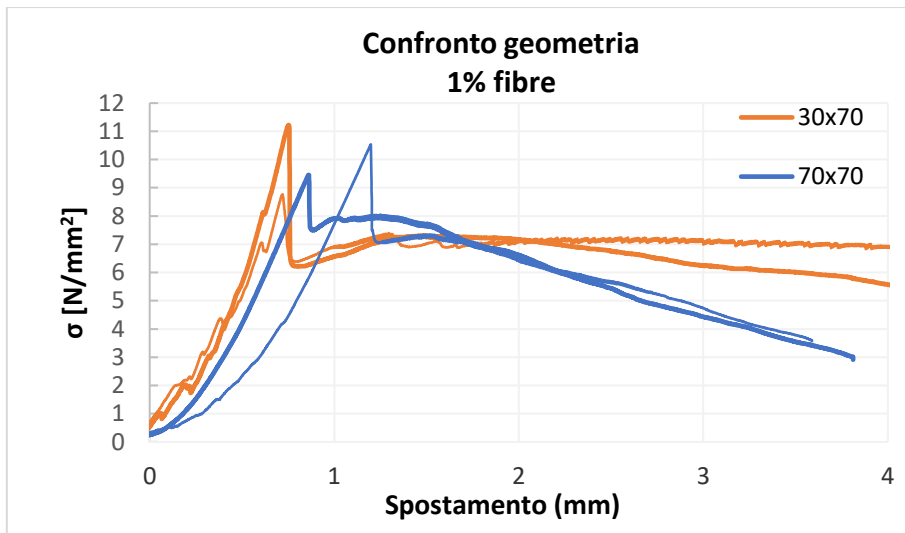


Figura 48 – confronto tra provini dimensione 30x70x280mm e 70x70x280mm con stesso dosaggio di fibre all'1%

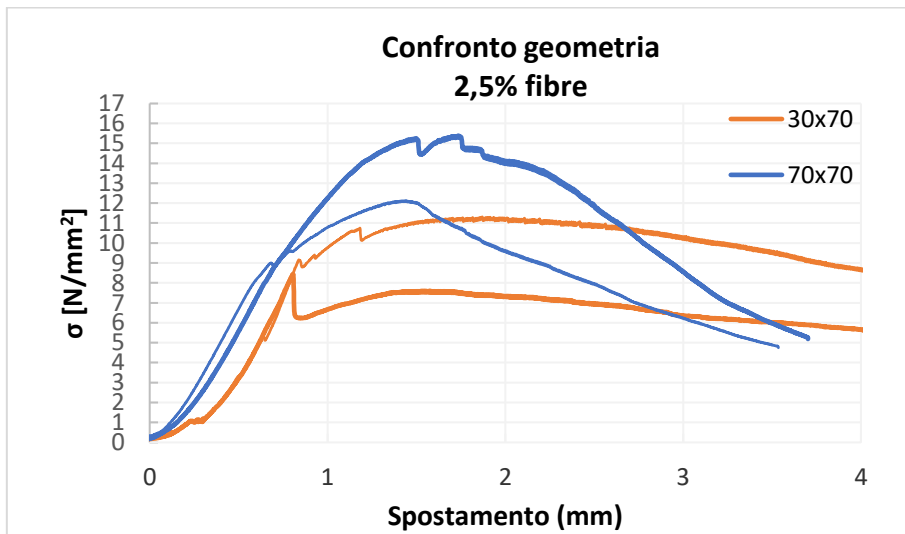


Figura 49 – confronto tra provini dimensione 30x70x280mm e 70x70x280mm con stesso dosaggio di fibre al 2,5%

### 5.3 Prova di flessione ciclica su quattro punti

Per la prova di flessione ciclica su quattro punti il setup è il medesimo utilizzato per la prova statica, i provini con stagionatura di 28 giorni in acqua sono stati sottoposti a cicli di carico e scarico con controllo di spostamento impostato ad 1 mm/min; ogni 0,5mm si eseguiva un ciclo di carico e scarico e la conseguente deformazione è stata registrata con la tecnica DIC (digital image correlation).

Di seguito si riportano: le curve *sforzo-deformazione* ( $\sigma - \varepsilon$ ), derivanti dai risultati delle prove di flessione cicliche su quattro punti. La relazione  $\sigma - \varepsilon$  è esposta con la forma di un diagramma x-y, in cui troviamo la deformazione lungo l'asse delle ascisse x e lo sforzo lungo l'asse delle ordinate y; le curve *sforzo-spostamento*, dalle quali integrando l'area al di sotto della curva di ogni provino è stata desunta la tenacità flessionale del materiale oggetto di studio, fino ad uno spostamento di 3,5mm.

Ogni coppia di grafici è seguita poi da una tabella in cui vengono riportate: la tensione di prima fessurazione ( $\sigma_f$ ), cioè la tensione alla quale corrisponde la formazione della prima fessura nel provino; la resistenza massima a flessione ( $\sigma_{max}$ ) la quale si evince in modo grafico o attraverso i valori tabulati, la variazione percentuale di resistenza flessionale tra i provini con stesse dimensioni ma diversi dosaggi di fibre, la tenacità flessionale ( $U_f$ ) e la variazione percentuale della tenacità flessionale dei provini con stesse dimensioni ma diversi dosaggi di fibre.

Si riportano a seguire i grafici e le relative tabelle come illustrato sopra.

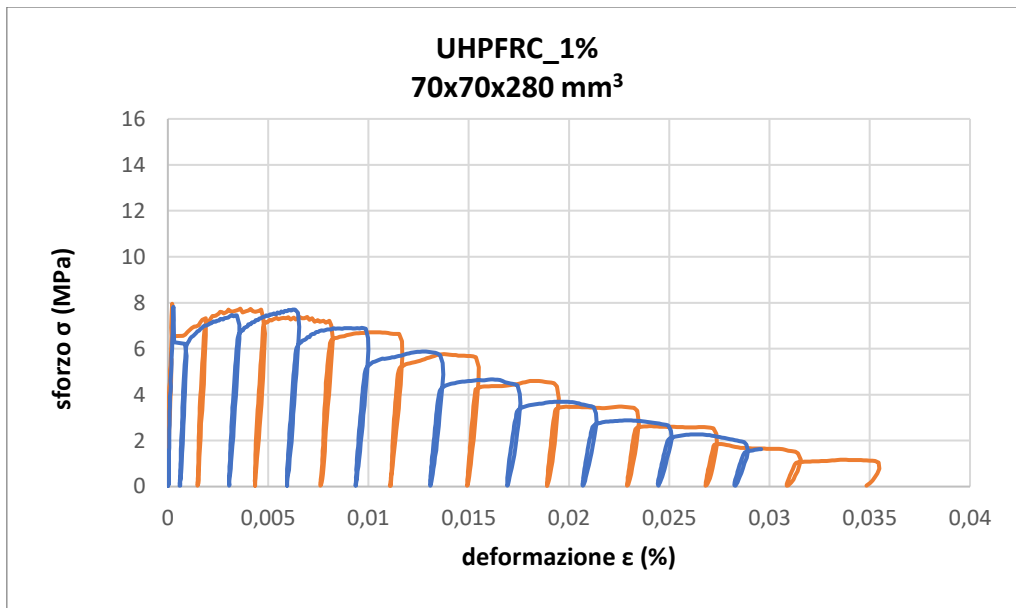


Figura 50 – Curva sforzo-deformazione (prova ciclica) 1% di fibre provini 70x70x280 mm

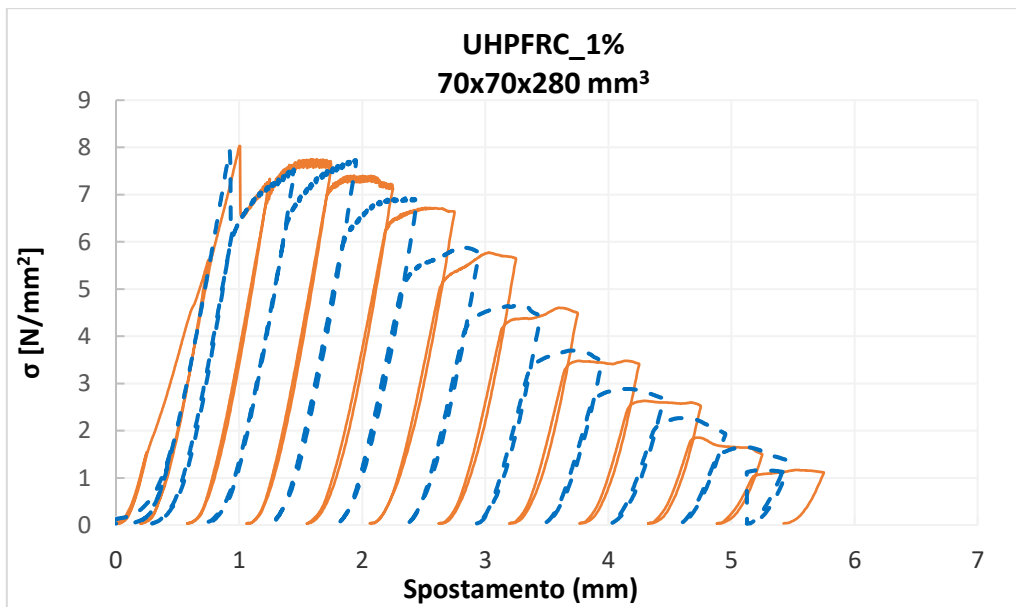


Figura 51 – Curva sforzo-spostamento (prova ciclica) 1% di fibre provini 70x70x280 mm

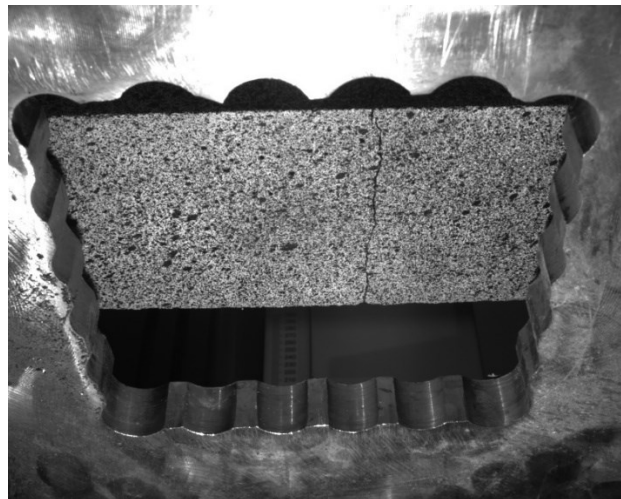


**a)**



**b)**

*Figura 52 – a) vista frontale dettaglio provino; b) vista frontale dettaglio fessurazione provino post carico ciclico*



*Figura 53 – Dettaglio di singola fessurazione su provino 70x70x280 mm con 1% di fibre.*



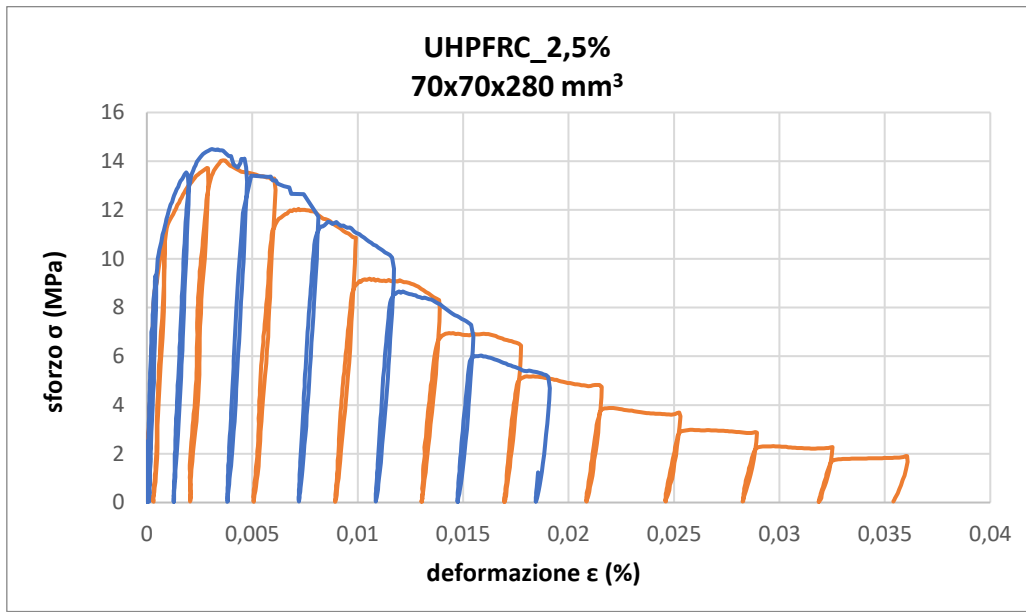


Figura 54 – Curva sforzo-deformazione (prova ciclica) 2,5% di fibre provini 70x70x280 mm

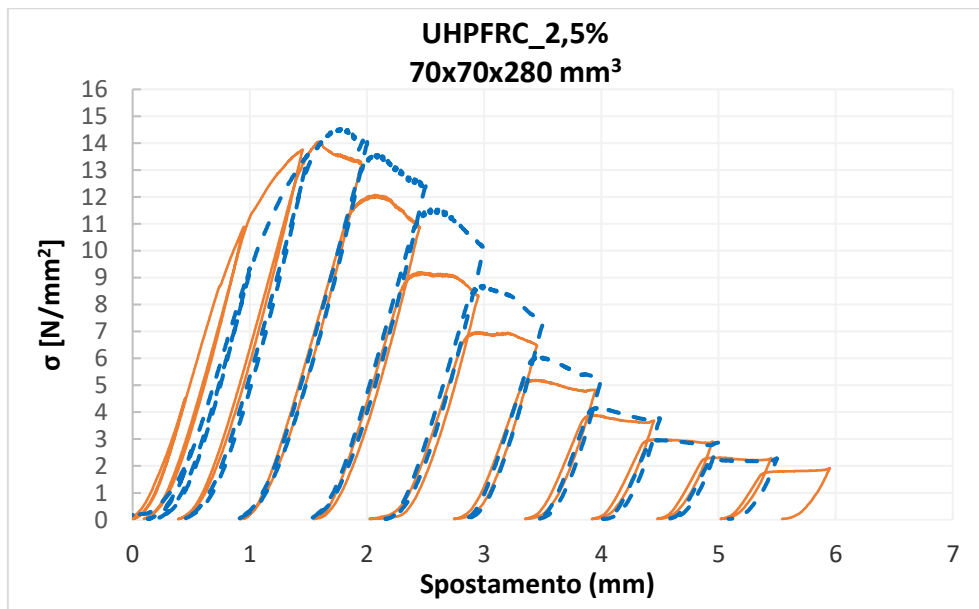


Figura 55 – Curva sforzo-spostamento (prova ciclica) 2,5% di fibre provini 70x70x280 mm

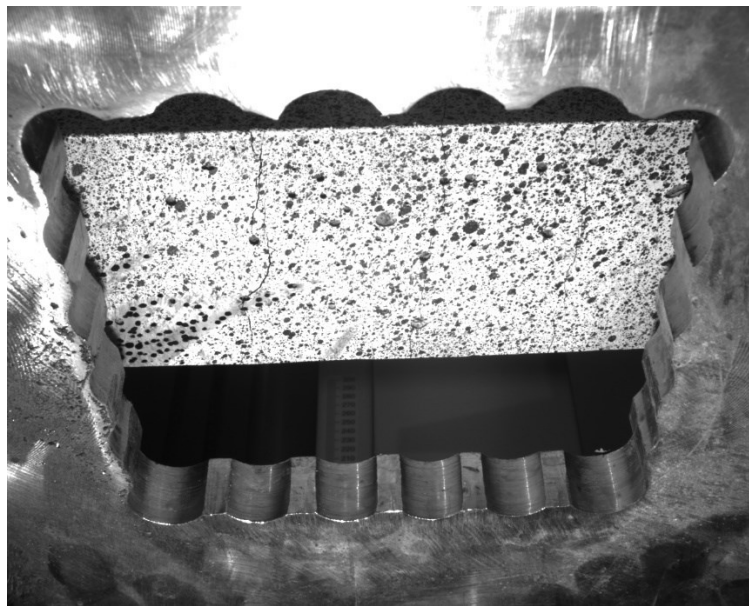


a)



b)

*Figura 56 – a) dettaglio frontale fessurazioni multiple; b) vista laterale provino sottoposto a prova ciclica*



*Figura 57 – fotogramma durante il test ciclico, dettaglio di multifessurazione su provino con 2,5% di fibre*

- Risultati prova a flessione ciclica su provini 70x70x280 mm.

DIMENSIONI (mm)	CAMPIONE	$\sigma_T$ (Mpa)	$\sigma_{MAX}$ (Mpa)	VARIAZIONE RESISTENZA FLESSIONALE [%]	TENACITÀ FLESSIONALE $U_F$ [N/mm]	VARIAZIONE TENACITÀ FLESSIONALE [%]
70X70X280	UHPFRC_1%	8,01	8,01	-	20,3	-
	UHPFRC_2,5%	9,55	14,3	79	35,3	74

Tabella 12 – Risultati in termini di sforzo, tenacità e relative variazioni percentuali nei provini 70x70x280 mm sottoposti a prova ciclica

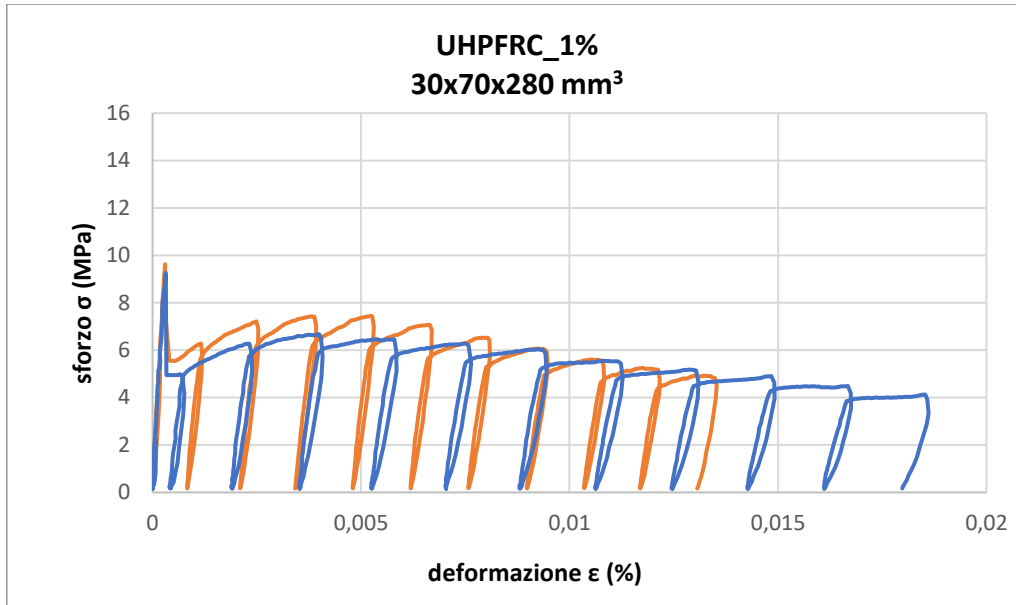


Figura 58 – Curva sforzo-deformazione (prova ciclica) 1% di fibre provini 30x70x280 mm

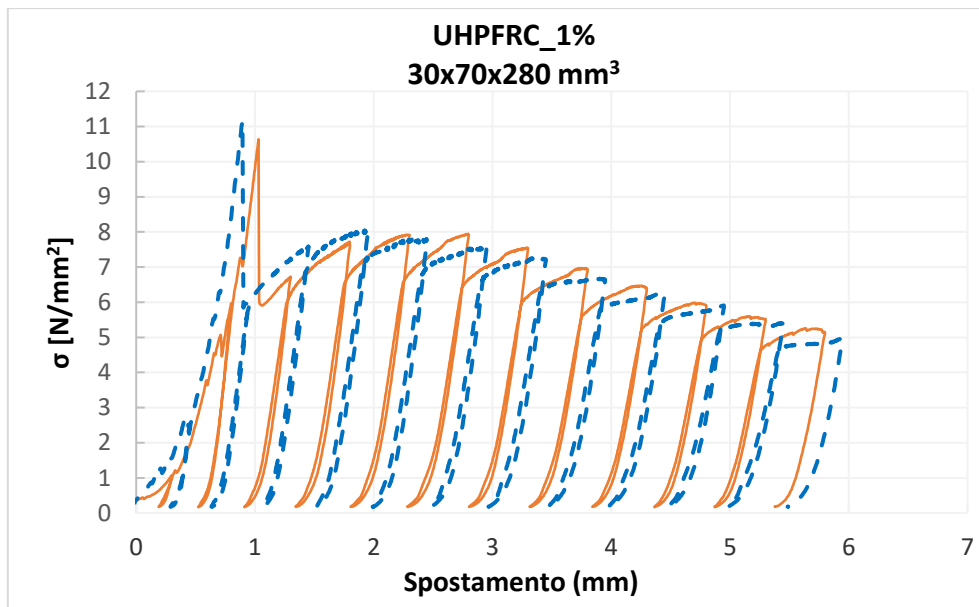
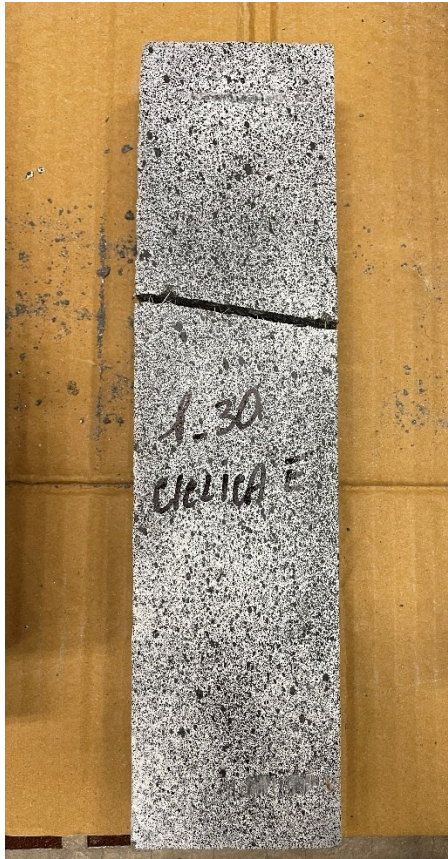
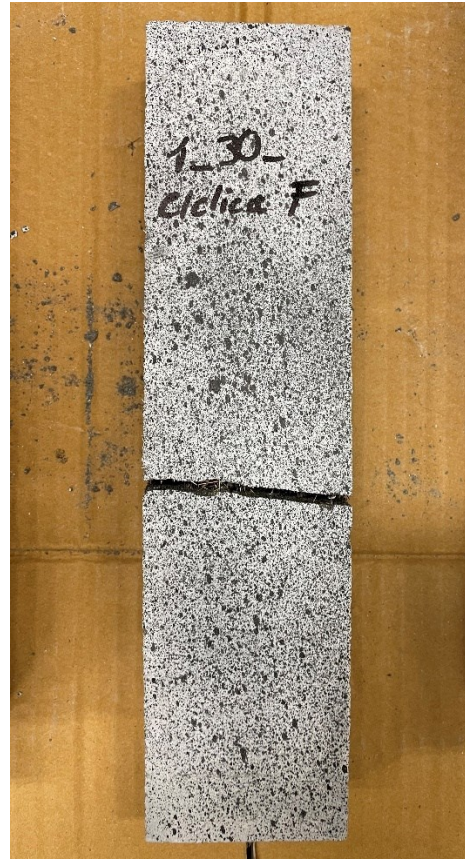


Figura 59 – Curva sforzo-spostamento (prova ciclica) 1% di fibre provini 30x70x280 mm



a)



b)

Figura 60 – a) Vista frontale fessurazione provino con 1% prova ciclica; b) vista frontale fessurazione provino con 1% prova ciclica

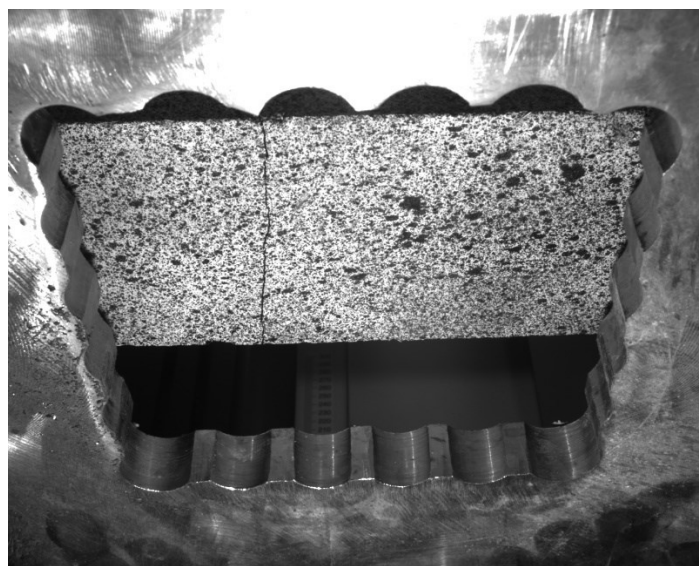


Figura 61 – Vista dal basso durante test di flessione ciclica, formazione di singola fessurazione

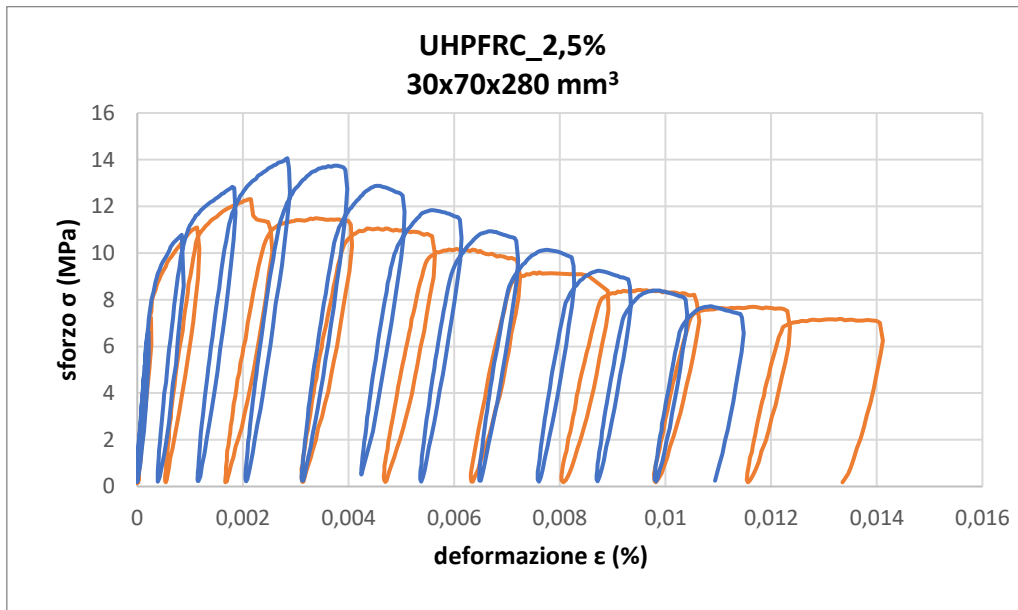


Figura 62 – Curva sforzo-deformazione (prova ciclica) 2,5% di fibre provini 30x70x280 mm

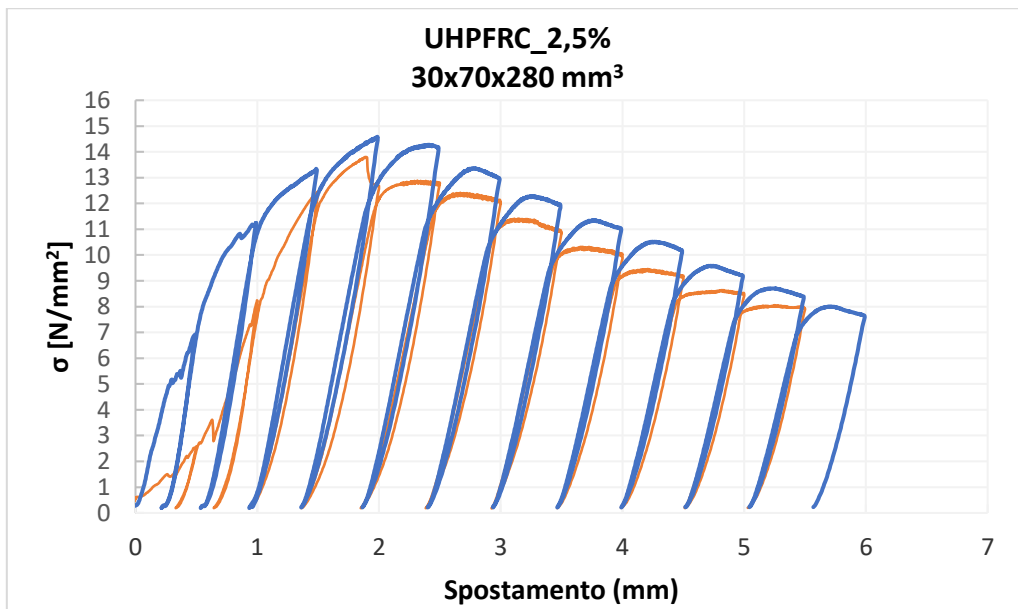


Figura 63 – Curva sforzo-spostamento (prova ciclica) 2,5% di fibre provini 30x70x280 mm



a)



b)

*Figura 64 – a) vista frontale fessurazione provino con 2,5% di fibre; b) vista frontale fessurazione provino con 2,5% di fibre*



*Figura 65 – dettaglio di fessurazione durante il test di flessione ciclico.*

- Risultati prova a flessione ciclica su provini 30x70x280 mm

DIMENSIONI (mm)	CAMPIONE	$\sigma_T$ (Mpa)	$\sigma_{MAX}$ (Mpa)	VARIAZIONE RESISTENZA FLESSIONALE [%]	TENACITÀ FLESSIONALE $U_F$ [N/mm]	VARIAZIONE TENACITÀ FLESSIONALE [%]
30X70X280	UHPFRC_1%	9,73	9,73	-	23,2	-
	UHPFRC_2,5%	9,64	10,98	13	38,2	65

Tabella 13 – Risultati in termini di sforzo, tenacità e relative variazioni percentuali nei provini 30x70x280 mm sottoposti a prova ciclica.



### 5.3.1 Discussione dei risultati

Anche nella prova ciclica si è notata un'influenza positiva nell'aumentare il dosaggio di fibre, passando infatti dall'1% al 2,5% nei provini di dimensione 70x70x280mm si nota un incremento della resistenza flessionale massima del 79%, mentre l'incremento nei provini 30x70x280mm risulta essere più esiguo con un incremento della resistenza flessionale massima di circa il 13%.

Si può notare come la tenacità a flessione calcolata sui provini sottoposti a carichi ciclici è in ogni caso superiore a quella calcolata su prove statiche (monotone), questo è dovuto probabilmente al fatto che nei provini sottoposti a carichi ciclici, durante la fase di scarico, si recupera parte della deformazione accumulata. Ciò è confermato dal fatto che i rami della curva sforzo-deformazione relativi al ricarico e scarico non sono coincidenti, lasciando intuire che durante la fase di scarico il provino recupera parte della deformazione.

L'aumento del dosaggio di fibre anche per la prova di flessione ciclica, porta ad un conseguente aumento della tenacità flessionale, infatti tanto i provini di dimensioni 30x70x280 mm quanto i provini 70x70x280 passando dal quantitativo dell'1% di volume di fibre al 2,5% fanno registrare una variazione percentuale in positivo rispettivamente del 65% e del 74%.

Per chiarezza si riportano nelle seguenti tabelle i grafici con il confronto tra i diversi dosaggi di fibre e le medesime dimensioni del provino.

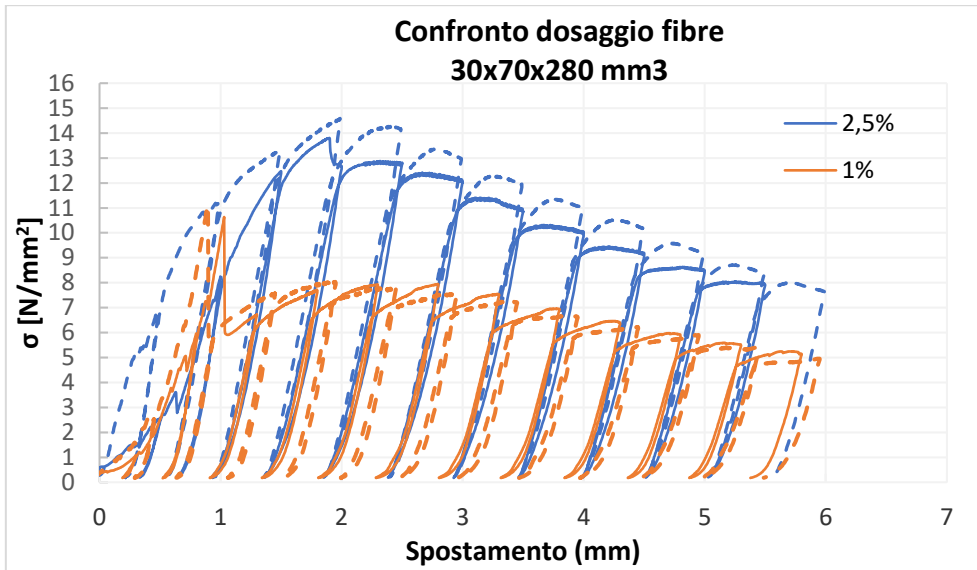


Figura 66 – confronto provini 30x70x280 mm con differenti dosaggi di fibre.

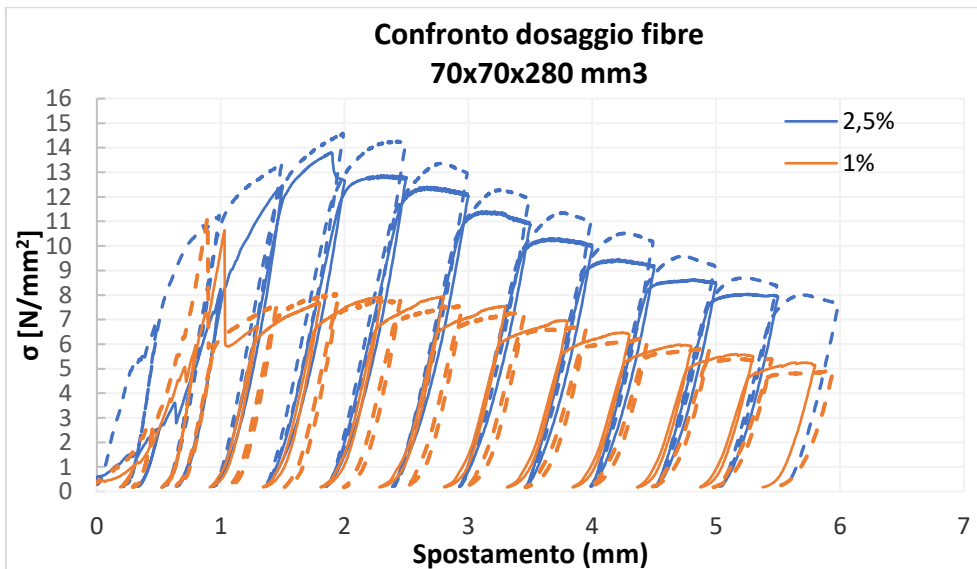


Figura 67 – confronto provini 70x70x280 mm con differenti dosaggi di fibre.

Una evidenza dai risultati del calcolo della tenacità da approfondire è che questa nella prova di flessione ciclica risulta essere, seppur non di molto, più elevata nei provini snelli con dimensione 30x70x280 mm rispetto ai provini tozzi 70x70x280 mm, per entrambe i dosaggi se messi a confronto. Secondo le linee guida dettate dall'ASTM al fine di evitare orientamenti delle fibre, l'altezza del campione di prova deve essere almeno 3 volte la lunghezza della fibra; nel caso in esame per i campioni 30x70x280 mm questo non avviene in quanto le fibre hanno lunghezza di 13 mm.

Doo-Yeol Yoo et al, nell'articolo "*Effect of fiber orientation on the rate-dependent flexural behaviour of UHPFRC*" affermano che capacità di assorbimento dell'energia (tenacità flessionale) sono state ottenute per provini con un migliore orientamento delle fibre; è il caso del provino 30x70x280 mm in cui probabilmente le fibre si sono disposte in modo orientato dato il basso spessore del provino, contrariamente ai provini 70x70x280 mm in cui le fibre hanno una disposizione con orientamento più casuale. Si riportano per completezza i grafici con i confronti appena esposti.

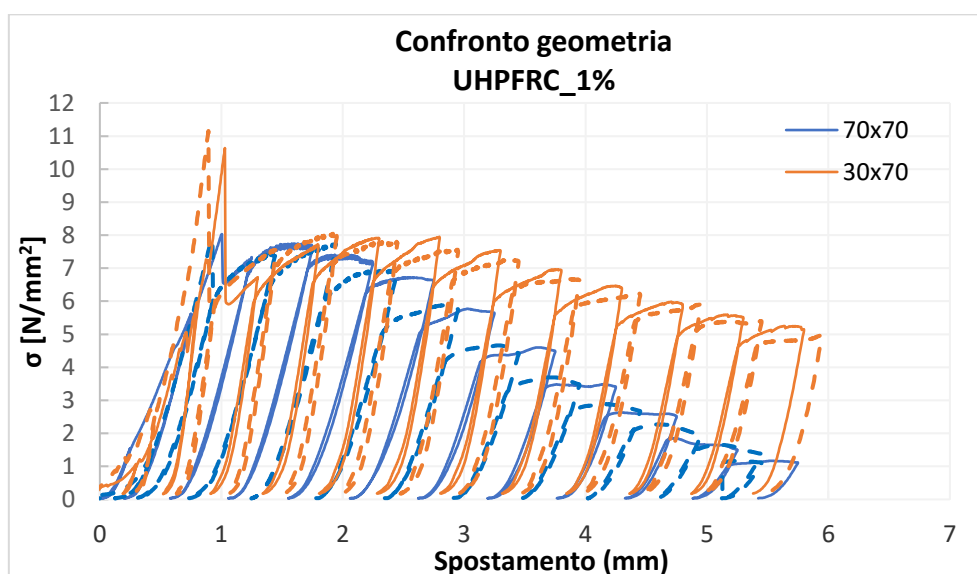


Figura 68 – confronto provini con diversa geometria ma stesso quantitativo % di fibre.

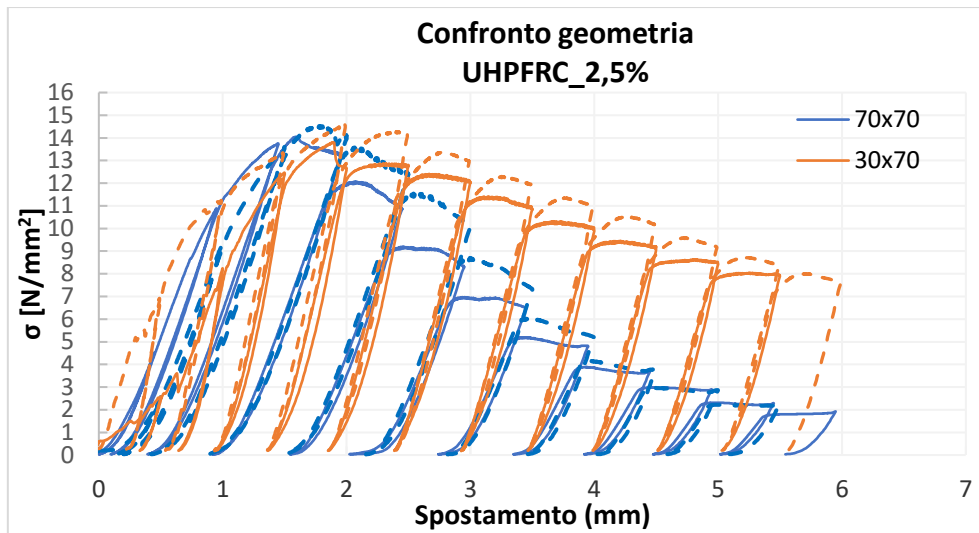


Figura 69 – confronto provini con diversa geometria ma stesso quantitativo % di fibre.

## 6. Conclusioni

L'obiettivo di questo studio sperimentale è stato quello di investigare gli effetti dovuti ai diversi dosaggi di fibre lisce d'acciaio rivestite in ottone dall'1% al 2,5%, in calcestruzzi ad elevatissime prestazioni, in termini di comportamento flessionale e tenacità. A questo scopo sono state eseguite prove di flessione su quattro punti le quali differiscono dalla prova su tre punti perché sono assenti le forze di taglio nell'area tra i due perni di carico, di conseguenza l'area compresa tra i due punti di carico viene sottoposta alla massima sollecitazione flessionale. Le prove di flessione sono state eseguite sui provini UHPFRC sotto carico statico e ciclico, con controllo dello spostamento pari ad 1 mm/min.

I risultati ottenuti dalla sperimentazione hanno in parte confermato le prestazioni attese e derivanti dalle conoscenze della letteratura, soprattutto in termini di miglior comportamento post fessurativo e di aumento di tenacità quando si è nella condizione di avere un ottimo dosaggio percentuale di fibre nel conglomerato, ma hanno anche permesso degli spunti relativi ad alcune implementazioni opportune nella caratterizzazione di questo materiale compositi di ancora recente scoperta.

Sulla base dei risultati e delle discussioni di cui sopra si possono trarre alcune considerazioni:

- Per entrambe le differenti dimensioni dei provini UHPFRC l'aumento del contenuto di fibre ha consentito il miglioramento in termini prestazionali della resistenza alla flessione.
- Il comportamento post fessurativo a flessione è fortemente influenzato dalla quantità del rinforzo in fibre d'acciaio; quando viene superata una soglia definita come *volume critico* delle fibre, si passa da un comportamento degradante o di rammollimento, ad un comportamento incrudente che si manifesta grazie al cosiddetto "*effetto ponte*" che le fibre esercitano sul conglomerato.
- La formazione di cricche multiple è principalmente influenzata dal contenuto di volume di fibre, quando si passa dall'1% al 2,5% si attiva il fenomeno del bridging delle fibre e si viene a formare di conseguenza una multifessurazione.

- La tenacità alla flessione risulta notevolmente maggiore quando si passa al contenuto di fibre più alto, infatti sia i provini con dimensione 30x70x280 mm che quelli 70x70x280 mm con il 2,5% di contenuto in fibra sono stati in grado di assorbire quasi il doppio dell'energia rispetto a quelli con contenuto all'1%.
- Il metodo Digital Image Correlation consente di identificare l'evoluzione di danno nel provino e quindi come si sviluppano le microfessurazioni nel tratto compreso tra la prima cricca e la fase di incrudimento; grazie quindi alla sua facilità di applicazione ed alla puntualità con cui si riesce a caratterizzare le evidenze delle deformazioni sui provini, il sistema DIC è un ottimo strumento per ulteriori studi sul meccansimo di danno degli UHPFRC od anche di altre miscele cementizie.

## **6.1 Possibili sviluppi**

I calcestruzzi ad altissime prestazioni fibrorinforzati sono ancora oggi considerabili un materiale giovane, che pur essendo stato testato negli ultimi decenni con metodologie scientifiche avanzate, presentano ancora delle caratteristiche da analizzare nel dettaglio, sia per quanto riguarda il materiale stesso che la sua applicabilità e quindi la compatibilità con altri materiali per impiego strutturale.

Il fatto che la normativa italiana abbia aperto all'introduzione di questi compositi è un buon segnale per la futura caratterizzazione ed introduzione di questi compositi in maniera massiva nelle future strutture. Importante dire che già da subito l'utilizzo di questo materiale permette di ottimizzare la quantità di armatura necessaria per le strutture in c.a. grazie alla tenacità locale che va a ridurre parecchio la fragilità che invece caratterizza i manufatti in calcestruzzo; la possibilità della sostituzione dei rinforzi tradizionali (barre d'armatura) con le fibre, comporta una maggiore facilità di esecuzione e un vantaggio in termini di peso se confrontata con l'impiego dei tradizionali rinforzi attivi e passivi di cui necessitano le strutture in c.a., soprattutto quelle molto complesse ed articolate, rappresentando una delle principali promesse e sfide del settore delle costruzioni.

Ricordando necessariamente che la produzione di cemento è la terza fonte di emissioni di CO<sub>2</sub> nel pianeta, dietro all'industria automobilistica e le centrali a carbone, in questa

ottica gli UHPC ma più in generale i materiali cementizi innovativi sono di fondamentale importanza perché grazie alla loro potenziale durabilità rappresentano una strada da percorrere per ridurre l'impatto ambientale che finora ha avuto la produzione di cemento.

## Bibliografia

- AFGC. (2013). *Ultra-high performance fibre-reinforced concretes. Recommendations*. Paris.
- CNR-DT 209/2013. (10 Ottobre 2013). *Istruzioni per l'impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni*. Roma.
- 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)*.
- Fehling E., S. M. (2004). Ultra high performance concrete (UHPC). *Proceeding of international Symposium on UHPC*. Germany.
- Doo-Yeol Yoo, et al. (2016). *Effect of fiber orientation on the rate-dependent flexural behaviour of UHPFRC*.
- Francesco Marotti de Sciarra, R. E. (2015). *I calcestruzzi ad altissima resistenza: proprietà e comportamento meccanico*.
- Habert et al. (2013). *Environmental design guidelines for digital fabrication*.
- Ingrid Lande Larsen et al. *Determining the environmental benefits of UHPC as a bridge construction material*.
- Mario Collepardi. *Calcestruzzi ad altissima resistenza: HPC, DSP e RPC*.
- N.M. Azmee, N. Shaqif. (2018). *Ultra-high performance concrete: from fundamental to applications*.
- 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 EN 12620. (2013). *Aggregati per calcestruzzo.*

UNI EN 197-1. (2011). *Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni.*

## **Ringraziamenti**

Ringrazio innanzitutto la mia famiglia che mi ha permesso di raggiungere questo traguardo col loro sostegno incondizionato, il supporto e l'amore di cui necessitavo nei momenti più difficili incontrati nel percorso.

Vorrei ringraziare la Professoressa Valeria Corinaldesi e il Dottorando Nicola Generosi per avermi permesso di approfondire questo argomento, attraverso le loro conoscenze e competenze.

Un ringraziamento speciale a tutti gli amici, compagni di studio e coinquilini con cui ho condiviso negli anni momenti indimenticabili e tante risate. Col loro supporto ognuno a modo proprio sono stati indispensabili per raggiungere questo traguardo.

Un grazie dal cuore anche a quelle persone che credevano fortemente in me e nel mio percorso di studi e che oggi purtroppo non ci sono più, il mio pensiero va a loro.