



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
Facoltà di Ingegneria

---

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile

Applicazione della Digital Image Correlation (DIC) per la  
caratterizzazione meccanica di diverse miscele di Ultra High Performance  
Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC).

Application of Digital Image Correlation (DIC) for the mechanical  
characterization of different mixtures of Ultra High Performance Fiber  
Reinforced Concrete (UHPFRC).

*Relatore:*

Prof. Jacopo Donnini

*Tesi di Laurea di:*

Marco Campana

*Correlatori:*

Prof. Gianluca Chiappini

---

Anno Accademico 2021-2022

## Ringraziamenti

Prima di procedere con la trattazione, vorrei ringraziare tutti coloro che mi sono stati vicini in questo percorso di crescita personale e professionale.

In primis un ringraziamento speciale al mio relatore Ing. Jacopo Donnini per avermi fornito materiale utile e per avermi seguito, con la sua disponibilità, e con i suoi consigli in ogni step per la realizzazione dell'elaborato.

Grazie anche al mio correlatore Ing. Gianluca Chiappini, per i suoi consigli e per la sua ampia conoscenza degli argomenti trattati.

Ringrazio infinitamente i miei genitori, per avermi sempre sostenuto e per essermi sempre stati vicini.

Ringrazio la mia fidanzata nonché collega Margherita, per aver condiviso le giornate di studio e per avermi dato il suo continuo appoggio.

Ringrazio infine me stesso e la mia tenacia che mi ha portato dove sono oggi.

# Indice

<b>SOMMARIO</b> .....	<b>1</b>
<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. GENERALITÀ</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. IL PROGRESSO DEL MATERIALE: DAL CALCESTRUZZO ORDINARIO AGLI RPC</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3. BENEFICI DEGLI UHPFRC</b> .....	<b>5</b>
<b>1.4. APPLICAZIONE DEGLI UHPFRC</b> .....	<b>6</b>
<b>1.5. NORMATIVE DI RIFERIMENTO</b> .....	<b>10</b>
<b>2. PROPRIETÀ E PARAMETRI MECCANICI</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1. COMPORTAMENTO A COMPRESSIONE</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2. COMPORTAMENTO A TRAZIONE</b> .....	<b>16</b>
<b>2.3. PRINCIPALI PARAMETRI MECCANICI. (MODULO DI ELASTICITÀ E COEFFICIENTE DI POISSON)</b> .....	<b>17</b>
<b>2.4. DURABILITÀ</b> .....	<b>18</b>
<b>3. COMPOSIZIONE DEGLI UHPFRC</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1. COMPOSIZIONE GENERALE</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2. IL CEMENTO</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3. GLI AGGREGATI</b> .....	<b>22</b>
<b>3.4. IL FUMO DI SILICE</b> .....	<b>24</b>
<b>3.5. ADDITIVI</b> .....	<b>25</b>
<b>3.6. LE FIBRE</b> .....	<b>26</b>
<b>4. DIGITAL IMAGE CORRELATION</b> .....	<b>28</b>
<b>4.1. IL PATTERN</b> .....	<b>30</b>

4.2.	LA CORRELAZIONE DELLE IMMAGINI .....	33
4.3.	TECNICHE DI CROSS-RELATION .....	34
4.4.	CORRELAZIONE A CAMPO INTERO .....	38
4.5.	STEREO VISIONE E 3D DIC .....	40
5.	ATTIVITÀ DI LABORATORIO .....	42
5.1.	MATERIALI UTILIZZATI .....	42
5.2.	MIX DESIGN .....	45
5.3.	FASI OPERATIVE .....	45
5.4.	CATALOGAZIONE DEI PROVINI .....	47
5.5.	PROVE ESEGUITE .....	48
5.5.1.	<i>Prova di spandimento</i> .....	48
5.5.2.	<i>Prova di flessione</i> .....	49
6.	RISULTATI SPERIMENTALI E COMMENTO .....	51
6.1.	RISULTATI E COMMENTO DELLA PROVA DI SPANDIMENTO .....	51
6.2.	RISULTATI E COMMENTO DELLA PROVA DI FLESSIONE .....	52
6.2.1.	<i>Analisi valori medi dei risultati e commento</i> .....	70
6.3.	RISULTATI DIC E COMMENTO .....	71
6.3.1.	<i>Analisi sezione dei provini testati</i> .....	84
7.	CONCLUSIONI .....	86
	BIBLIOGRAFIA .....	87

## Sommario

Il calcestruzzo ad altissime prestazioni, conosciuto con l'acronimo UHPFRC (dall'inglese Ultra high Performance Fiber Reinforced Concrete), è un materiale che rientra nei Materiali Cementizi Innovativi ed è caratterizzato da prestazioni decisamente più elevate dei calcestruzzi ordinari.

La sua età risale agli anni 90, ed è legata a varie criticità dei calcestruzzi usati in quegli anni, soprattutto per ovviare alla Durabilità e Duttilità.

Gli UHPFRC presentano una microstruttura con imperfezioni e impurità contenute, comportando una maggior durabilità rispetto ai materiali cementizi ordinari e una manutenzione meno frequente.

L'Obiettivo della tesi è la caratterizzazione delle prestazioni di questo materiale, basandoci su prove di flessione su tre punti con applicazione della Digital Image Correlation, eseguite presso il laboratorio dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona

Le prove sono state eseguite su 24 provini di UHPFRC di dimensioni 60x30x400 mm, 12 con intaglio centrale e i restanti senza, con vari dosaggi di fibre.

## 1. Introduzione

### 1.1. Generalità

Quando si parla di UHPFRC ci si riferisce ad un materiale a matrice cementizia che abbia resistenza a compressione maggiore dei 150 MPa, che abbia la possibilità di attingere ai 250 MPa, e che contenga fibre d'acciaio in grado di garantire un comportamento duttile sotto carichi e, se possibile, fare a meno delle armature di rinforzo passive (ovvero non precomprese). "Studi della letteratura hanno chiaramente dimostrato che l'aggiunta di

fibre riduce il comportamento fragile del calcestruzzo semplice sotto carico di trazione e flessione e consente al materiale di aumentare la sua capacità di deformazione a trazione e duttilità.” (Donnini et al., 2021).

Gli UHPFRC, differiscono dalla prima generazione di calcestruzzi ad alte prestazioni detti High Performance Concrete o HPC per:

- la resistenza a compressione che è sistematicamente più alta dei 150 MPa;
- l’uso sistematico delle fibre che garantiscono che il materiale non sia fragile e che modificano la normale richiesta di rinforzi attivi e/o passivi;
- l’alta presenza di legante per la particolare composizione della miscela.

Tale materiale è quindi in grado di attingere a resistenze a trazione relativamente alte attraverso la compartecipazione delle fibre che intervengono nella distribuzione dei carichi in seguito alla rottura della matrice cementizia, eliminando l’uso dei rinforzi convenzionali o al massimo sostituendoli con cavi pre e/o post-tesi che assorbono gli sforzi principali mentre le fibre contribuiscono ad assorbire quelli secondari di trazione.

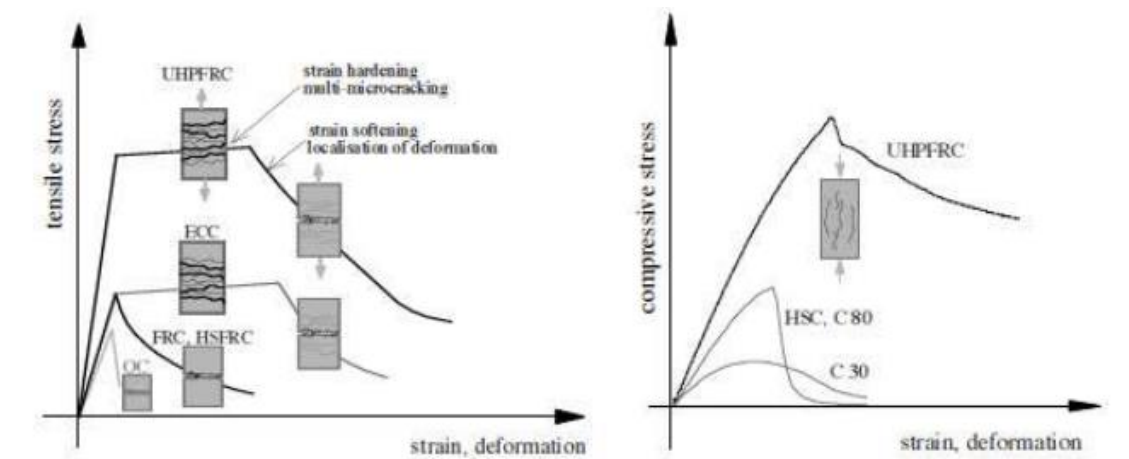


Figura 1: Confronto tra la risposta a trazione e compressione dei calcestruzzi ultra resistenti fibrorinforzati (UHPFRC) con i calcestruzzi ad alta resistenza fibrorinforzati o meno (HSC, FRC,HSFRC), con i compositi cementizi migliorati (ECC) e con i calcestruzzi ordinari (OC).

## 1.2. Il progresso del materiale: dal calcestruzzo ordinario agli RPC

Con l'ascesa del calcestruzzo armato nel XX secolo, come principale materiale da costruzione per la realizzazione di opere architettoniche e strutturali, si superano i vincoli legati alle vecchie tecniche di costruzione, dando la possibilità al progettista di plasmare il materiale in una varietà di edifici e strutture mai realizzate precedentemente.

Accanto ai vantaggi che il calcestruzzo armato ha portato con sé (quali facilità di esecuzione, costo ridotto dei componenti, versatilità di utilizzo), sono sorti alcuni svantaggi sia per la prestazione offerta del materiale che dalla sua sostenibilità ambientale, che spostano in alcuni casi la scelta verso l'acciaio, più sostenibile e con prestazioni più elevate anche per quanto riguarda l'aspetto sismico.

Notevoli inoltre le problematiche legate alla durabilità delle strutture in c.a.: “una serie di indagini condotte nel decennio 1980-1990 su 142 strutture realizzate in Italia, ha evidenziato che circa il 70% di queste strutture presenta condizioni di degrado avanzato che potrebbe essere attribuito alle seguenti cause: impiego di materiali facilmente aggredibili dagli agenti ambientali, confezionamento scadente del calcestruzzo, insufficiente copri ferro, modalità di posa in opera scadente” (Fascia e Iovino, 2008). Al fine di far fronte a tali problemi, e sotto la spinta di sempre più crescenti questioni di carattere ambientale, negli ultimi decenni del secolo scorso si è assistito alla nascita di un settore di ricerca volto all'implementazione delle caratteristiche proprie del materiale ed, in modo peculiare, alla ottimizzazione delle prestazioni meccaniche, al miglioramento della durabilità delle strutture nonché alla riduzione delle emissioni inquinanti.

A partire, infatti, dagli anni '70 lo sviluppo di nuovi additivi e di aggiunte, minerali e non, accanto allo studio attento dei processi di stagionatura e del mix-design, hanno iniziato a trasformare il calcestruzzo, il componente più importante del c.a., in un materiale tecnologicamente avanzato.

In tale periodo si assiste dunque alla nascita dei cosiddetti calcestruzzi DSP (Densified with Small Particle) ovvero calcestruzzi in cui viene sperimentato il binomio fumo di silice-superfluidificante.

*“L'utilizzazione congiunta di fumo di silice e superfluidificante ad altodosaggio (2-4% sul cemento) consente di ottenere prestazioni ancora superiori se si sostituisce il comune aggregato calcareo con rocce di migliori prestazioni meccaniche e soprattutto con caratteristiche superficiali tali da migliorare il legame all'interfaccia aggregato-matrice cementizia”* (M. Collepari et al., 2003). In altre parole, la pasta cementizia diviene più resistente degli aggregati che diventano il punto debole del materiale, assieme a quella sottilissima area posta a confine tra aggregato e matrice cementizia detta anche “zona di transizione” per sfruttare al meglio le caratteristiche dovute alla densificazione del materiale diviene necessario allora utilizzare aggregati densi e compatti in grado di stabilire un miglior legame con la pasta cementizia.

Tuttavia, anche il calcestruzzo DSP, che si rivela avere ottime prestazioni meccaniche e di resistenza alle aggressioni ambientali si scopre avere alcuni limiti prestazionali nel comportamento deformativo, dovuti per lo più alla natura estremamente fragile del materiale e strettamente connessi con la microstruttura densa del materiale DSP.

Per ovviare a tali limiti nel comportamento dei materiali DSP, all'inizio degli anni '90 si è assistito alla nascita e allo sviluppo dei cosiddetti RPC (Reactive Powder Concrete): al materiale DSP possono venire aggiunte sia fibre d'acciaio, che ne aumentano la duttilità contribuendo all'assorbimento degli sforzi e alla riduzione dei fenomeni di rottura, sia fibre in materiali polimerici che consentono di mitigare sensibilmente il fenomeno dello spalling durante gli incendi.

A seguito, infatti, di alcuni studi sviluppati, si sono sviluppati materiali con i quali è possibile anche in tempi molto brevi raggiungere i 200 MPa per la resistenza meccanica a compressione, migliorando radicalmente la resistenza flessionale (50 Mpa) e soprattutto la duttilità del materiale (energia di frattura di 10000-30000 J/m<sup>2</sup> ovvero cento volte superiore a quella dei calcestruzzi ad alte prestazioni che arrivano attorno ai 100 MPa a compressione). Due tipologie di calcestruzzi sono state il frutto di studi, l'RPC200 e l'RPC800, che raggiungono rispettivamente valori di circa 190 MPa il primo e superiori ai 600 MPa il secondo. Recentemente sono state studiate miscele con aggregati di dimensioni maggiori, al fine di ridurre i costi di produzione dei UHPFRC in quanto diminuisce la quantità di polveri come riportato da (Yoo & Banthia, 2016).



Inoltre, secondo (Schmidt, 2004) gli UHPFRC possono essere resi fluidi più facilmente riducendo i tempi per la miscelazione senza intaccare la resistenza a compressione che risulta essere invariata.

### **1.3. Benefici degli UHPFRC**

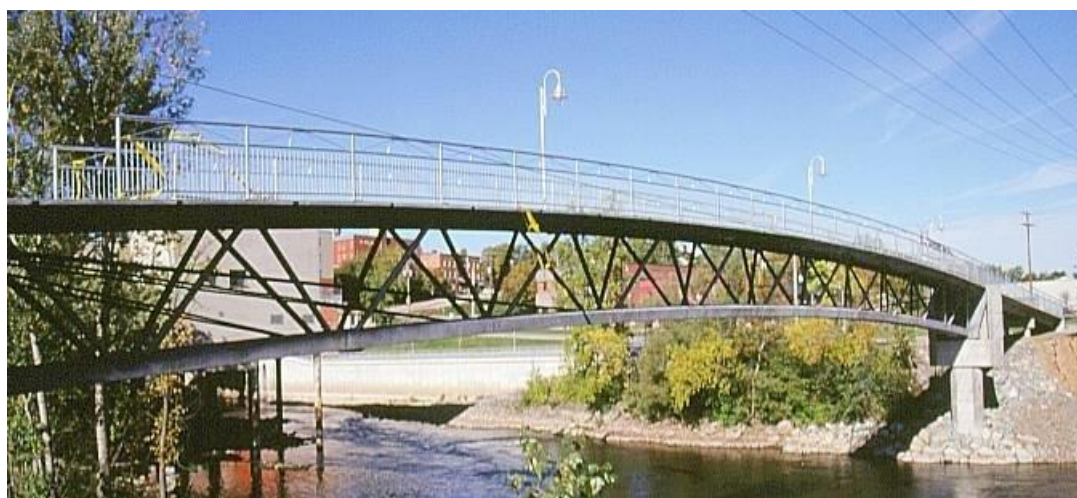
Tra gli innumerevoli vantaggi legati all'uso di questo materiale troviamo principalmente:

- Incremento notevole della resistenza a trazione e a flessione rispetto ad un calcestruzzo ordinario con la stessa classe di resistenza;
- Assenza di fessurazioni durante presa ed indurimento del materiale che insieme ad un'aggiunta di minerali garantisce anche una resistenza in ambienti aggressivi comportando un aumento della durabilità del materiale;
- Materiale sostenibile in quanto vengono impiegati scarti industriali per conferire l'attività chimica alla matrice cementizia. L'impiego di fumo di silice, ceneri volanti e loppa microfine riduce il consumo energetico e le emissioni legate alla produzione del calcestruzzo tradizionale, che per l'elevata temperatura necessaria impiega un'alta quantità di energia e produce considerevoli emissioni;
- Alleggerimento della struttura dovuta al restringimento delle sezioni, che comporta un risparmio in fase di trasporto e messa in opera;
- Minor quantità di armature metalliche nelle sezioni degli elementi, che comporta anche una riduzione dei costi (sia per la minor quantità da acquistare sia per la manodopera);
- Comportamento post-fessurativo incrudente che garantisce una notevole tenacità a rottura ed un ottimo comportamento a fatica (maggiore resistenza alle vibrazioni causate da vento, azioni sismiche e traffico veicolare).

## 1.4. Applicazione degli UHPFRC

Nella seconda metà degli anni '90 del secolo scorso, accanto agli studi in merito alle caratteristiche meccaniche del materiale, iniziano già a realizzarsi alcune applicazioni pratiche nel settore dell'ingegneria civile, volte a sfruttare a pieno le proprietà di leggerezza, resistenza e durabilità degli UHPC, portando così all'esplorazione di un differente approccio alla progettazione con i materiali cementizi innovativi in generale e con il Ductal in particolare (Batoz & Manager, 2009).

Il primo utilizzo è stato quello per il ponte pedonale di Sherbrooke (Richard e Aïtcin, 1996; Blais e Couture, 1999) che ha garantito una elevata durabilità in condizioni di esercizio gravose (sali marini, acqua di condensa, cicli gelo-disgelo, elevati sbalzi termici, presenza di sostanze chimiche pericolose e di rifiuti organici) e rendendo possibile una straordinaria libertà architettonica ed estetica per il progettista. Trattasi di una passerella in cui la struttura portante è realizzata con una trave reticolare, ovvero con una tipologia usata solitamente per le strutture in acciaio al fine di garantire un'elevata inerzia della sezione riducendo al contempo i carichi permanenti.



*Figura 2: Ponte pedonale di Sherbrooke, 1999.*

Il ponte, prefabbricato e precompresso, ha una campata di 60 m sul Magog River nel Quebec e la soletta presenta lo spessore solo di 3 cm per una larghezza di 330 cm.

A seguito di questa prima realizzazione sono iniziati diversi studi, ad opera principalmente delle industrie francesi Bouygues e Lafarge, sulle differenti sezioni possibili da utilizzare nella realizzazione di ponti pedonali e ciclabili in grado di sfruttare al meglio le proprietà del Ductal.

Tali studi hanno condotto alla realizzazione della sezione a Pi, utilizzata per la prima volta nel “Peace Footbridge” costruito a Seoul, Corea del Sud nel 2002 e progettato dall’architetto francese Rudy Ricciotti.



*Figura 3: Ponte pedonale della pace, Soeul, 2002.*

Il ponte presenta una campata di 120 m, con uno spessore della soletta di 3 cm ed una larghezza di 430 cm, ed è composto da 6 segmenti prefabbricati assemblati e post-tesi in opera.

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

Gli UHPC poi sono stati utilizzati anche per la realizzazione di ponti stradali e ferroviari. La prima esperienza è stata quella in Francia di Bourg-les-Valence ed è servita, come vedremo in seguito, a fornire numerose informazioni sul comportamento del materiale.

In modo particolare, il gruppo di industrie che ha portato avanti il progetto in stretta collaborazione con le autorità statali, è riuscito a definire importanti valori in merito all'orientamento delle fibre ed alla loro capacità di sopportare gli sforzi taglienti, sviluppando una trave tipo prefabbricata e con cavi precompressi, eliminando del tutto i rinforzi passivi.

Uno dei progetti più importanti, è quello del Wapello County Bridge nell'Iowa (Moore e Bierwagen, 2006; Perry e Seibert, 2008). Si tratta infatti del primo ponte autostradale realizzato nel Nord America, a seguito di una stretta collaborazione tra la FHWA (Federal Highway Administration), il Dipartimento dei Trasporti e l'Università dell'Iowa e Lafarge Nord-America. La sua realizzazione è avvenuta nel 2006, dopo quattro anni di studi, e nonostante la sua semplicità ha fornito un grande apporto nel programma "The Bridge of the Future" promosso dalla FHWA per la ricerca di nuove soluzioni che migliorino la durabilità e riducano le spese per la costruzione di ponti stradali.



Figura 4: Wapello County Bridge, Iowa, Usa , 2006.

In modo particolare trattasi di un ponte a campata unica di 33.5 m che utilizza 3 travi prefabbricate a doppio T, con cavi precompressi e senza armatura di rinforzo passivo.

Le travi sono state testate con prove a larga scala sia in laboratorio, testando a flessione e taglio travi di 23 m, sia in-situ, utilizzando una motrice per simulare il carico mobile da traffico.

Tutti i test hanno fornito risultati in termini di curva carichi-inflessione migliori dei valori utilizzati in fase progettuale. Oltre a queste applicazioni però gli UHPC possono essere utilizzati in diversi modi, dalla realizzazione di giunti strutturali alla ristrutturazione di tunnel, dalla realizzazione di solette prefabbricate e precomprese all'uso del materiale senza alcun tipo di rinforzo o armatura (precompressa o passiva) come nel caso della realizzazione di scale.



*Figura 5: Altri usi dei materiali UHPFRC.*

Gli UHPFRC possono inoltre essere usati nella realizzazione di opere non strutturali per pensiline, facciate, passerelle.



*Figura 6: usi non strutturali UHPFRC.*

## 1.5. Normative di riferimento

Citando *“Linea guida per l’identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC”* (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici Servizio Tecnico Centrale, 2019) pubblicate a Gennaio 2019: *Le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (nel seguito NTC)* prescrivono, al punto 11.1, che 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”* (nel seguito CVT) rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale (nel seguito STC), sulla base di linee guida approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

All’interno dello stesso documento troviamo il materiale UHPFRC deve essere caratterizzato da un dosaggio minimo delle fibre al suo interno *“non inferiore allo 0.3% in volume”*.

Per quanto riguarda le fibre, i parametri delle stesse sono riportati nella tabella 1, estrapolata della norma armonizzata EN 14889-2 (British Standards Institution., 2006).

Fibre di acciaio	Fibre polimeriche
Lunghezza [mm]	Polimero
Diametro equivalente [mm]	Lunghezza [mm]
Rapporto d'aspetto	Diametro equivalente [mm]
Forma	Rapporto d'aspetto
Resistenza a trazione <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>

Tabella 1: Parametri che devono comparire nella confezione delle fibre.

Sotto il punto 2.3.1 Comportamento a trazione degli FRC si evince che “Il comportamento post-fessurativo in trazione uniassiale è 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.”

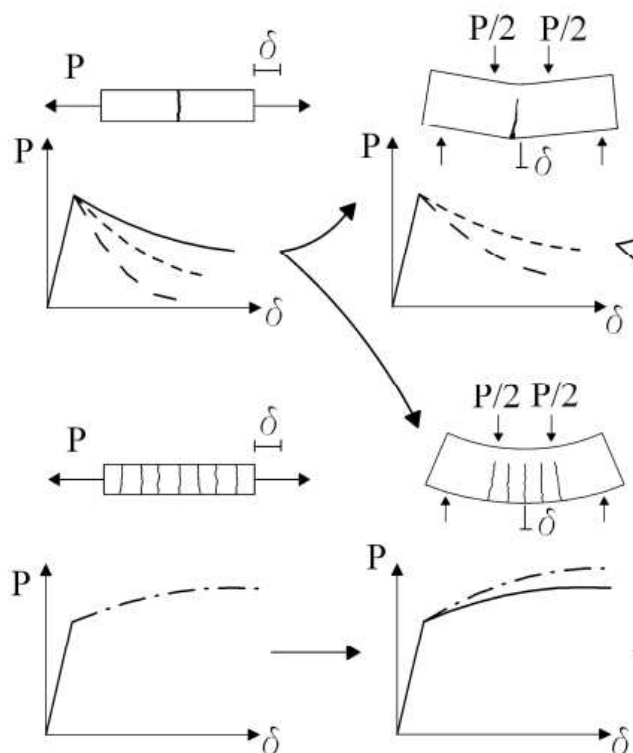


Figura 7: Risposta meccanica di strutture caratterizzate da capacità redistributive differenti: trazione uniassiale e flessione.

Alcune delle proprietà richieste ai materiali FRC sono:

- limite di proporzionalità (tensione corrispondente);
- classe di tenacità, ovvero resistenza opposta dal materiale all'avanzamento del processo di frattura.

È inoltre necessario definire:

- Caratteristiche geometriche della fibra
- Materiale di cui è composta la fibra

Citando la stessa norma “La lunghezza delle fibre deve essere compatibile con il copriferro e l'interferro ed essere proporzionata alla dimensione massima dell'aggregato. È consigliata una lunghezza della fibra non inferiore al doppio della dimensione massima dell'aggregato”

Poco più avanti notiamo “Il limite di proporzionalità e la classe di tenacità sono determinabili sulla base di un test a flessione su un provino di dimensioni ( $b \times h$ )  $150 \times 150$  mm in sezione, lunghezza  $550 \div 700$  mm, intagliato centralmente, semplicemente appoggiato alle estremità e caricato con un carico centrale”(Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici Servizio Tecnico Centrale, 2019).

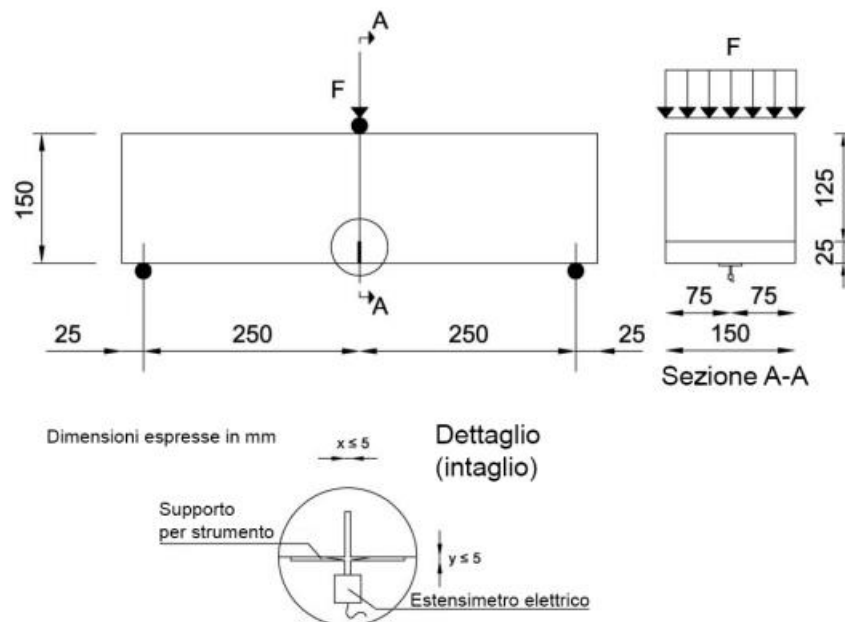


Figura 8: Risposta meccanica di strutture caratterizzate da capacità redistributive differenti: trazione uniassiale e flessione.



Per calcestruzzi fibrorinforzati il fabbricante deve fornire le seguenti proprietà meccaniche:

- *Resistenza a compressione ( $f_{ck}$ , valore caratteristico).*
- *Modulo elastico ( $E_{fm}$ , valore medio); al riguardo si accetta la correlazione con la resistenza a compressione, come previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per il calcestruzzo senza fibre;*
- *Resistenza a trazione uniassiale ( $f_{ftm}$ , valore medio e  $f_{ftk}$ , valore caratteristico);*
- *Resistenza a flessione al limite di proporzionalità ( $f_{fct,Lm}$ ; valore medio e  $f_{fct,Lk}$  valore caratteristico);*
- *Resistenza a flessione in fase fessurata ( $f_{R,1k}$  e  $f_{R,3k}$ ; valori caratteristici);*
- *Modulo di Poisson ( $\nu_{fm}$ , valore medio): si assume corrispondente a quello previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per il calcestruzzo privo di fibre;*
- *Coefficiente di dilatazione termica lineare ( $\alpha_T$ ): si assume corrispondente a quello previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per il calcestruzzo privo di fibre.*

La procedura di accettazione dei materiali in cantiere prevede che il Direttore dei lavori deve verificare che “ciascuna miscela omogenea sia coperta da CVT (dichiarazione attestante la permanenza delle condizioni iniziali di idoneità del processo produttivo e dell'organizzazione del controllo interno di produzione in fabbrica) in corso di validità.

Citando le linee guida “Le prove saranno eseguite dopo 28 giorni di maturazione in ambiente controllato con temperatura  $T = 20 \pm 2$  °C e  $UR \geq 95\%$ , entro 45 giorni dal prelievo. Per la verifica della classe di resistenza a compressione e della classe di consistenza valgono le stesse regole previste dalle NTC per il calcestruzzo privo di fibre. Relativamente alle prove di flessione, per un numero totale di prelievi da miscela omogenea inferiore a 15, il controllo di accettazione è superato se il valore medio di  $f_{R,1}$  e  $f_{R,3}$  ( $f_{R,1m}$ ,  $f_{R,3m}$ ) rispetta tutti i requisiti di seguito indicati:  $f_{R,1m}/f_{fct,Lm} > 0,4$ ;

$$f_{R,1m} > 1,3 f_{R,1k};$$

$$f_{R,1min} > 0,7 f_{R,1k};$$

$$f_{R,3m} > 1,3 f_{R,3k};$$

$$f_{R,3min} > 0,7 f_{R,3k};$$

*ove i valori caratteristici  $f_{R,1k}$  e  $f_{R,3k}$  sono i valori nominali e si riferiscono alla classe di appartenenza dichiarata per il FRC.*

*Per un numero totale di prelievi da miscela omogenea uguale o superiore a 15 il controllo di accettazione è superato se il valore medio di  $f_{R,1}$  e  $f_{R,3}$  ( $f_{R,1m}$ ,  $f_{R,3m}$ ) rispetta tutti i requisiti di seguito indicati:*

$$f_{R,1k}/f_{fct,Lk} > 0,4;$$

$$f_{R,1m} > f_{R,1k} + 1,48s;$$

$$f_{R,1min} > 0,7 f_{R,1k};$$

$$f_{R,3m} > f_{R,3k} + 1,48s;$$

$$f_{R,3min} > 0,7 f_{R,3k};$$

*ove i valori caratteristici  $f_{R,1k}$  e  $f_{R,3k}$  sono i valori nominali e si riferiscono alla classe di appartenenza dichiarata per il FRC. Il coefficiente 1,48 è assunto in accordo con quanto indicato nella EN 206 per il controllo di accettazione in cantiere del calcestruzzo” (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici Servizio Tecnico Centrale, 2019).*

## **2. Proprietà e parametri meccanici**

### **2.1. Comportamento a compressione**

Un UHPC senza fibre è in grado di garantire una resistenza a compressione a 28 giorni pari o superiore ai 150 MPa (attingendo spesso a valori prossimi ai 200 MPa), anche senza particolari trattamenti termici, presentando un'elevata rigidità che è funzione di valori

del modulo elastico prossimi talvolta ai 75 GPa contro i 30 di una pasta cementizia ordinaria.

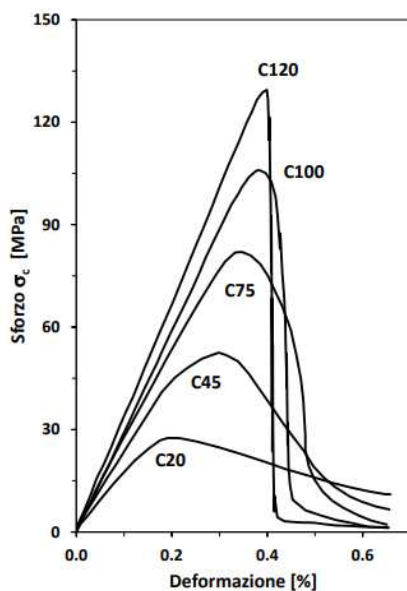


Figura 9: Legame sforzo deformazione in compressione uniaassiale per diverse classi di calcestruzzo.

Dal grafico sopra come riportato dal CNR-DT 209/2013 si nota che “Dal punto di vista micromeccanico, la principale differenza rispetto ai calcestruzzi ordinari risiede in un ritardo nell’attingimento della microfessurazione all’interfaccia tra pasta cementizia e aggregati che, per effetto del ridotto fenomeno di bleeding nei calcestruzzi HPC rispetto ai calcestruzzi ordinari, è meno porosa e quindi più resistente. Nei calcestruzzi ordinari invece, una concentrazione di sforzi proprio all’interfaccia pasta-aggregato dà luogo ad una microfessurazione più pronunciata (Cosenza et al. 1989, 1994, Pecce e Fabbrocino, 1999). Nei calcestruzzi ordinari, poi, l’evoluzione della microfessurazione all’interfaccia pasta-aggregato, determina quegli scorrimenti plastici che, a livello macroscopico, si traducono in un pronunciato ramo postpicco. Nel caso dei calcestruzzi HPC, invece, la ridotta microfessurazione fa sì che il ramo postpicco sia sempre meno pronunciato. Con particolare riferimento agli SCC, essi manifestano generalmente valori di resistenza a compressione simili a quelli del calcestruzzo tradizionale vibrato ed eventuali differenze sono coperte dai criteri di sicurezza su cui le norme sono basate.”

## 2.2. Comportamento a trazione

È stato dimostrato da numerose evidenze sperimentali che la resistenza a trazione uni-assiale per UHPC senza fibre presenta valori compresi tra 7 e 10 MPa. Il comportamento a trazione non è influenzato dalle dimensioni degli aggregati e la rottura è piuttosto fragile, non presentando un significativo ramo discendente (E. Fehlig, 2004).

La resistenza a trazione è connessa anche a quella a compressione e alle caratteristiche atte ad ottimizzarla. La presenza, infatti, di una matrice cementizia migliorata, in concerto con l'impiego di fibre ad elevata resistenza (superiore ai 2100 MPa) e con il miglioramento del legame adesivo fibre-matrice (ottenuto cambiando la geometria delle fibre) comportano migliori valori della resistenza a trazione.

L'aggiunta di fibre migliora principalmente il comportamento post fessurativo del materiale composito, Il (CNR-DT 204, 2008) afferma che la resistenza a trazione uniassiale di prima fessurazione del conglomerato fibrorinforzati 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).

Così come per il comportamento a trazione uni-assiale, anche quello a flessione è fortemente influenzato dall'orientamento e dalla quantità di fibre contenute nella matrice.

Alcuni studi (J. Jungwirth & A. Muttoni, 2004) come si può vedere dall'immagine sottostante, hanno provato a delineare un modello fisico in grado di descrivere il comportamento del materiale soggetto a trazione uni-assiale, partendo da prove sperimentali a trazione diretta su provini con e senza fibra in acciaio. Dal grafico sottostante possiamo notare come i provini fibrorinforzati hanno un campo plastico maggiore confrontandoli con provini senza fibre.

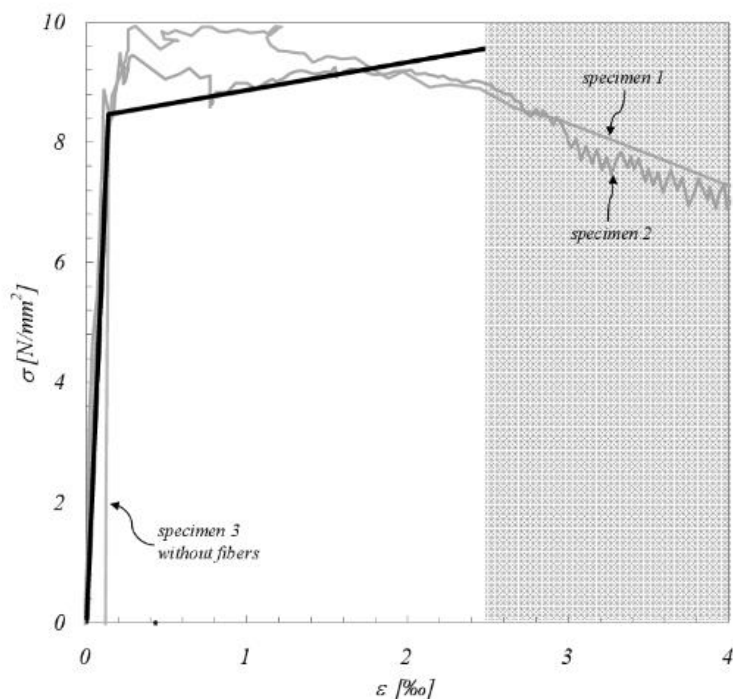


Figura 10: Grafico resistenza-deformazione di tre campioni, di cui uno senza rinforzo in fibre e gli altri 2 con fibre.

### 2.3. Principali parametri meccanici. (modulo di elasticità e coefficiente di Poisson)

Il modulo di elasticità di un UHPC è molto più alto di quello di un calcestruzzo ordinario, a parità di tipologia di aggregati a causa della sua struttura densa.

La sua grandezza, infatti, è funzione delle caratteristiche meccaniche degli aggregati e della loro percentuale presente nella pasta cementizia. Ad esempio, un UHPC con aggregati fini (ad esempio sabbia di quarzo) ha un modulo di elasticità pari circa a 48 GPa. Se l'aggregato è più resistente, tale parametro cresce: un UHPC con basalto frantumato presenta un modulo prossimo ai 58 GPa mentre uno con bauxite può raggiungere anche i 70 GPa.

Il modulo di Poisson invece risulta rimanere costante, variando tra 0.19 a 0.25 anche in differenti condizioni e tempi di stagionatura.

Il coefficiente di Poisson rimane costante anche durante una prova di carico a compressione prima che il materiale raggiunga la massima deformazione, così come illustrato dalla figura.

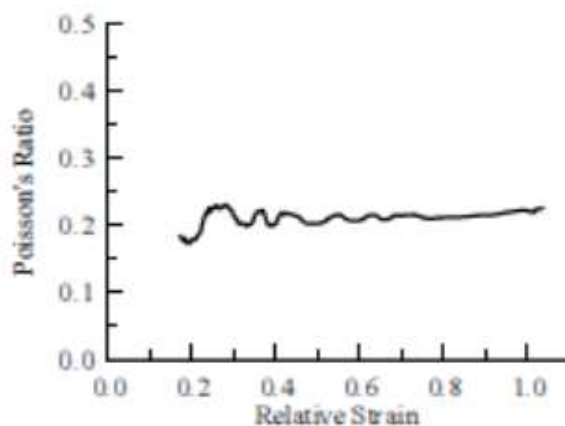


Figura 11: Variazione del coefficiente di Poisson durante le prove di scarico.

## 2.4. Durabilità

Per determinare la durabilità di un materiale è necessario del tempo, risulta difficile predire la durabilità di un materiale in assenza di dati.

I primi utilizzi degli HPC furono per elementi interni agli edifici e quindi poco esposti agli agenti ambientali, per valutarne la longevità è necessario un lasso di tempo considerevole.

Considerando che i primi elementi esteri realizzati risalgono ai primi anni 90, siamo comunque in grado di affermare, confrontandoli con i calcestruzzi ordinari, che gli HPC hanno una durabilità maggiore.

Le principali cause di degrado nei calcestruzzi ordinari sono legate alla permeabilità della matrice cementizia e alla severità dell'ambiente in cui essi si trovano.

Risulta semplice valutare la porosità essendo il calcestruzzo un elemento poroso e basico che contiene acqua che può congelare. Invece non è facile valutare come gli agenti aggressivi penetrino nella matrice. Negli HPC con un basso rapporto acqua/cemento risulta difficile misurare anche la penetrazione di acqua per il basso indice di vuoti che viene a crearsi.

Un Test che ci permette di valutare la penetrabilità dell'elemento dal cloruro è il "Rapid chloride-ion permeability test". La permeabilità agli ioni cloruro è espressa in Coulombs, che corrispondono al quantitativo totale di carica elettrica che passa durante 6 ore di test attraverso un campione di calcestruzzo soggetto ad una differenza di potenziale di 50 V.

Quando viene effettuato tale test su un campione di calcestruzzo con basso rapporto a/c, il numero di Coulomb che passano attraverso il campione decresce significativamente. È facile raggiungere una permeabilità minore di 1000 C per un HPC contenente circa il 10% di FS e che presenta un rapporto a/c di 0.4-0.45.

Il test inoltre rivela che la connessione tra i pori decresce drasticamente con la riduzione del rapporto a/c, rendendo più difficile rispetto ai calcestruzzi ordinari la migrazione degli ioni aggressivi o dei gas.

### **3. Composizione degli UHPFRC**

#### **3.1. Composizione generale**

I componenti degli UHPFRC sono acqua, cemento, inerti, aggiunte di minerali, fibre e additivi. Questa miscela è molto diversa da quella usualmente utilizzata per il calcestruzzo, principalmente nell'uso delle fibre in acciaio, dall'uso di additivi come, ad esempio, il superfluidificante che fa diminuire notevolmente il rapporto acqua/cemento dell'impasto, per la selezione degli inerti.

L'uso degli additivi superfluidificanti ha un duplice effetto sul prodotto finale, in quanto aumenta la lavorabilità del composto andando a diminuire i vuoti d'aria che possono

crearsi con armature fitte o per errata posa in opera delle maestranze, e abbassa il rapporto  $a/c$  che ha come conseguenza una porosità bassa.

Il minerale che viene aggiunto al composto in genere è il fumo di silice che, grazie al diametro dei granuli ridotto, riesce a riempire i vuoti interstiziali tra il cemento e gli aggregati addensando la miscela.

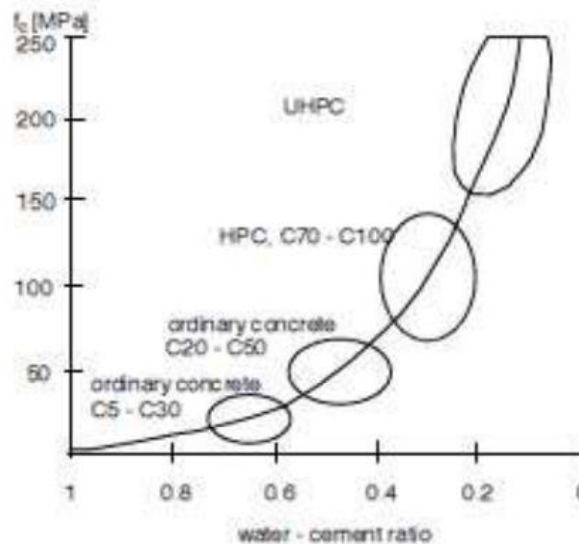


Figura 12: Variazione della resistenza a compressione in funzione del rapporto  $a/c$ .

### 3.2. Il Cemento

Le proprietà meccaniche risentono dell'eterogeneità del materiale dovuta alla presenza di cristalli CH di elevate dimensioni e ai numerosi pori e vuoti interstiziali intorno ad essi.

I principali componenti di una pasta di cemento idratata sono: cristalli di Idrossido di Calcio (CH o portlandite) e quelli di solfo-alluminati di Calcio (CS o ettringite) nonché il gel dei silicati di calcio idrato (C-S-H). Il gel dei silicati di calcio idrati sono responsabili delle prestazioni meccaniche del composto e occupano il tra il 50 ed il 60% del volume, mentre il restante 40% equamente ripartito è composto da CH e CS. La dimensione dei cristalli C-S-H (<2nm) è notevolmente minore di quella dei cristalli CH (circa = 1000nm) provocando una variazione notevole dei pori capillari tra cristalli e aggregati,



principalmente in funzione del rapporto a/c. La distribuzione delle tensioni tende a concentrarsi nell'intorno dei vuoti causando microfessurazioni. Per quanto detto la resistenza a compressione varia molto in funzione del rapporto a/c, il problema quindi si risolve rendendo omogenea la matrice cementizia, aumentando la densità del composto cioè introducendo nel mix design delle particelle di dimensioni adeguate a riempire questi vuoti.

Questo è stato possibile utilizzando i seguenti accorgimenti:

- Sostituendo gli aggregati grossi in favore di quelli con dimensioni contenute e che presentano inoltre una rigidità simile a quella della pasta di cemento;
- Aggiungendo fumi di silice, che vanno a colmare i vuoti tra granuli di cemento e gli aggregati, riducendo la porosità;
- Adottando un basso rapporto a/c, questo riduce i pori tra i granuli di cemento e aumenta il volume della pasta di cemento diminuendo quello dei vuoti;
- Utilizzando additivi superfluidificanti aumenta la lavorabilità del composto, che decresce con il rapporto a/c.

Andando ad analizzare al microscopio la matrice cementizia con le precedenti considerazioni osserviamo che il volume dei vuoti interstiziali diminuisce molto e la matrice risulta più densa rispetto a quella di un calcestruzzo ordinario e di uno ad alta resistenza.

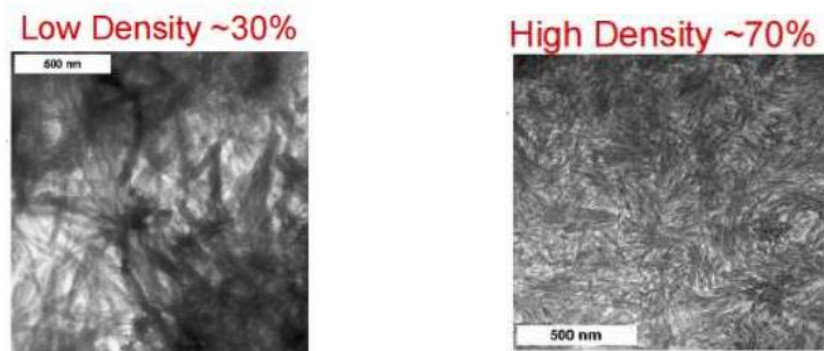
Quando il contenuto dei fumi di silice raggiunge il 30% circa del cemento, aggiungendo polvere di silice e aumentando la temperatura della stagionatura si ottiene un ambiente pozzolanico che riduce i cristalli di CH prodotti durante l'idratazione e li converte in cristalli C-S-H più resistenti dei precedenti incrementando notevolmente le proprietà meccaniche.

A questo punto è necessario analizzare il rapporto tra gel di C-S-H e gli inerti, in particolare nella zona di transizione tra aggregato e pasta di cemento.

Una delle scoperte recenti più importanti in quest'ambito (F.-J. Ulm, 2007) concerne la comprensione delle diverse tipologie di C-S-H che si formano durante il processo di idratazione del cemento, distinguendone una a bassa densità (LD-C-S-H) ed una ad alta densità (HD-C-S-H). È stato dimostrato che per dimensioni nanometriche delle particelle

del C-S-H si ottiene la massima densità matematicamente ottenibile, in questo modo, la quantità di HD-C-S-H aumenta notevolmente.

Quanto detto è dovuto all'aggiunta di fumi di silice o di nano-particelle analoghe che oltre al ben noto "filler effect", riescono ad ottimizzare la struttura del C-S-H, attraverso creazione di "centri di cristallizzazione" dei componenti di idratazione, e partecipano alle reazioni pozzolaniche, eliminando componenti indesiderati e contribuendo alla formazione di strati addizionali di C-S-H, diventando anche la causa principale del miglioramento della struttura delle zone di contatto tra aggregati e legante cementizio.



*Figura 13: Immagine al microscopio dei cristalli C-S-H, a sinistra a bassa densità mentre a destra quelli ad alta densità.*

### **3.3. Gli Aggregati**

Gli aggregati degli elementi sempre presenti nel mix design del calcestruzzo, in genere gli aggregati nei calcestruzzi tradizionali non arrivano quasi mai a rottura prima degli altri componenti. Negli UHPFRC invece questi elementi sono la parte debole del composto ed è quindi di fondamentale importanza andare ad analizzare le loro caratteristiche meccaniche in base alla tipologia di minerale per selezionare il più adatto alle nostre esigenze. È stato di recente dimostrato (Kýlýc et al., 2008) come varie tipologie di aggregato influenzino diversamente le caratteristiche meccaniche di un UHPC. Confrontando varie tipologie di rocce è stato dimostrato che varietà più resistenti a

compressione come gabbro, basalto, quarzite, calcare e arenaria inducono un maggiore resistenza nel calcestruzzo che cresce all'aumentare della resistenza dell'aggregato.

In linea generale, si può affermare che la resistenza dell'aggregato limita la resistenza del calcestruzzo a compressione e flessione mentre la zona di transizione influenza e limita la resistenza a compressione.

La maggior resistenza nei calcestruzzi viene ottenuta utilizzando il basalto, questo perché analizzando la fessura si nota come questa attraversi indistintamente la pasta cementizia e gli aggregati. I calcestruzzi con calce ed arenaria presentano una resistenza pari a quella delle rocce essendo queste ultime l'elemento in cui avviene la fessurazione.

Nel caso della quarzite si ha una resistenza del composto inferiore a quella della pasta cementizia e dell'aggregato, questo è dovuto alla superficie del minerale che è levigata e non permette una completa adesione tra aggregato e pasta.

Un altro aspetto influente sulla resistenza del composto è il rapporto tra gli aggregati e il cemento, si è visto che la resistenza a compressione aumenta con un rapporto pari a 1.1. Questo aspetto, insieme all'utilizzo di aggregati di differente diametro, migliorano le proprietà meccaniche del composto rispetto all'utilizzo di un solo componente (Park et al., 2008).

Oltre l'utilizzo di sabbie vengono impiegate delle polveri molto fini, nell'ordine dei 13  $\mu\text{m}$ , che svolgono un'azione di filler come il fumo di silice ma senza reazioni chimiche con il cemento.

Aggiungendo il 30% di polvere al cemento la densità della matrice aumenta e questo comporta un incremento delle sue prestazioni.

È stato inoltre dimostrato che la compattezza del calcestruzzo è indipendente dall'assortimento granulometrico della sabbia usata, sia in termini di curva granulometrica che in termini di superficie dell'aggregato. Per la realizzazione di UHPFRC possono essere usate sia sabbie naturali, in genere con dimensioni degli elementi poco variabili e superficie arrotondata, che sabbie artificiali, con distribuzione ampia e superficie scabra.

### 3.4. Il fumo di silice

Questo minerale è conosciuto come microsilice, fumo condensato di silice, silice volatile o polvere di silice. È il sottoprodotto della fabbricazione del silicio e delle leghe ferro-silicio, i SF sono particelle molto fini e sferiche, di colore grigio o bianco, con diametro medio inferiore nel 95% dei casi ad 1  $\mu\text{m}$  (più spesso comprese 0,01 e 0,1  $\mu\text{m}$ ) e che presentano dal punto di vista chimico un alto contenuto di silice amorfa con piccole quantità di acciaio e magnesio. Il ruolo del fumo di silice nel composto è legato a tre processi di tipo fisico-chimico (M. I. Khan & R. Siddique, 2011):

- Riduzione delle dimensioni dei pori e densificazione della matrice, le microparticelle riempiono i vuoti tra i granuli di cemento, migliorando l'aderenza tra i componenti e aumentando la densità (effetto fillerizzante);
- Reazione pozzolanica con l'idrossido di calcio per creare gel di C-S-H;
- miglioramento della zona di interfaccia tra pasta di cemento e aggregati, riducendone lo spessore e il grado di orientamento dei cristalli di portlandite (CH) in essa presenti.

Il risultato di tali processi è un incremento delle prestazioni, in particolare di resistenza a compressione, a flessione, modulo di elasticità, tenacità e resistenza all'abrasione. Un'altra conseguenza è la maggior durabilità, in particolare: una minor permeabilità al cloruro e all'acqua e un'alta resistenza agli attacchi chimici.

È stato dimostrato inoltre (Park et al., 2008) che in linea generale il contenuto ottimale di fumo di silice si aggira intorno al 20-30%: con percentuali maggiori, infatti, si assiste ad una decrescita delle proprietà meccaniche. Ciò è dovuto al fatto che con tale quantità il fumo di silice consuma durante le reazioni pozzolaniche tutta la quantità di CH presente all'interno della miscela, mentre con percentuali più elevate tali polveri rimarrebbero inutilizzate, provocando una caduta nelle resistenze a compressione.

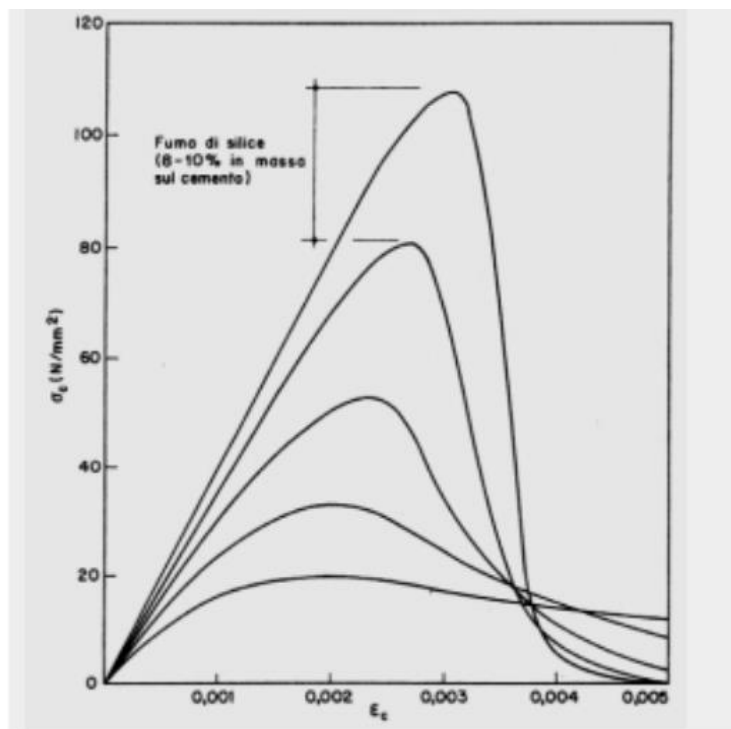


Figura 14: Effetti dell'introduzione del fumo di silice per ottenere una maggiore resistenza a compressione.

### 3.5. Additivi

Gli additivi impiegati sono superfluidificanti, il beneficio del loro impiego è dovuto alla capacità di mantenere basso il rapporto a/c ed alta la lavorabilità del composto, anche senza intaccare la composizione granulometrica della miscela. Per consentir quindi una buona lavorabilità della miscela, non andando a discapito del contenuto d'acqua, l'uso dei SF richiede l'impiego di una quantità di superfluidificanti direttamente proporzionale al loro contenuto (Mazloom et al., 2004) I vantaggi del loro utilizzo sono:

- Aumento della lavorabilità: partendo da dosaggi degli elementi per la miscela prefissati aumentando la lavorabilità si facilita la messa in opera del calcestruzzo;

- Diminuzione dell'acqua nel composto: diminuendo l'acqua e usando superfluidificanti aumentano le caratteristiche meccaniche e di durabilità del composto a parità di lavorabilità;
- Diminuzione del quantitativo di cemento: prefissata la lavorabilità e la resistenza una riduzione del cemento induce una riduzione della deformazione viscosa (creep), del ritiro e della deformazione termica in seguito al calore di idratazione sviluppato dal composto.

I superfluidificanti agiscono causando la dispersione degli agglomerati in granuli più piccoli. Una miscela di cemento molto diluita nell'acqua presenta accumuli di cemento separati dall'acqua, questo processo si chiama flocculazione ed è causato dall'attrazione elettrostatica tra i vari granuli che si presentano con le superfici caricate elettrostaticamente per effetto della macinazione e della rottura dei legami ionici presenti nei costituenti del clinker. La presenza dei superfluidificanti permette, a seconda della tipologia del polimero presente, o l'assorbimento di gruppi carichi negativamente (gruppi anionici negativi presenti in quelli a base di poli-naftalen-solfonati e poli-melammin-solfati) che determinano una repulsione elettrostatica tra i granuli o l'assorbimento sulla superficie dei granuli di cemento di molecole caratterizzate dalla presenza di catene laterali (come per quelli a base di poli-acrilati e poli-carbossilati) che impediscono ai granuli di cemento di avvicinarsi l'uno l'altro.

### **3.6. Le fibre**

Le fibre sono un altro importante componente che caratterizza gli UHPFRC, le fibre più usate sono in acciaio. Le dimensioni delle fibre variano da una lunghezza di 6 a 80 mm con un'area di sezione che va da 0.1 a 1.5 mm<sup>2</sup> e un diametro che va da 0.15 a 1.2 mm. La resistenza a trazione supera normalmente i 2400 Mpa. La sezione delle fibre in acciaio può essere sia rettangolare che circolare, in genere vengono prodotte con taglio o tritatura di fili d'acciaio, lamiere e barre.

In estremità presentano normalmente una variazione di forma, possono essere schiacciate o deformate con una piegatura ad uncino per migliorarne l'adesione al calcestruzzo.

L'acciaio usato per la loro realizzazione può essere:

- Acciaio dolce (basso contenuto di carbonio);
- Acciaio ad alto contenuto di carbonio;
- Acciaio inossidabile (inox).

Le Istruzioni CNR-DT 204/2006 sui calcestruzzi fibro-rinforzati forniscono una classificazione delle fibre in funzione delle caratteristiche meccaniche prevedendo tre categorie (R1, R2, R3), come definite in tabella.

Diametro equivalente [mm]	Resistenza minima a trazione [N/mm <sup>2</sup> ]												Prova di piegamento alternato
	R1				R2				R3				
	1)		2)		1)		2)		1)		2)		
	$R_m$	$R_{p0.2}$	$R_m$	$R_{p0.2}$	$R_m$	$R_{p0.2}$	$R_m$	$R_{p0.2}$	$R_m$	$R_{p0.2}$	$R_m$	$R_{p0.2}$	
$0.15 \leq d_f < 0.50$	400	320	480	400	800	720	1080	900	1700	1360	2040	1700	assenza di rotture
$0.50 \leq d_f < 0.80$	350	280	450	350	800	640	1040	800	1550	1240	2015	1550	
$0.80 \leq d_f \leq 1.20$	300	240	390	300	700	560	910	700	1400	1120	1820	1400	
1) Per fibre rettilinee													
2) Per fibre sagomate													

Tabella 2: Nella tabella i simboli  $R_m$  e  $R_{p0.2}$  rappresentano, rispettivamente, la resistenza a trazione (corrispondente al carico massimo) e la resistenza di scostamento dalla proporzionalità con un'estensione non proporzionale pari allo 0.2% della lunghezza di base dell'estensimetro.

Le fibre in fase fessurativa vanno ad influenzare le proprietà meccaniche andando a migliorare la capacità di trasferimento dei carichi. Le fibre disposte internamente al composto, quando il materiale arriva a rottura, impediscono la dislocazione della fessura intervenendo con un meccanismo a ponte, che limita la propagazione della fessura e la fuoriuscita delle fibre. La forma delle fibre è fondamentale in questo processo, infatti, la superficie ruvida e le estremità incurvate aumentano l'aderenza delle stesse al composto, questo aspetto nel diagramma carico spostamento può essere inteso come un allungamento del tratto plastico conferendo capacità di duttilità più ampia alla struttura. Un altro aspetto importante riguarda la tenacità del UHPFRC che è influenzata positivamente dalla presenza di fibre, questa proprietà dipende dal rapporto di aspetto della fibra, dal dosaggio delle fibre nel composto e dalle caratteristiche fisico-meccaniche delle fibre in aggiunta a quelle della matrice cementizia.

L'incremento della capacità duttile del materiale è funzione del fattore di forma e del dosaggio volumetrico di fibre. Il fattore di forma è il rapporto tra la lunghezza ed il

diametro delle fibre, il dosaggio volumetrico è la quantità di fibre presenti nel composto in  $\text{kg/m}^3$ . Aumentando il fattore di forma aumenta l'aderenza e aumentando il dosaggio di fibre nel composto aumenta la possibilità che ci sia una distribuzione omogenea. Le proprietà del materiale inoltre dipendono anche dalla spaziatura delle fibre e dal numero di fibre per unità di area, questo significa che il comportamento degli UHPFRC dipende anche dalla distribuzione casuale delle fibre nel composto e che quindi due provini con stesso dosaggio di fibre possono arrivare a rottura con dei valori di resistenza massima distanti tra loro.

## 4. Digital Image Correlation

La tecnica DIC (Digital Image Correlation) è una tecnica con la quale riusciamo a stimare lo spostamento e le deformazioni del provino durante la prova. La tecnologia DIC è di natura ottica e può essere applicata su qualsiasi materiale, uno dei suoi vantaggi è che può essere applicata senza il contatto tra la superficie dell'oggetto da misurare e lo strumento utilizzata. Si distinguono tecniche:

- DIC 2D: si usa una sola fotocamera, questa tecnica consente di valutare le deformazioni nel piano;
- DIC 3D: si usano due fotocamere, in questo caso si analizzano le deformazioni fuori dal piano.

Nel secondo caso le due fotocamere, disposte entrambe davanti ma con diversa angolazione, acquisiscono immagini contemporaneamente e conoscendo la distanza delle fotocamere ed il loro orientamento rispetto alla superficie stessa permettono di calcolare la posizione, in coordinate, di un punto qualsiasi sulla superficie stessa. Le coppie di immagini digitali sono poi confrontate pixel a pixel, mediante un algoritmo di correlazione.

La corrispondenza di due punti delle immagini ci permette di determinare il campo di spostamento e mediante si può risalire al campo di deformazione. La precisione della tecnica è funzione della distorsione delle lenti, dall'uniformità della distribuzione della luce e la qualità dello spackle pattern. Nel primo caso influisce la qualità delle fotocamere, negli altri due casi invece troviamo dei fattori che possono essere controllati



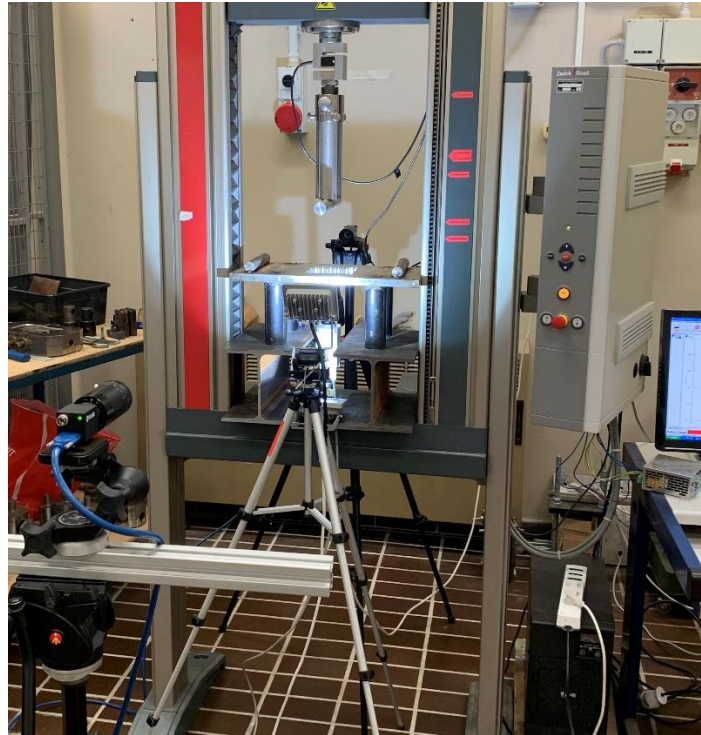
dall'operatore. In particolare, la luminosità dovrebbe essere costante ed omogenea durante l'intera prova e la superficie da testare dovrebbe presentare un pattern di punti casuale il meno ripetitivo possibile e ad elevato contrasto cromatico.

La strumentazione, utilizzata nella Digital Image Correlation (DIC), è costituita da:

- 1 o 2 telecamere in bianco e nero (1 nel caso di correlazione d'immagine digitale 2D; 2 per la DIC 3D);
- Scheda di acquisizione dati: permette di importare le immagini registrate dalle telecamere;
- Sorgente luminosa per facilitare alle telecamere il riconoscimento del pattern realizzato;
- Computer per la correlazione ed elaborazione delle immagini.



*Figura 15: Computer collegato alle fotocamere per impostare la corretta inquadratura.*



*Figura 16: Set up della prova in cui possiamo notare le fotocamere e il faro per una corretta illuminazione del provino.*

#### **4.1. Il pattern**

La realizzazione del pattern è un passaggio di notevole rilevanza per la restituzione dei risultati.

Per fare in modo che il sistema funzioni correttamente si applica una passata di vernice bianca, uniforme sulla superficie del provino soggetta a deformazione, successivamente un pattern di colore nero in modo tale da accentuare il contrasto. Si può in altri casi invertire tale scelta, ovvero stendere sulla superficie analizzata una vernice di colore nero e realizzare un pattern di colore bianco o è anche possibile utilizzare altri colori che garantiscano un certo contrasto. Con il termine "Speckle" viene indicato un pattern casuale di punti sulla superficie del provino. La sua dimensione deve essere scelta accuratamente perché uno speckle troppo piccolo porta alla perdita di micro-spostamenti mentre uno speckle troppo grande causa correlazioni errate.



*Figura 17: Due provini con intaglio dopo la verniciatura, è possibile notare il pattern irregolare e ad alto contrasto cromatico nell'altezza del provino dove saranno puntate le fotocamere.*

Lo speckle può essere applicato in diversi modi in base all'esigenza. Si può utilizzare uno spray di vernice o un aerografo, uno strumento in grado di spruzzare vernice nebulizzate oppure attraverso l'impiego di uno stencil ovvero una maschera che rappresenta la geometria desiderata dello speckle.

Un' alternativa consiste nell'utilizzare una luce bianca da laboratorio, orientata parallelamente alla superficie, in modo da sfruttare la rugosità del supporto e si venga a creare una superficie speckle tramite l'alternanza casuale di zone di luce e ombra.

Le telecamere più usate sono dotate di sensore bianco e nero, il cui segnale viene poi convertito in scala di grigi; in tal modo si riesce ad attribuire ad ogni pixel un valore che permette di "digitalizzare" l'immagine in un insieme di intensità (scala 0-255) come mostrato nella figura 18.

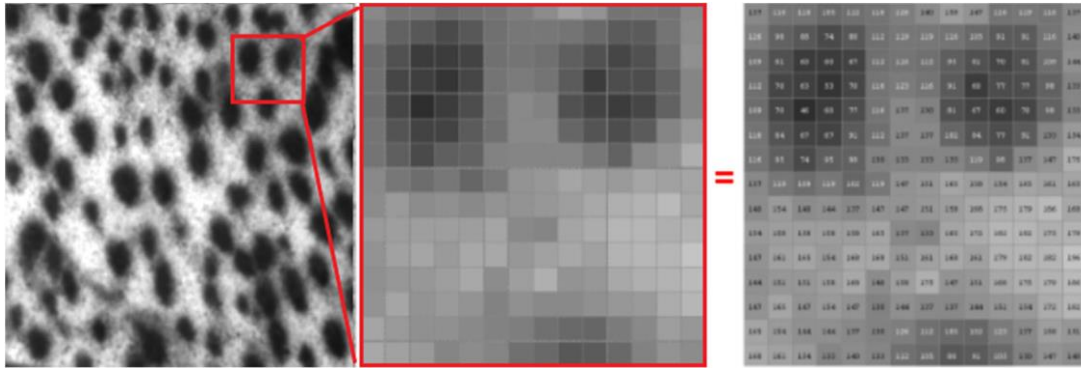


Figura 18: Rappresentazione digitale dell'immagine.

L'obiettivo è quello di rappresentare ciascun punto della superficie inquadrata con un valore corrispondente all'intensità luminosa percepita dal sensore ottico. Si cerca ovvero di rappresentare un intorno di un punto materiale mediante una funzione  $f(X;Y)$  che permetta di restituire un valore pari all'intensità della luce riflessa. Bisogna quindi utilizzare un'immagine puntiforme, in pixel, a cui associare questi valori di luminosità. A tal proposito è necessario introdurre un valore che permette di esprimere questa caratteristica che per semplicità chiameremo "i". Tale valore può assumere un valore compreso tra 0 e 255, corrispondenti rispettivamente al nero e al bianco. I valori intermedi invece rappresentano le diverse tonalità di grigio. E' proprio la distribuzione casuale a permettere la definizione della funzione  $f(X;Y)=i$  su tutto il campo, infatti se la superficie avesse una colorazione omogenea, sarebbe difficile individuare i diversi livelli di grigio, e di conseguenza riferirli ad una posizione sulla superficie materiale.

Partendo da un generico punto materiale  $p(x;y)$ , il primo passo consiste nel creare una corrispondenza "c" con un punto  $P(X;Y)$  dell'immagine digitale; da questo poi attraverso

$f(X;Y)=i$ , si assocerà una certa intensità luminosa.

$$p(x; y) \xrightarrow{c} P(X; Y) \xrightarrow{f(X;Y)} i$$

## 4.2. La correlazione delle immagini

I passaggi per la correlazione delle immagini sono 2, per prima cosa si crea la griglia di punti nell'immagine iniziale nella quale il provino non è ancora stato caricato. La griglia viene creata con appositi programmi, tra cui MATHLAB, e per la sua costruzione sono necessari i seguenti parametri:

- Coordinata x del primo nodo in alto a sinistra;
- Coordinata y del primo nodo in alto a sinistra;
- Lunghezza iniziale degli elementi;
- Altezza iniziale degli elementi;
- Nodi orizzontali;
- Nodi verticali.

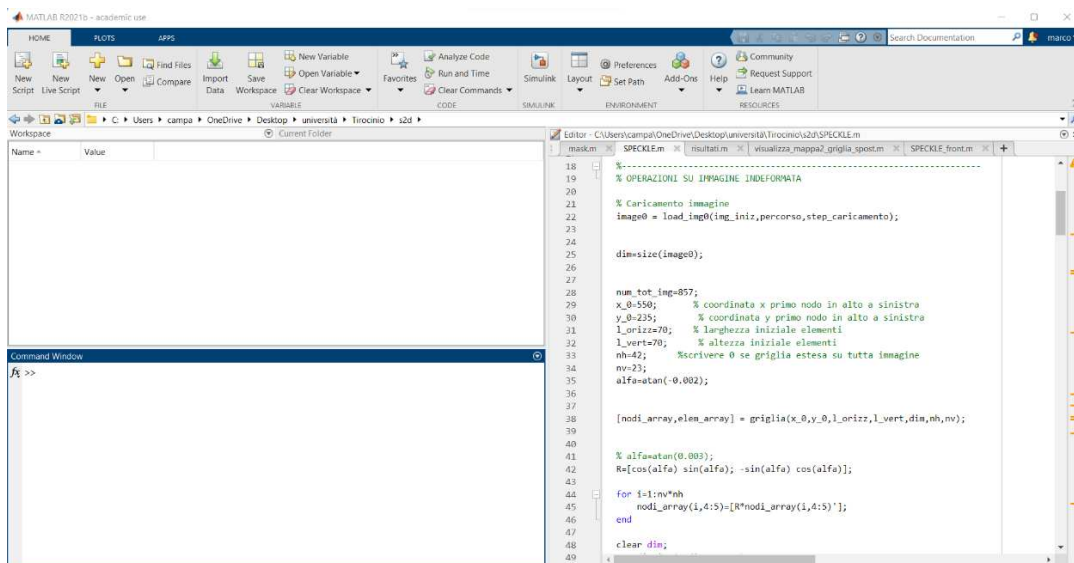
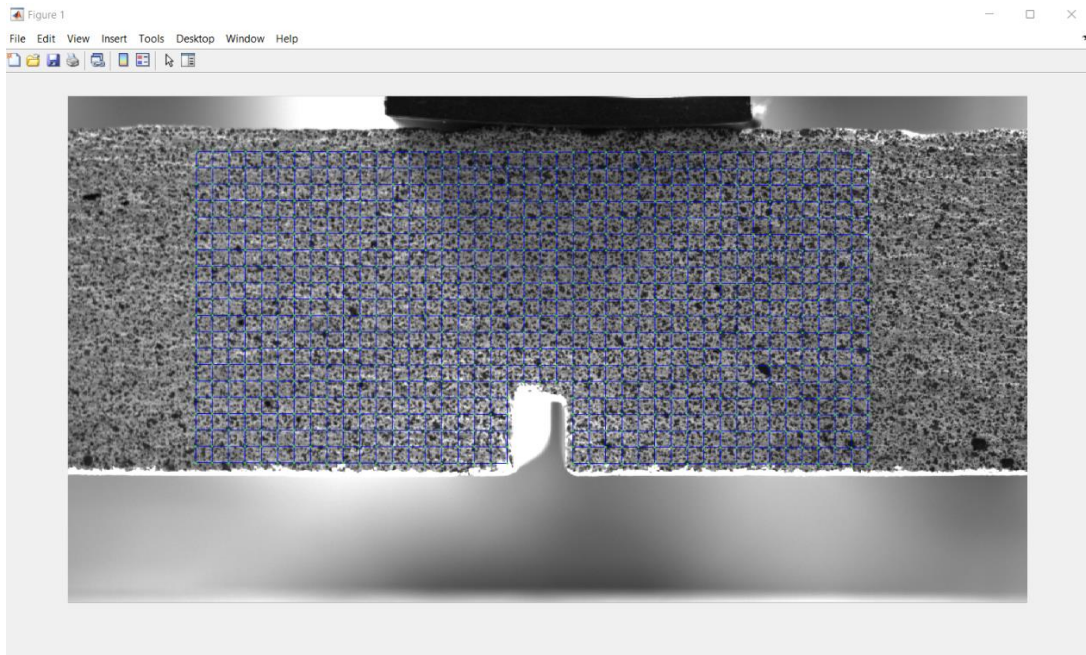


Figura 19: Creazione della griglia eseguito con MATHLAB.

Una volta impostati questi parametri si procede con la creazione della griglia inserendo nel programma un break point ad una determinata riga per arrestare temporaneamente il calcolo e controllare se la griglia realizzata è posizionata correttamente. In caso contrario ci sono altri fattori utili che ci consentono di modificare la forma e la posizione della griglia tra cui  $\alpha = \text{atan}(0.006)$  che modifica l'angolo della griglia

rispetto ad un asse orizzontale parallelo all' asse delle ascisse. A questo punto viene tolto il break point e si procede fino al termine del calcolo per ottenere la griglia sul provino deformato e quindi la sua deformazione.



*Figura 20: Esempio della griglia sul provino.*

Nel secondo passaggio la griglia è già stata creata ed è stato avviato il calcolo su MATHLAB. Il programma individua la posizione dei punti di intersezione della griglia, la confronta con quella dell'immagine successiva e calcola il loro spostamento.

### **4.3. Tecniche di Cross-relation**

Le tecniche di cross-relation sono basate sulla comparazione di due immagini raffiguranti la stessa superficie materiale nel corso della sollecitazione. Il confronto può avvenire tra due frame consecutivi, o con un frame di riferimento e solitamente viene considerato lo stato superficiale non deformato come frame di riferimento; per tale scopo, si utilizzano delle funzioni di cross-correlazione  $C$ . Su ogni immagine è possibile definire una matrice

M tale che per ciascun valore delle sue coordinate, sia possibile conoscere il valore del livello di grigio tramite  $f(X;Y) = i$ .

Si faccia riferimento alla figura 21: nell' intorno  $S_0$  dell'immagine di riferimento è collocato un punto  $p$  a cui l'operatore corrispondenza associa un pixel  $P$ . Si consideri inoltre un punto  $q$  appartenente all' intorno  $S_0$  a cui è associato un pixel  $Q$  di coordinate  $(X_0 + dX_0; Y_0 + dY_0)$ .

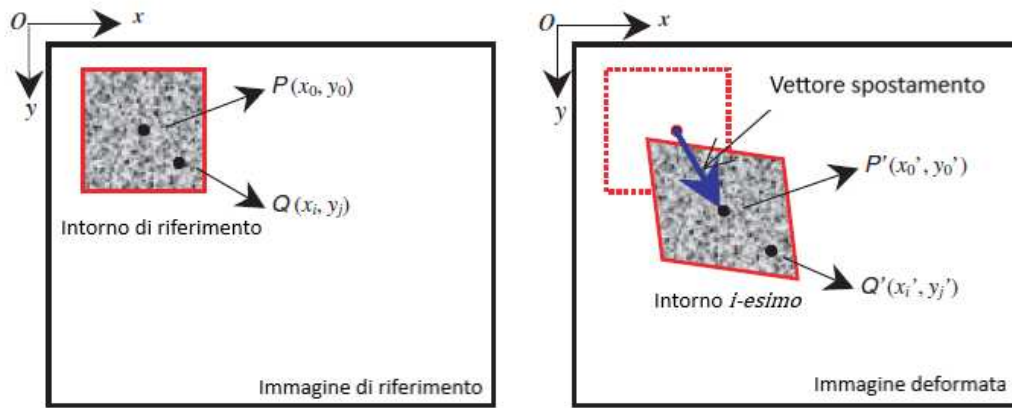


Figura 21: A sinistra è riportata l'immagine di riferimento e a destra l'immagine deformata.

Detti  $u$  gli spostamenti lungo  $x$  e  $v$  gli spostamenti lungo  $y$ , i pixel  $P$  e  $Q$  si troveranno in una posizione  $P'$  e  $Q'$  nell' intorno  $S'$  come si può notare nell' immagine deformata. Le intensità relative a  $P-P'$  e  $Q-Q'$  sono definite:

$$f(P) = f(X_0; Y_0) \text{ e } f'(P) = f(X_0 + u(P); Y_0 + v(P)) = f(X'_0; Y'_0)$$

$$\text{con } \begin{cases} X'_0 = X_0 + u(P) \\ Y'_0 = Y_0 + v(P) \end{cases} \quad (5.1)$$

$$f(Q) = f(X_0 + dX_0; Y_0 + dY_0) \text{ e } f'(Q) = f(X_0 + u(Q) + dX_0; Y_0 + v(Q) + dY_0) \quad (5.2)$$

La deformazione subita determina della differenza a livello globale nell' intorno considerato, ma le due matrici M e M' conservano i valori di intensità locale e quindi possiamo scrivere:

$$f(P)=f'(P') \text{ e } f(Q)=f'(Q')$$

Il tensore delle piccole deformazioni può essere approssimato con uno sviluppo in serie di Taylor al primo grado:

$$u(P) - u(Q) \cong \frac{\partial u(P)}{\partial x} x + \frac{\partial u(P)}{\partial y} y$$

$$v(P) - v(Q) \cong \frac{\partial v(P)}{\partial x} x + \frac{\partial v(P)}{\partial y} y$$

Supponendo di aver scelto un intorno sufficientemente piccolo, le coordinate di Q nella configurazione attuale sono  $(X'_0 + dX'_0; Y'_0 + dY'_0)$  e possiamo notare dalla figura 22 che:

$$dX'_0 = dX_0 + u(Q) - u(P) \cong \left(1 + \frac{\partial u(P)}{\partial x}\right) x_0 + \frac{\partial u(P)}{\partial y} y_0$$

$$dY'_0 = dY_0 + v(Q) - v(P) \cong \frac{\partial v(P)}{\partial x} x_0 + \left(1 + \frac{\partial v(P)}{\partial y}\right) y_0$$

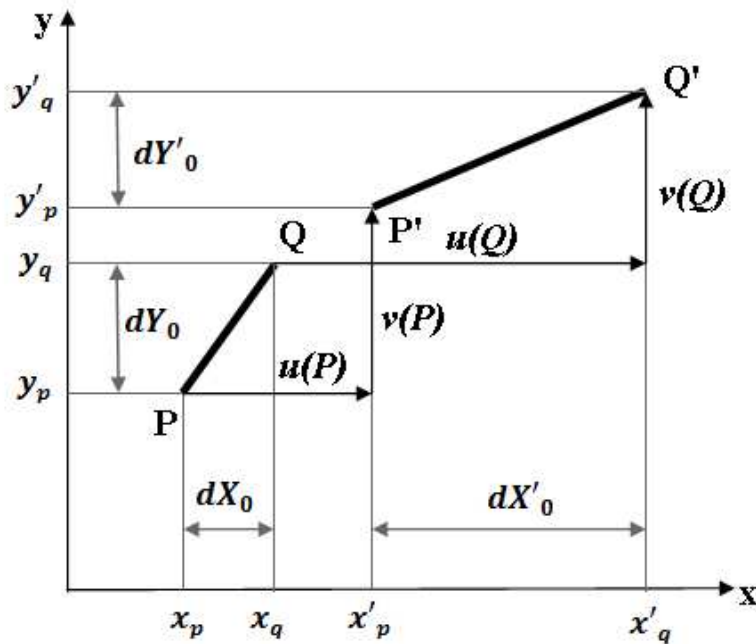


Figura 22: Grafico riportante lo spostamento di coordinate del segmento PQ.



Facendo riferimento alla (5.1), possiamo scrivere:

$$Q' = \left\{ X_0 + u(P) + \frac{\partial u(P)}{\partial x} x + \frac{\partial u(P)}{\partial y} y + dX_0; Y_0 + v(P) + \frac{\partial v(P)}{\partial x} x + \frac{\partial v(P)}{\partial y} y \right\}$$

che consente di riscrivere la (5.2) nel seguente modo:

$$f'(Q') = f(Q) = f \left\{ X_0 + u(P) + \frac{\partial u(P)}{\partial x} x + \frac{\partial u(P)}{\partial y} y + dX_0; Y_0 + v(P) + \frac{\partial v(P)}{\partial x} x + \frac{\partial v(P)}{\partial y} y \right\}$$

Le variabili:

$$u(P), v(P), \frac{\partial u(P)}{\partial x}, \frac{\partial u(P)}{\partial y}, \frac{\partial v(P)}{\partial x}, \frac{\partial v(P)}{\partial y}$$

delle *variabili di correlazione*  $V_c$  per un determinato punto P centrato nell'intorno oggetto di valutazione e consentono il calcolo degli spostamenti e quindi delle deformazioni di tutti i punti apparenti ad  $S_0$ . Per determinare le  $V_c$  si parte dal rintracciare due intorni che siano in buona approssimazione sovrapponibili e operare il confronto tra le intensità  $f(X_0, Y_0)$  di un intorno  $S_0$  di  $P_0(X_0, Y_0)$  con quella  $f'(P) = (X'_0, Y'_0)$  di  $S'_0$  in cui giace il punto  $P'(X'_0, Y'_0)$ . Il confronto si effettua sfruttando una funzione di cross-correlazione C esprimibile come segue:

$$C \left( u(P), v(P), \frac{\partial u(P)}{\partial x}, \frac{\partial u(P)}{\partial y}, \frac{\partial v(P)}{\partial x}, \frac{\partial v(P)}{\partial y} \right) = \frac{\int_{S'_0} f(X_0, Y_0) f'(X_0 + \xi Y_0 + \mu) dIm}{\sqrt{\int_{S_0} [f(X_0, Y_0)]^2 dIm \int_{S'_0} [f'(X_0 + \xi Y_0 + \mu)]^2 dIm}}$$

con

$$\xi = u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + v + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y$$

$$\mu = u + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + v + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y$$

Inizialmente si assumono come variabili le componenti  $u$  e  $v$  dello spostamento, poi si procede alla determinazione delle  $\frac{\partial u}{\partial x}$  e  $\frac{\partial v}{\partial y}$  mantenendo  $u$  e  $v$  pari a  $[u(P);v(P)]$ , e nulli gli scorrimenti angolari  $\frac{\partial v}{\partial x}$  e  $\frac{\partial u}{\partial y}$ ; si procede in maniera per la determinazione delle dilatazioni lineari in direzione degli assi X e Y, ed infine si passa alla determinazione degli scorrimenti angolari mantenendo costanti  $[u(P);v(P)]$ ,  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$ . La procedura viene poi ripetuta per un certo numero di valori  $(u,v)$  scelti intorno a S(P) per valori fissati delle altre variabili. Per la trattazione, l'interpretazione discreta non è perfettamente adatta visto che lo spostamento può assumere valori pari anche a frazioni di pixel. Dunque si considera una funzione continua I che si ottiene dall' interpolazione dei valori discreti in ogni intorno analizzato, creando una corrispondenza biunivoca tra lo spazio delle coordinate materiale  $(x,y)$  e quelle dei pixel nelle sequenze di immagini  $(X;Y)$ .

Un' espressione polinomiale per I è  $I(I_{px}; I_{py})$ :

$$\begin{cases} I_{px} = a_{x00} + a_{x10}F_x + a_{x01}F_y + a_{x11}F_xF_y + \dots + a_{xmn}F_x^n F_y^n \\ I_{py} = a_{y00} + a_{y10}F_x + a_{y01}F_y + a_{y11}F_xF_y + \dots + a_{ymn}F_x^n F_y^n \end{cases}$$

Maggiore è il grado del polinomio, maggiore è l'accuratezza del calcolo, tuttavia aumentano i problemi della convergenza. Al contrario per  $n=1$  si rischia di introdurre nella correlazione un errore confrontabile con la misura stessa.

#### 4.4. Correlazione a campo intero

Quello che è stato introdotto fino ad ora consente l'analisi di intorni isolati all'interno della regione di interesse. Una tecnica, che poi è anche quella utilizzata nella nostra situazione, è la tecnica di griglia. Come anche descritto precedentemente, si realizza una griglia sulle immagini costituita da un certo numero di nodi.

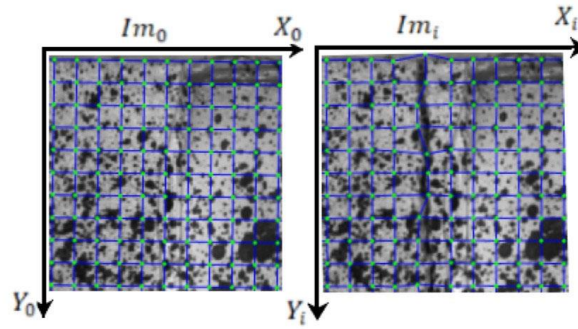


Figura 23: Griglia sulle immagini.

La correlazione è basata sulla definizione di funzioni che permettono la trasposizione dei nodi dall' immagine di riferimento  $Im_0$  all' immagine corrispondente ad una situazione deformata  $i$ -esima  $Im_i$ . Dal punto di vista matematico, l'errore da minimizzare in termini di operazioni sulle immagini può essere scritto:

$$E^2 = \sum [Im_i(x_i; y_i) - Im_0(x_0; y_0)]^2$$

dove  $(x_i; y_i)$  sono le coordinate di un generico pixel in un'immagine deformata e  $(x_0; y_0)$  sono le coordinate di un generico pixel nell' immagine di riferimento. L' operazione viene estesa a tutti i pixel e si procede con l'associare ad ogni elemento della griglia una sotto-immagine di forma quadrata e tramite delle funzioni si opera una trasformazione geometrica che consente di creare una corrispondenza tra un punto  $p(x,y)$  e quelle di un punto  $p'$  secondo la relazione:

$$\begin{cases} x' = \frac{a_0 + a_1x + a_2y}{c_0x + c_1y + c_2} \\ y' = \frac{b_0 + b_1x + b_2y}{c_0x + c_1y + c_2} \end{cases}$$

con coefficienti reali.

A questo punto l'espressione precedente che descrive l'errore di un'intera immagine si può semplificare al campo delle sotto-immagini:

$$E^2 = \sum \|s_i(X_i; Y_i) - s_0(X_0; Y_0)\|^2$$

La sommatoria è estesa ad un particolare elemento del reticolo a cui viene associata un'immagine  $s_i$ . Tutte le sotto-immagini sono funzione delle coordinate dei nodi  $(X_i; Y_i)$  e  $(X_0; Y_0)$ .

Una volta raggiunta la convergenza la soluzione è un vettore che definisce la nuova posizione dei nodi nella griglia e viene determinato per ogni elemento della griglia. In questo modo si calcolano in maniera continua gli spostamenti e quindi le deformazioni della regione d' interesse.

#### 4.5. Stereo visione e 3D DIC

I concetti alla base della tecnica D.I.C. tridimensionale non si discostano molto da quella bidimensionale. Infatti, viene sempre realizzato un pattern, la superficie di interesse viene ripresa durante situazioni differenti e le immagini vengono poi comparate utilizzando determinati criteri di correlazione. La sostanziale differenza risiede nel fatto che la tecnica DIC tridimensionale necessita di due fotocamere. La necessità della seconda fotocamera viene illustrata nella figura 24:

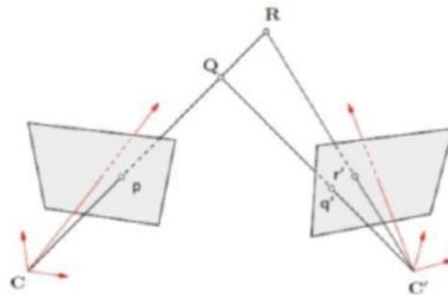
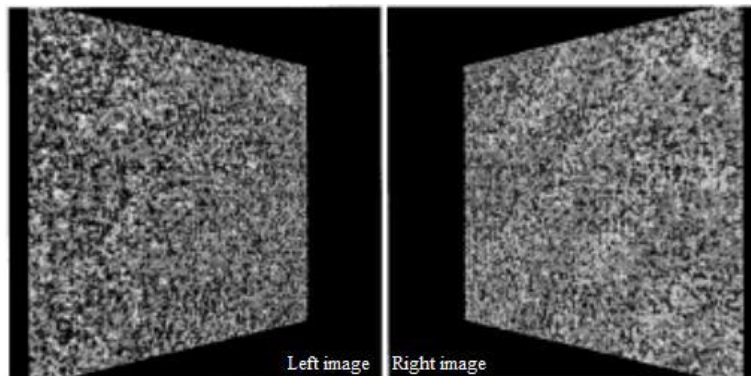


Figura 24: rilevazione delle fotocamere

Una singola fotocamera posizionata nel punto C della figura non sarebbe in grado di distinguere le differenze tra i punti R e Q o qualsiasi altro punto che giace nello stesso raggio di proiezione. Una seconda fotocamera posizionata in C' fornirebbe informazioni aggiuntive e consentirebbe univocamente la distinzione della posizione reale dei punti nello spazio.

Nella stereo visione la deformazione di un subset, ovvero quadrati della griglia costruita sulle immagini, da un'immagine di riferimento a un'immagine deformata deve essere

trovata da entrambe le telecamere e poi confrontata. La figura 25 per esempio evidenzia la differenza di prospettiva delle due fotocamere.



*Figura 25: esempio di prospettive viste da due diverse posizioni della telecamera*

La tecnica DIC tridimensionale risulta più complicata rispetto a quella 2D anche perché una volta che è stata individuata la posizione di un subset nell' immagine deformata di una telecamera, questa la si deve abbinare alla posizione corrispondente nell' immagine dell' altra telecamera per poter triangolare una posizione tridimensionale unica. Tuttavia, per poter ottenere una corrispondenza tra i due sensori è necessario conoscere le posizioni e i parametri di visualizzazione delle due telecamere e questo richiede una procedura di calibrazione.

La calibrazione è realizzata andando a catturare delle immagini di un bersaglio posizionato secondo diversi orientamenti. Solitamente il bersaglio presenta punti o linee ben distinti che vengono visualizzati da entrambe le fotocamere e utilizzati per determinare matematicamente i parametri di visualizzazione. L' accuratezza della calibrazione influisce sui risultati di misura e anche durante l'acquisizione delle immagini la posizione delle fotocamere non deve cambiare per non andare incontro a errori di misura.

## 5. Attività di laboratorio

In questo capitolo è riportata l'attività sperimentale svolta presso il Laboratorio di Meccanica Applicata e Costruzione di Macchine del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematica dell'Università Politecnica delle Marche e il Laboratorio di Materiali Pesanti del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU) con sede in Ancona.

### 5.1. Materiali utilizzati

I materiali usati per la realizzazione dei provini in UHPFRC sono:

- Cemento: CEM I 52,5 R della ditta COLACEM S.p.A., di seguito viene riportata la tabella dei vari componenti presenti nel cemento utilizzato.

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

Tabella 3: Tabella in cui sono riportati i componenti del cemento utilizzato.

- Aggregati: Sabbia silicea ESINCALCE s.r.l. di tipo medio con curva granulometrica che va da 0,1 a 1,1 mm. Essa è composta da SiO<sub>2</sub> al 75,62%.

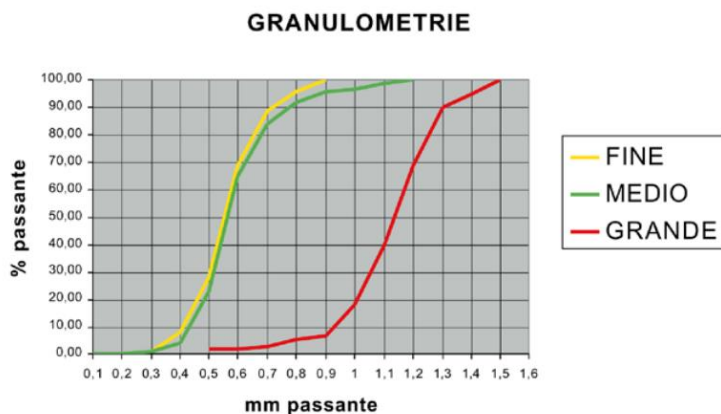


Figura 26: Curva granulometrica aggregati utilizzati.

- Additivi: Additivo superfluidificante Pentaflow PC 6 della ditta PENTACHEM s.r.l.. Il Pentaflow PC 6 è un superfluidificante policarbossilico in polvere, oltre a non presentare fenomeni di segregazione e di bleeding, consente di mantenere a lungo la lavorabilità iniziale senza compromettere lo sviluppo delle resistenze alle basse stagionature. La forte capacità di dispersione delle parti fini e dei leganti migliora la lavorabilità dell'impasto e la sua messa in opera rendendo le miscele più plastiche, più coesive e più pompabili. Di seguito viene riportata la scheda tecnica dell'additivo.

	<b>Dati</b>	<b>Metodo</b>
<b>Composizione chimica:</b>	Polimero policarbossilico	
<b>Stato:</b>	Polvere	Visivo
<b>Colore:</b>	Beige	IST. 10.07
<b>Densità:</b>	max. 0,400 Kg/dm <sup>3</sup>	IST. 10.06
<b>Granulometria:</b>	Min. 95 % < 0,300 mm	IST.10.09
<b>Contenuto in cloro:</b>	Max 0,05%	
<b>Umidità:</b>	max. 4 %	IST. 10.04
<b>Solubilità in acqua:</b>	Totale	IST. 10.21
<b>Temperatura d'impiego:</b>	> 0°C	IST. 10.08

Tabella 4: Scheda tecnica dell'additivo utilizzato.

Additivo Antifoam PS 5, della ditta PENTACHEM s.r.l., additivo antischiuma in polvere a base di oli siliconici e poliglicoli che elimina efficacemente e rapidamente le bolle d'aria in fase di miscela. Consente di ottenere superfici finali uniformi.

Additivo CA400, della ditta GOLA DELLA ROSSA MINERARIA S.p.A., il carbonato di calcio viene usato per compattare gli inerti rendendo il composto più compatto.

- Fumo di silice: Il fumo di silice è costituito principalmente da particelle molto fini di biossido di silicio amorfo, raccolte come sottoprodotto del processo di fusione per la produzione di silicio metallico e leghe di ferro-silicio. Il ruolo del fumo di silice è di andare a colmare i vuoti interstiziali andando ad addensare il composto, l'aggiunta di questo minerale richiede un maggior quantitativo di acqua nel composto.
- Fibre: Le fibre utilizzate sono della ditta LA MATASSINA s.r.l., fibre GOLD micro, lunghe 13 mm e con diametro di 0.20 mm. Il fattore di forma è pari 65.



*Figura 27: Fibre in acciaio GOLD micro.*

- Acqua.



## 5.2. Mix design

Il mix design è la formula per ottenere la miscela di UHPFRC, Il processo attraverso cui si proporzionano in maniera opportuna tutti i componenti del calcestruzzo, la composizione della miscela può essere definita in funzione dei singoli ingredienti, come nel nostro caso, mediante pesatura. Nel nostro caso sono stati realizzati 4 impasti che si diversificano tra di loro dalla quantità di fibre, i primi due impasti sono stati prodotti il 27 gennaio 2022, gli altri 2 impasti invece l'8 febbraio 2022 e il 17 febbraio 2022. Di seguito sono riportate le tabelle delle miscele con le dosi dei singoli componenti.

Miscele UHPFRC [Kg/m <sup>3</sup> ]						
Componenti		Getto1	Getto2	Getto3	Getto4	
Cemento 52,5 R		790	790	790	790	
Sabbia Essiccata (Esincalce)		600	600	600	600	
Pentaflow PC6 (superfluidificante)		10	10	10	10	
Antifoam PS5 (antibolle)		3	3	3	3	
CA 400		500	500	500	500	
Fumo di silice		160	160	160	160	
Acqua		201	201	201	201	
<b>Fibre</b>		<b>50</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>200</b>	

Tabella 5: Tabella con la misura dei componenti utilizzati per le 4 miscele.

## 5.3. Fasi operative

Per la realizzazione dei provini in UHPFRC la procedura utilizzata è la seguente:

- Pesatura dei vari elementi come riportato nella tabella 5;
- Miscelazione dei materiali fino al raggiungimento di un composto omogeneo e privo di grumi, con l'accorgimento di aggiungere le fibre come ultimo componente e di verificare una distribuzione di quest'ultime omogenea nella miscela;
- Getto all'interno dei casseri di dimensioni 60x30x400mm, le cui superfici a contatto con la miscela sono state precedentemente rivestite con disarmante per facilitare la successiva rimozione dalle forme;
- Rasatura dei provini e compattazione tramite tavola vibrante;

- Applicazione di uno stato impermeabile sulla superficie a contatto con l'aria per evitare la risalita di acqua che comporterebbe una riduzione di acqua nel composto;
- Disarmo dei provini dopo 24 ore dal getto;
- Maturazione in acqua dei provini dopo il disarmo ad un'umidità pari al 100%, i tempi di maturazione dei provini in acqua sono stati di 28 giorni per tutte le miscele;
- Incisione in mezzeria dei provini in modo da ottenere l'intaglio centrale;
- Verniciatura dei provini prima dei test con uno strato di vernice bianca seguito da uno strato di vernice nera applicata in modo irregolare, al fine di realizzare uno Speckle sull'altezza del provino;
- Posizionamento del faro, delle fotocamere e messa a fuoco dell'obiettivo. Per le prove eseguite abbiamo utilizzato 2 fotocamere, una davanti al provino focalizzata su tutta la sua superficie, che abbiamo chiamato "cam 1" e una nella parte posteriore incentrata nella mezzeria del provino cioè la presunta zona in cui si sarebbero dovute aprire le fessure principali, che abbiamo chiamato "cam 0".



Figura 28: Immagine dei provini prima della verniciatura.

## 5.4. Catalogazione dei provini

Per ognuna delle 4 miscele precedentemente descritte sono stati realizzati 6 provini, 3 con intaglio, che abbiamo denominati A, B, C, e 3 senza intaglio denominati D, E, F. Le dimensioni dei provini realizzati sono 60x30x400mm.

Di seguito è riportata la tabella con i dati geometrici dei provini realizzati.

PROVINI CON INTAGLIO				
	PROVINI A			
	UHPFRC_50	UHPFRC_100	UHPFRC_150	UHPFRC_200
Altezza resistente (mm)	21,60	21,90	23,60	22,15
Altezza totale (mm)	27,95	28,20	28,00	29,30
	PROVINI B			
	UHPFRC_50	UHPFRC_100	UHPFRC_150	UHPFRC_200
Altezza resistente (mm)	21,15	21,35	20,90	20,70
Altezza totale (mm)	29,40	27,40	28,60	27,80
	PROVINI C			
	UHPFRC_50	UHPFRC_100	UHPFRC_150	UHPFRC_200
Altezza resistente (mm)	21,40	21,70	21,70	21,90
Altezza totale (mm)	28,40	28,40	28,10	28,50
PROVINI NO INTAGLIO				
	PROVINI D			
	UHPFRC_50	UHPFRC_100	UHPFRC_150	UHPFRC_200
Altezza resistente (mm)	28,30	27,55	28,40	27,70
	PROVINI E			
	UHPFRC_50	UHPFRC_100	UHPFRC_150	UHPFRC_200
Altezza resistente (mm)	28,50	28,60	28,70	28,50
	PROVINI F			
	UHPFRC_50	UHPFRC_100	UHPFRC_150	UHPFRC_200
Altezza resistente (mm)	29,00	27,50	28,90	27,60

Tabella 9: Tabella in cui è riportata l'altezza resistente e l'altezza totale dei singoli provini. Lungo le righe troviamo i provini con dosaggio crescente da sinistra verso destra e nelle colonne troviamo i provini con dosaggio costante con intaglio (A,B,C) e senza intaglio (D,E,F).

## 5.5. Prove eseguite

Di seguito sono riportate le prove eseguite per la caratterizzazione meccanica dei provini UHPRFC.

### 5.5.1. Prova di spandimento

La prova di spandimento è una prova sul calcestruzzo fresco, la norma di riferimento è la (UNI EN 1015-3, 2007) in accordo alla quale il valore della lavorabilità viene misurato tramite il diametro di un campione di prova del composto fresco, posizionato su una tavola che viene successivamente fatta impattare più volte al suolo partendo da una determinata altezza. L'apparecchiatura necessaria alla prova è la seguente:

- Tavola a scosse composta da: supporto, piastra piatta rigida e disco, albero orizzontale e camma di sollevamento e asta mobile di sollevamento;
- Stampo troncoconico di altezza compresa tra 59.5 e 60.5 mm, diametro interno tra 99.5 e 100.5 mm alla base e tra 69.5 e 70.5 mm in altezza.
- Pestello, formato da una barra di sezione circolare di materiale non assorbente dal diametro di circa 40 mm e lunghezza di circa 200 mm. La faccia battente deve essere piatta e perpendicolare alla lunghezza del pestello.
- Calibri, per la misurazione del diametro;
- Cazzuola;
- Spatola piatta.

Prima della prova sono state strofinate con un panno umido le superfici interne, il disco e i bordi dello stampo. Dopo l'asciugatura delle parti inumidite è stato posizionato lo stampo al centro del disco della tavola a scosse ed è stato poi introdotto il composto in due strati, ciascuno dei quali è stato assestato, per garantire un riempimento uniforme dello stampo. Prima di far vibrare la tavola è stata eliminata l'acqua sul bordo inferiore

dello stampo per evitare compromissioni della prova ed infine è stato sollevato lo stampo e fatto vibrare la tavola a scosse per 15 volte con la frequenza di una volta al secondo.

Dopo la prova con il metro è stato misurato il diametro in due direzioni ortogonali tra loro ed è stato appuntato il risultato in millimetri delle 4.

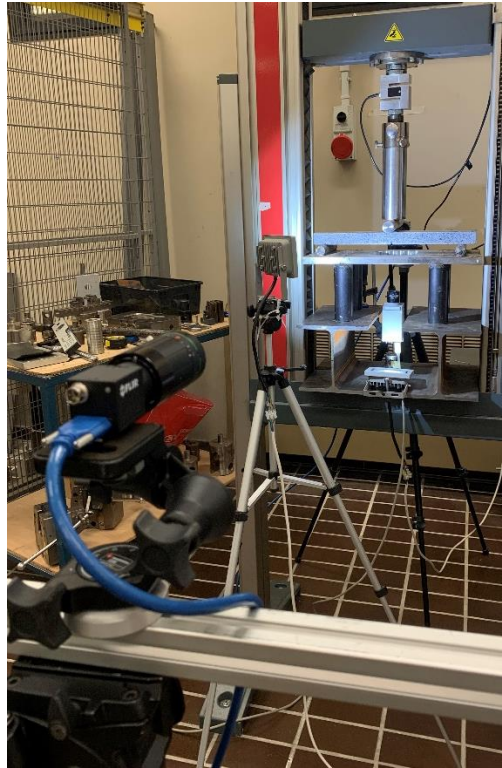
### **5.5.2. Prova di flessione**

Le prove di flessione si sono svolte presso il Laboratorio di Meccanica Applicata e Costruzione di Macchine del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematica.

La macchina utilizzata è la Zwick/Roell Z050. La prova di flessione prevede che il provino venga posto su due rulli laterali di appoggio, facendo attenzione al corretto centramento del provino. Successivamente il provino viene caricato dalla macchina tramite un rullo che applica il carico in mezzzeria, la prova è conclusa quando la forza decresce considerevolmente dopo il picco massimo. Il Set up di prova come riportano in figura 29 è composta da:

- macchinario Zwick/Roell Z050;
- 3 Fotocamere in bianco e nero Pixelink;
- Base con piastra in acciaio sulla quale sono saldati i due cilindri che saranno usati come appoggi;
- Faro per l'illuminazione del provino.

Per le prove eseguite abbiamo utilizzato la tecnica DIC 2D, con la quale si individuano dunque le deformazioni nel piano. Abbiamo utilizzato 3 fotocamere, una davanti il provino focalizzata su tutta la sua superficie compresi gli appoggi, che abbiamo chiamato "cam 1", una nella parte posteriore incentrata in mezzzeria del provino cioè la presunta zona in cui si sarebbero dovute aprire le fessure principali, che abbiamo chiamato "cam 0" e infine una fotocamera sotto il provino tra i due profilati in acciaio, per analizzare l'apertura della cricca ma l'analisi dei risultati di quest'ultima fotocamera non sono riportati in questa tesi.



*Figura 29: Vista frontale del set-up in cui è possibile osservare fotocamera anteriore denominata “cam 1”, faretto per l’illuminazione, la macchina Zwick Roell e il provino in posizione per la prova.*



*Figura 30: Immagine della fotocamera posteriore che abbiamo denominato “cam 0”.*

## 6. Risultati sperimentali e commento

In questo capitolo vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove in Laboratorio.

### 6.1. Risultati e commento della prova di spandimento

I risultati della prova di spandimento su tavola a scosse sono riportati nella tabella 10. Nella tabella troviamo i 4 impasti diversificati tra loro dal contenuto di fibre che è riportato a sinistra e misurato in  $\text{Kg/m}^3$ , con  $D_1$  e  $D_2$  ci riferiamo ai diametri tra loro ortogonali che sono stati misurati e riportati in cm e con  $D_{\text{medio}}$  consideriamo la media aritmetica dei diametri  $D_1$  e  $D_2$  dello stesso impasto sempre in cm.

	LAVORABILITA' ( PROVA DI SPANDIMENTO)			
FIBRE	N° GETTO	$D_1$ (cm)	$D_2$ (cm)	$D_{\text{medio}}$ (cm)
50	GETTO 1	19	16	17,5
100	GETTO 2	16	17,5	16,75
150	GETTO 3	16,2	16,3	16,25
200	GETTO 4	15	14,5	14,75

Tabella 10: Risultati della prova di spandimento con tavola a scosse.

La lavorabilità è funzione del diametro del composto ottenuto dopo la prova, osservando il diametro medio, il massimo diametro ottenuto è relativo alla miscela con minor quantità di fibre ed è pari a 17,5 cm mentre il minimo è relativo alla miscela con il maggior dosaggio ed è pari a 14,75 cm. Possiamo notare come all'aumentare della quantità di fibre diminuisce il diametro del composto ed è quindi intuibile che l'aumento di fibre nel

composto lo addensa e lo rende meno lavorabile rispetto alle miscele con un quantitativo di fibre inferiore.

## 6.2. Risultati e commento della prova di flessione

I risultati sotto riportati sono stati ricavati dalla prova di flessione su tre punti, effettuata sui provini di dimensioni 60x30x400 mm come riportato nello schema in figura 31.

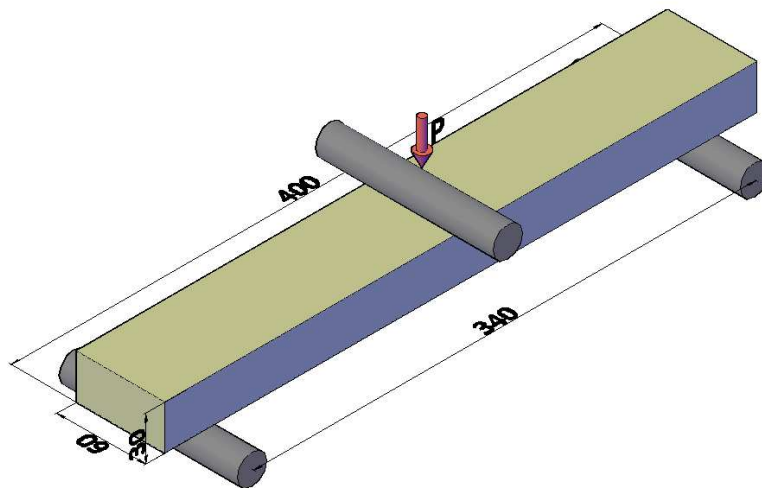


Figura 31: Schema della prova su provino senza intaglio.

La formula utilizzata per il calcolo della resistenza a flessione è la seguente:

$$f = \frac{3}{2} \frac{F l}{d_1 d_2^2} \quad (\text{MPa})$$

Dove:



$F$  = Carico massimo a rottura, (N);

$l$  = Distanza tra gli appoggi, (mm);

$d_1, d_2$  = Dimensioni laterali del provino, (mm).

Sono riportati di seguito il grafico forza  $F$  - spostamento  $s$  ed il grafico resistenza  $\sigma$  - spostamento  $s$  dei provini con ugual dosaggio di fibre, il grafico usato per la rappresentazione è cartesiano, lungo l'asse delle  $x$  troviamo lo spostamento in mm e nell'asse delle  $y$  troviamo la forza in kN per quanto riguarda il diagramma  $F$ - $s$ . Nel diagramma  $\sigma$ - $s$  invece la differenza rispetto il caso precedente riguarda l'asse delle  $y$  in cui abbiamo la resistenza in MPa. Insieme ai grafici è inoltre riportata una tabella con il carico massimo a rottura in kN, il carico di prima fessurazione in kN, la resistenza di prima fessurazione in MPa, lo spostamento al carico massimo in mm e la resistenza a flessione dei provini testati in MPa.

Provini con dosaggio di 50 kg/m <sup>3</sup> , con intaglio.					
Provino	Carico massimo a rottura $F_{max}$ (kN)	Carico di prima fessurazione (kN)	Resistenza di prima fessurazione (MPa)	Spostamento al carico massimo $s$ (mm)	Resistenza max a flessione $f_{max}$ (MPa)
UHPFRC_50_INT_A	0,71	0,6	10,93	2,80	12,98
UHPFRC_50_INT_B	0,59	0,57	10,83	2,90	11,15
UHPFRC_50_INT_C	0,57	0,53	9,84	2,39	10,55
Media	0,62	0,57	10,53	2,70	11,56
Deviazione standard	0,08	0,04	0,60	0,27	1,27
Coef. di variazione (%)	12,15	6,20	5,72	10,02	10,95

Tabella 11: Tabella dei risultati della prova di flessione per i provini UHPFRC\_50\_INT\_A, B, C.

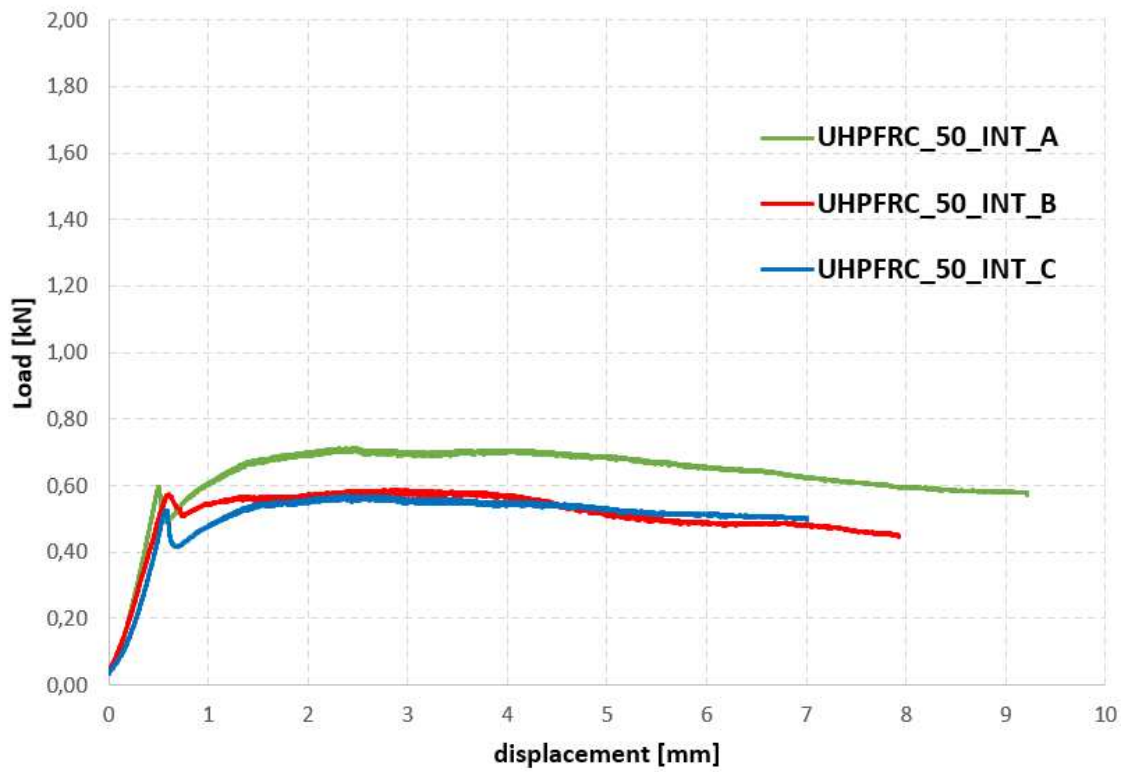


Figura 32: Grafico carico-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_50\_INT\_A, B, C.

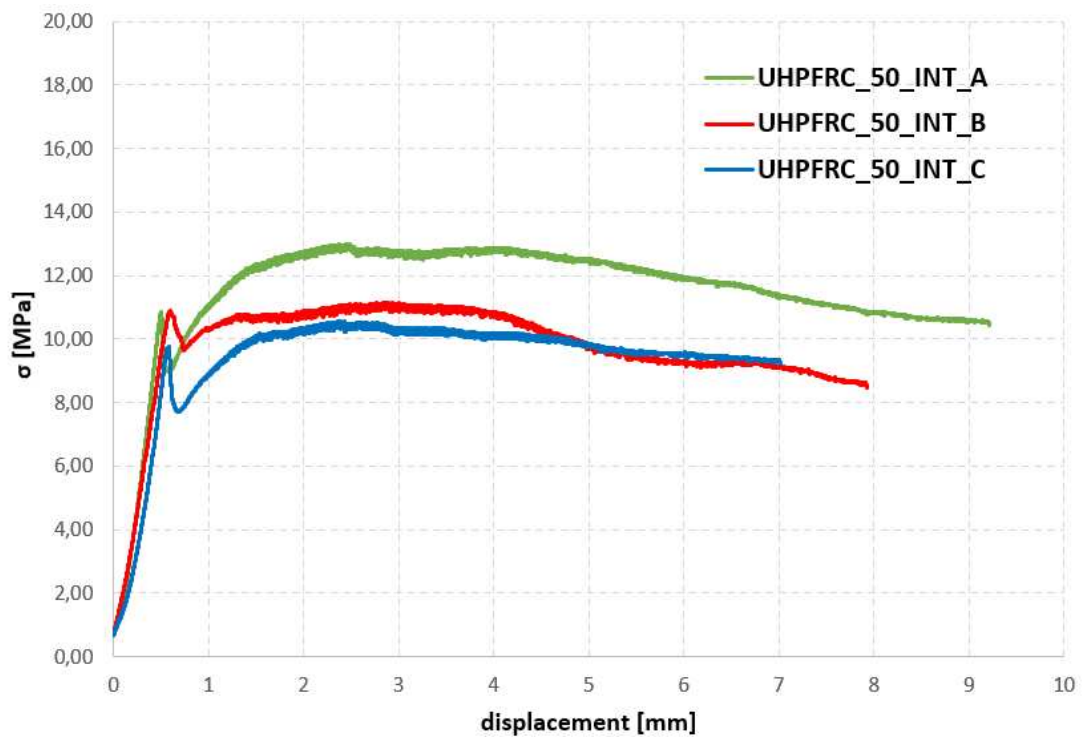


Figura 33: Grafico resistenza-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_50\_INT\_A, B, C.

La resistenza massima a flessione dei provini intagliati con dosaggio 50 kg/m<sup>3</sup> varia tra 12,98 e 10,55 con una media di 11,56 MPa. Il carico di prima fessurazione è circa pari al 87% del carico massimo e la media dello spostamento al carico massimo è uguale a 2,70 mm.



Figura 34: Partendo da sinistra troviamo le immagini della fessura principale nei provini UHPFRC\_50\_INT\_A, B, C.

Provini con dosaggio di 100 kg/m <sup>3</sup> , con intaglio.					
Provino	Carico massimo a rottura $F_{max}$ (kN)	Carico di prima fessurazione (kN)	Resistenza di prima fessurazione (MPa)	Spostamento al carico massimo $s$ (mm)	Resistenza max a flessione $f_{max}$ (MPa)
UHPFRC_100_INT_A	1,11	/	/	3,82	19,70
UHPFRC_100_INT_B	1,15	0,82	15,29	4,54	21,40
UHPFRC_100_INT_C	0,96	0,78	14,08	2,95	17,30
Media	1,07	0,80	14,69	3,77	19,47
Deviazione standard	0,10	0,03	0,86	0,80	2,06
Coef. di variazione (%)	9,33	3,54	5,83	21,12	10,58

Tabella 12: Tabella dei risultati della prova di flessione per i provini UHPFRC\_100\_INT\_A, B, C.

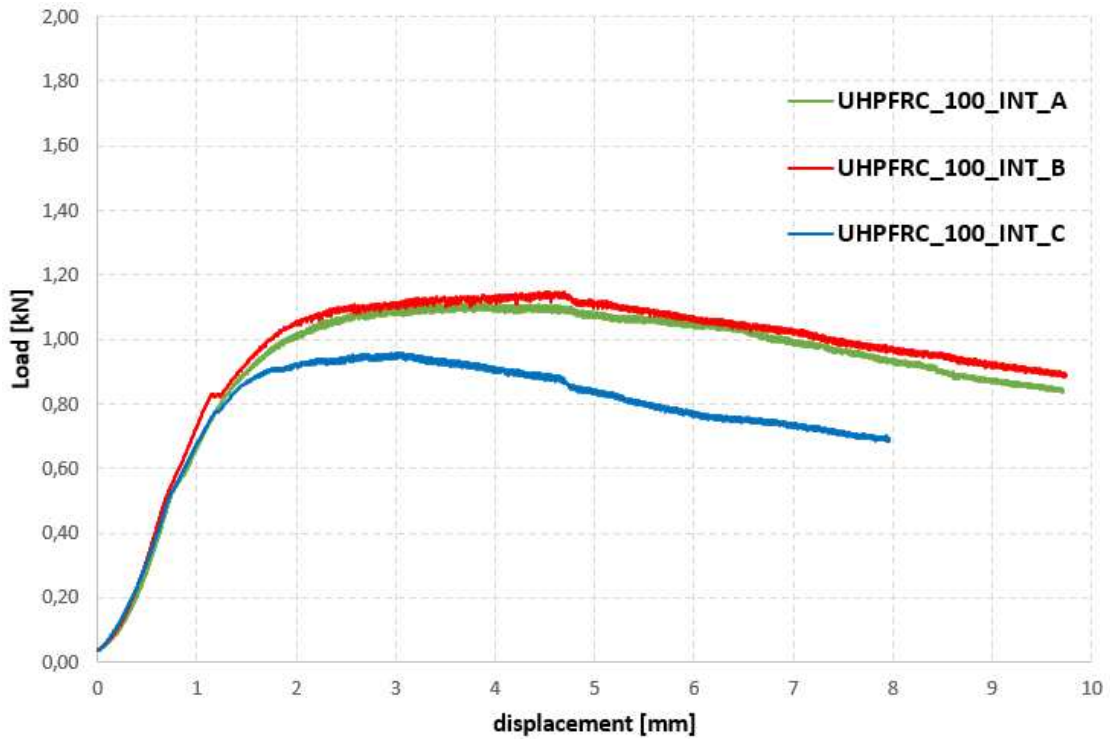


Figura 35: Grafico carico-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_100\_INT\_A, B, C.

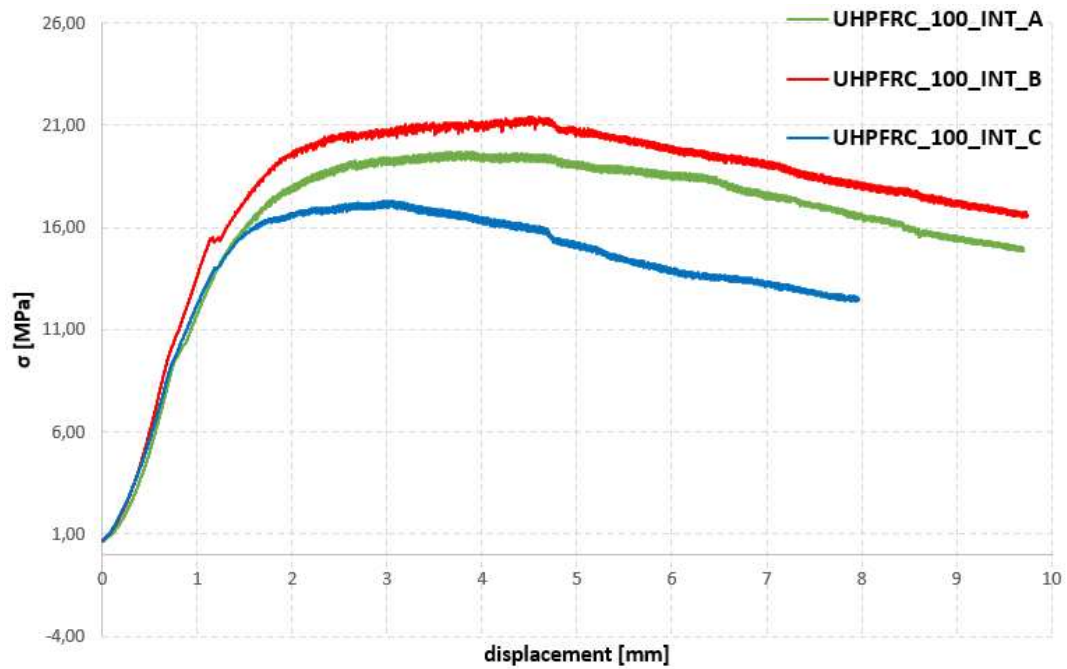


Figura 36: Grafico resistenza-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_100\_INT\_A, B, C.

La resistenza massima a flessione dei provini intagliati con dosaggio  $100 \text{ kg/m}^3$  varia da 17,30 a 21,40 MPa, la media della resistenza per i tre provini è di 19,47 MPa con una deviazione standard di 2,06, più alta dei provini con dosaggio  $50 \text{ kg/m}^3$  ma comunque la media fornisce un valore accettabile. La resistenza a flessione è aumentata considerevolmente raddoppiando il quantitativo di fibre nel composto e rispetto al caso con dosaggio inferiore in un provino non è stato possibile individuare un carico e una resistenza di prima fessurazione.



Figura 37: Partendo da sinistra troviamo le immagini della fessura principale nei provini UHPFRC\_100\_INT\_A, B, C.

Provini con dosaggio di $150 \text{ kg/m}^3$ , con intaglio.					
Provino	Carico massimo a rottura $F_{\max}$ (kN)	Carico di prima fessurazione (kN)	Resistenza di prima fessurazione (MPa)	Spostamento al carico massimo $s$ (mm)	Resistenza max a flessione $f_{\max}$ (MPa)
UHPFRC_150_INT_A	1,21	/	/	3,03	18,52
UHPFRC_150_INT_B	0,76	/	/	3,42	14,87
UHPFRC_150_INT_C	1,06	0,93	14,08	2,55	19,11
Media	1,01	0,93	14,08	3,00	17,50
Deviazione standard	0,23	/	/	0,44	2,30
Coef. di variazione (%)	22,69	/	/	14,53	13,12

Tabella 13: Tabella dei risultati della prova di flessione per i provini UHPFRC\_150\_INT\_A, B, C.

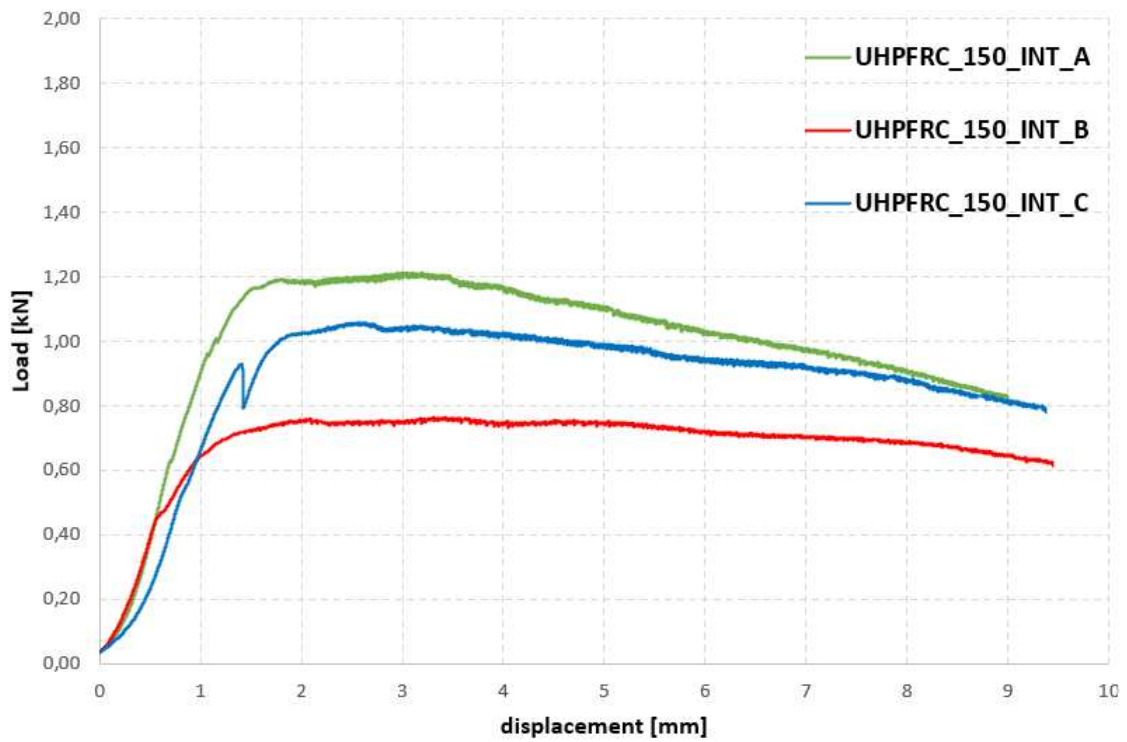


Figura 38: Grafico carico-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_150\_INT\_A, B, C.

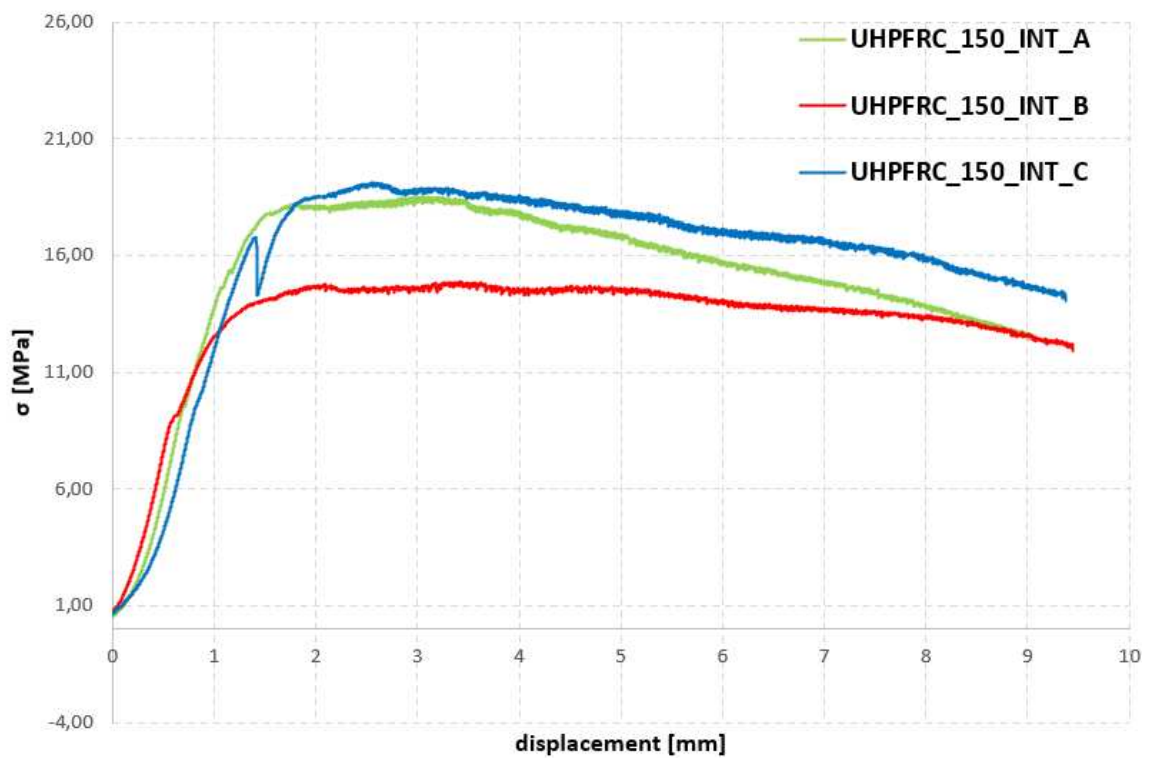


Figura 39: Grafico resistenza-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_150\_INT\_A, B, C.

La resistenza massima a flessione dei provini intagliati con dosaggio  $150 \text{ kg/m}^3$  varia da 14,87 a 19,11 MPa, con una media di 17,50. La deviazione standard è 2,30 un valore più alto dei due casi analizzati precedentemente che sta ad indicare una maggior variazione dei valori rispetto alla media. In due casi non è stato possibile individuare una resistenza e un carico di prima fessurazione e nel complesso valutando la massima resistenza a flessione media sono stati riscontrati valori inferiori al caso precedente con dosaggio inferiore di fibre pari a  $100 \text{ kg/m}^3$ .



Figura 40: Partendo da sinistra troviamo le immagini della fessura principale nei provini UHPFRC\_150\_INT\_A, B, C.

Provini con dosaggio di $200 \text{ kg/m}^3$ , con intaglio.					
Provino	Carico massimo a rottura $F_{\max}$ (kN)	Carico di prima fessurazione (kN)	Resistenza di prima fessurazione (MPa)	Spostamento al carico massimo $s$ (mm)	Resistenza max a flessione $f_{\max}$ (MPa)
UHPFRC_200_INT_A	1,89	1,72	29,8	2,51	32,70
UHPFRC_200_INT_B	1,06	0,74	14,68	1,96	21,01
UHPFRC_200_INT_C	1,71	1,68	29,77	2,24	30,31
Media	1,55	1,38	24,75	2,24	28,01
Deviazione standard	0,44	0,55	8,72	0,28	6,18
Coef. di variazione (%)	28,11	40,19	35,24	12,30	22,05

Tabella 14: Tabella dei risultati della prova di flessione per i provini UHPFRC\_200\_INT\_A, B, C.

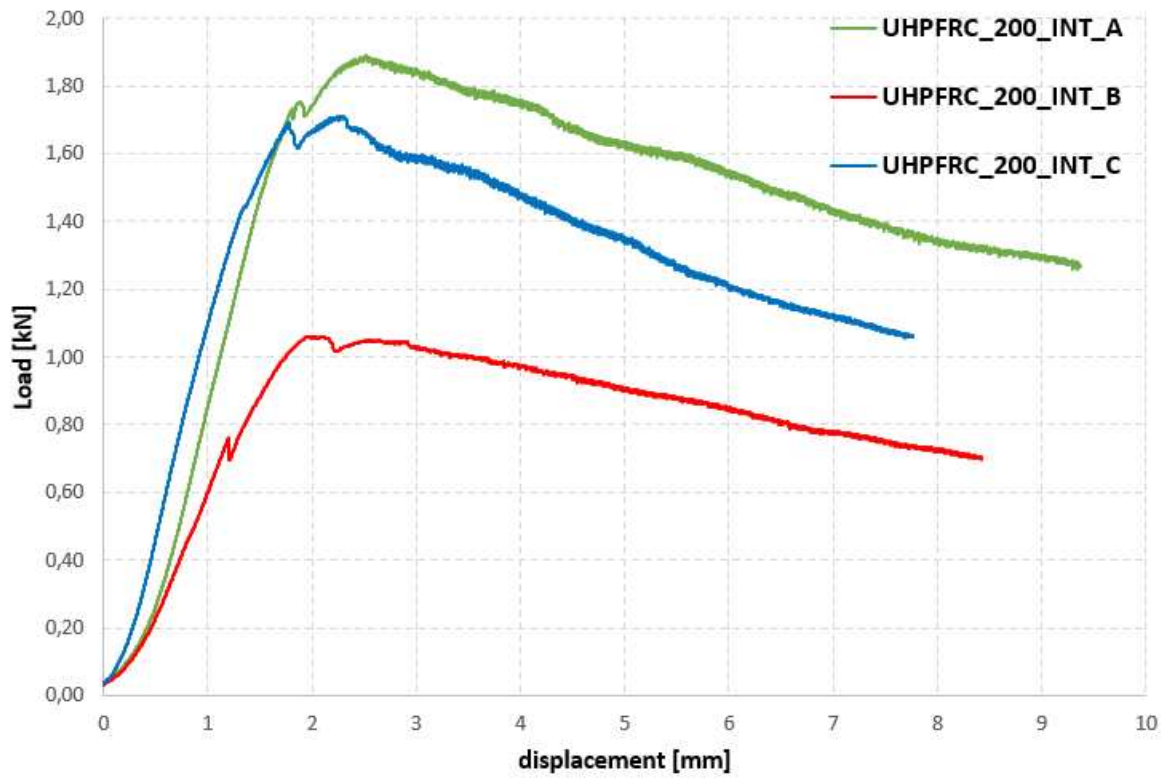


Figura 41: Grafico carico-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_200\_INT\_A, B, C.

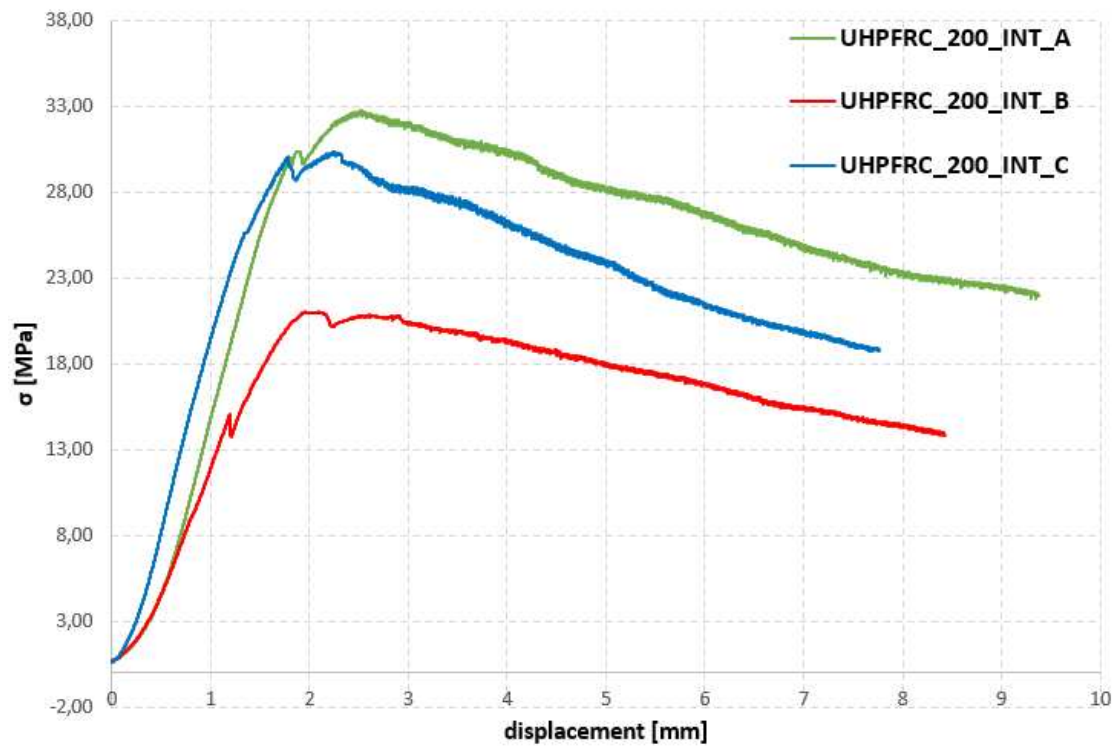


Figura 42: Grafico resistenza-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_200\_INT\_A, B, C.



La resistenza massima a flessione dei provini intagliati con dosaggio  $200 \text{ kg/m}^3$  varia da 21,01 a 32,70 MPa, con una media di 28,01 MPa. La deviazione standard è 6,18, un valore che indica uno scostamento considerevole rispetto al valore medio. In tutti i casi è stato registrato il carico e la resistenza di prima fessurazione. Analizzando la resistenza massima a flessione media riscontriamo un aumento rispetto ai casi con dosaggi inferiori precedentemente analizzati ma se osserviamo i singoli valori delle prove è possibile notare che nel caso del provino UHPFRC\_200\_INT\_B la resistenza massima registrata è pari a 21,01 MPa, molto inferiore rispetto ai provini UHPFRC\_200\_INT\_A e UHPFRC\_200\_INT\_C con valori di resistenza rispettivamente di 32,70 e 30,31 MPa. Questo potrebbe star ad indicare una distribuzione delle fibre non omogenea all'interno del provino.

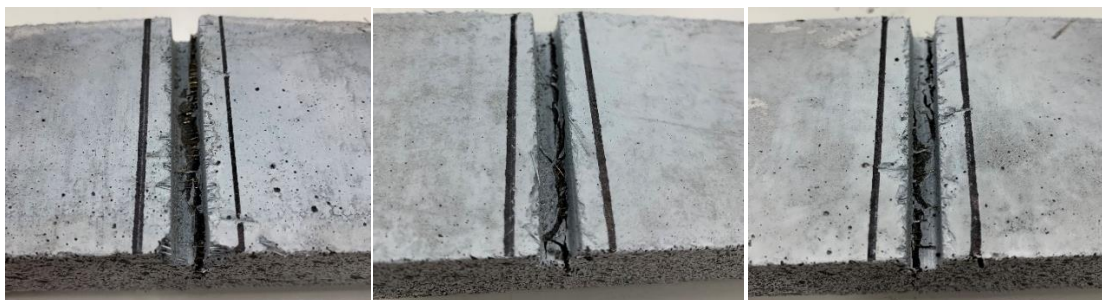


Figura 43: Partendo da sinistra troviamo le immagini della fessura principale nei provini UHPFRC\_200\_INT\_A, B, C.

Provini con dosaggio di $50 \text{ kg/m}^3$ .					
Provino	Carico massimo a rottura $F_{\max}$ (kN)	Carico di prima fessurazione (kN)	Resistenza di prima fessurazione (MPa)	Spostamento al carico massimo $s$ (mm)	Resistenza max a flessione $f_{\max}$ (MPa)
UHPFRC_50_D	1,30	1,30	13,80	3,20	13,84
UHPFRC_50_E	1,26	1,26	13,19	1,41	13,22
UHPFRC_50_F	1,46	1,46	14,76	0,92	14,77
Media	1,34	1,34	13,92	1,84	13,94
Deviazione standard	0,11	0,11	0,79	1,20	0,78
Coef. di variazione (%)	7,90	7,90	5,69	65,11	5,60

Tabella 14: Tabella dei risultati della prova di flessione per i provini UHPFRC\_50\_D, E, F

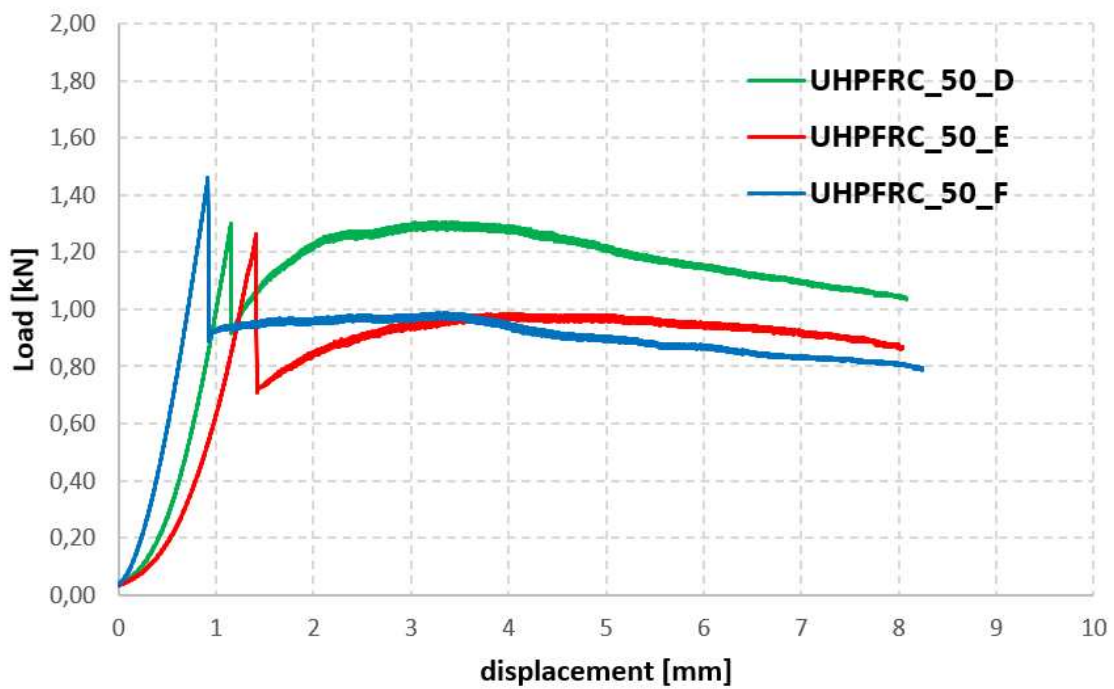


Figura 44: Grafico carico-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_50\_D, E, F

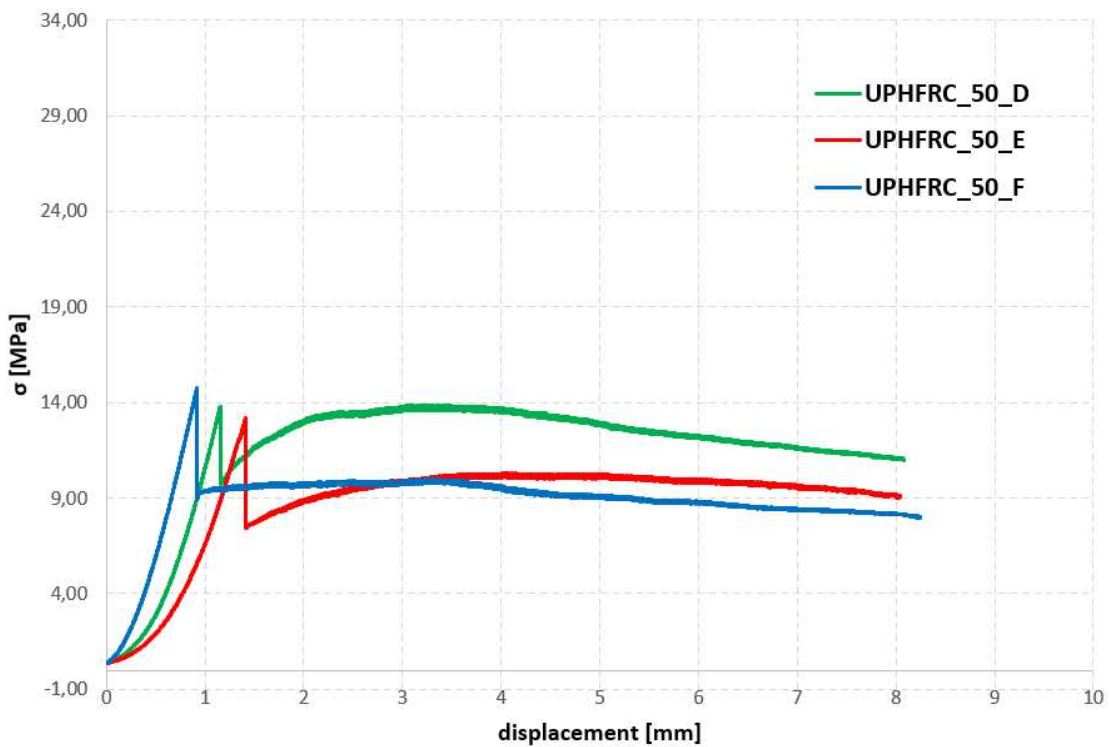


Figura 45: Grafico resistenza-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_50\_D, E, F.

La resistenza massima a flessione dei provini con dosaggio  $50 \text{ kg/m}^3$  senza intaglio varia da 13,22 a 14,77 MPa, con una media di 13,94 MPa. La deviazione standard è pari a 0,78, abbiamo quindi uno scostamento contenuto dei valori dalla media. Per tutte e tre le prove è stato registrato carico e resistenza di prima fessurazione, le quali circa coincidono rispettivamente al massimo carico ed alla massima resistenza dei campioni testati. Rispetto ai provini con intaglio e stesso dosaggio di fibre precedentemente analizzati la resistenza dei provini UHPFRC\_50\_D, E, F, senza intaglio è maggiore in media di circa 2,5 MPa.



Figura 46: Partendo da sinistra troviamo le immagini della fessura principale nei provini UHPFRC\_50\_D, E, F

Provini con dosaggio di $100 \text{ kg/m}^3$ .					
Provino	Carico massimo a rottura $F_{\max}$ (kN)	Carico di prima fessurazione (kN)	Resistenza di prima fessurazione (MPa)	Spostamento al carico massimo $s$ (mm)	Resistenza max a flessione $f_{\max}$ (MPa)
UHPFRC_100_D	1,56	1,21	13,55	4,65	17,51
UHPFRC_100_E	1,48	1,47	15,28	1,89	15,41
UHPFRC_100_F	1,28	1,17	13,15	3,79	14,38
Media	1,44	1,28	13,99	3,44	15,77
Deviazione standard	0,14	0,16	1,13	1,41	1,60
Coef. di variazione (%)	10,02	12,69	8,09	41,01	10,12

Tabella 15: Tabella dei risultati della prova di flessione per i provini UHPFRC\_100\_D, E, F

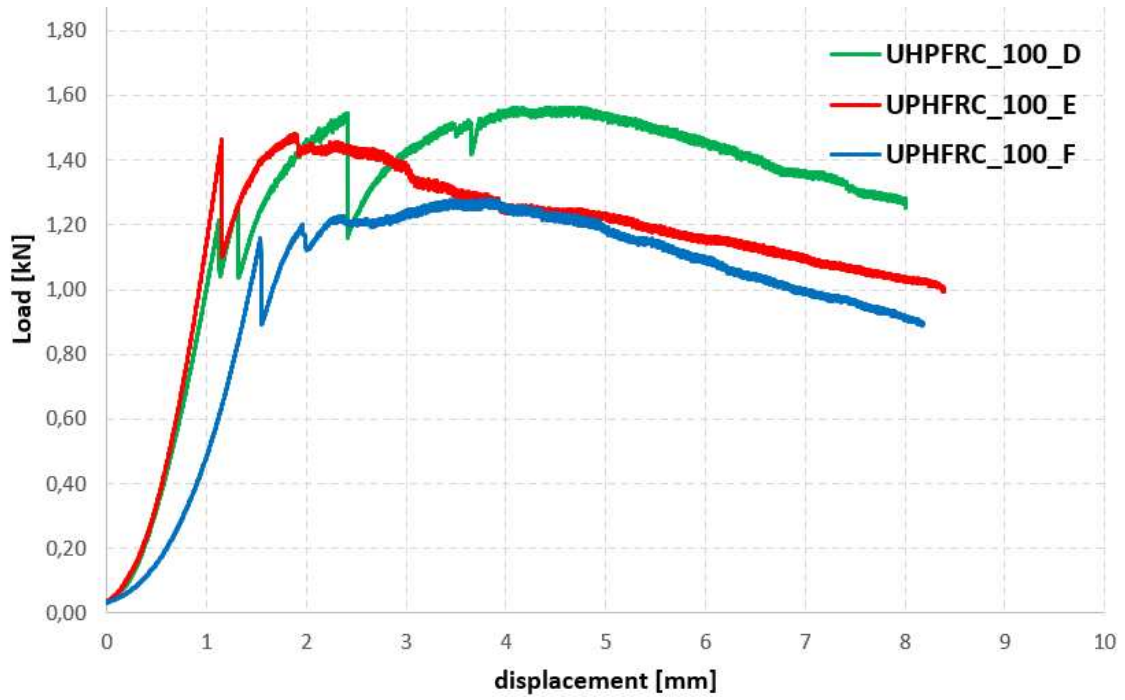


Figura 47: Grafico carico-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_100\_D, E, F

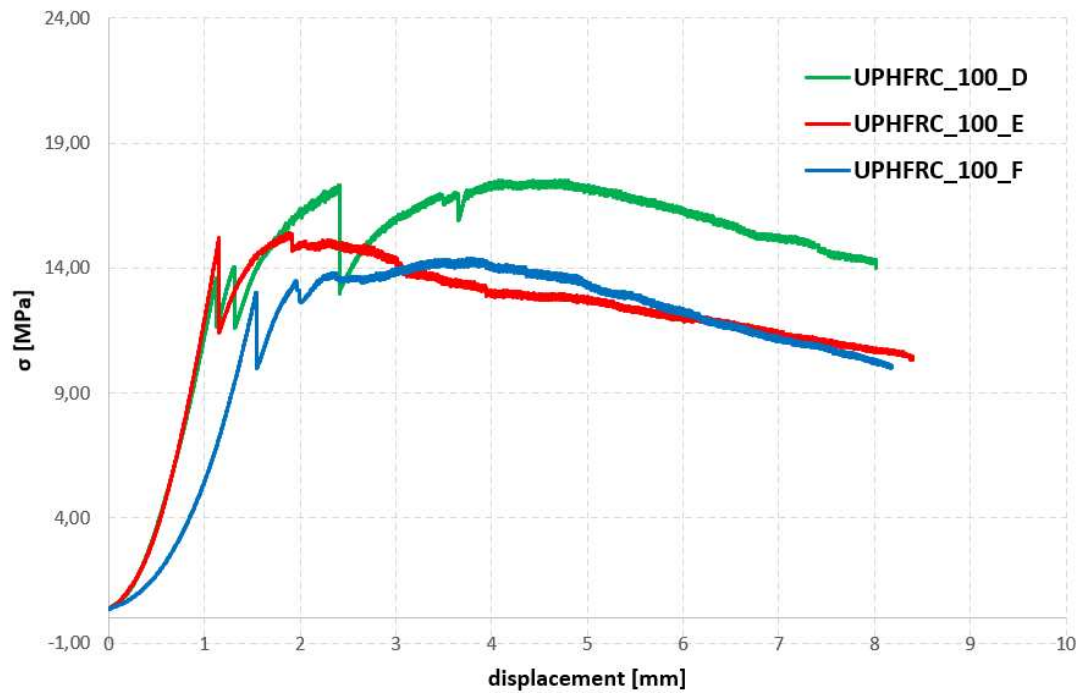


Figura 48: Grafico resistenza-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_100\_D, E, F

La resistenza massima a flessione dei provini con dosaggio  $100 \text{ kg/m}^3$  senza intaglio varia da 14,38 a 17,51 MPa, con una media di 15,77 MPa. La deviazione standard è pari a 1,60, non abbiamo quindi considerevoli scostamenti dei valori di resistenza massima a flessione dalla media. In tutti i casi è stato registrato il carico e la resistenza di prima fessurazione con valori vicini rispettivamente al carico massimo e alla resistenza massima. Rispetto ai provini con intaglio con lo stesso dosaggio di fibre la media della massima resistenza a flessione è minore per i provini UHPFRC\_100\_D, E, F, di circa 3,7 MPa.



Figura 49: Partendo da sinistra troviamo le immagini della fessura principale nei provini UHPFRC\_100\_D, E, F.

Provini con dosaggio di $150 \text{ kg/m}^3$ .					
Provino	Carico massimo a rottura $F_{\max}$ (kN)	Carico di prima fessurazione (kN)	Resistenza di prima fessurazione (MPa)	Spostamento al carico massimo $s$ (mm)	Resistenza max a flessione $f_{\max}$ (MPa)
UHPFRC_150_D	1,67	1,04	10,96	2,35	17,63
UHPFRC_150_E	1,59	1,23	12,69	2,98	16,38
UHPFRC_150_F	1,4	1,04	10,58	3,07	14,23
Media	1,55	1,10	11,41	2,80	16,08
Deviazione standard	0,14	0,11	1,12	0,39	1,72
Coef. di variazione (%)	8,93	9,94	9,86	14,01	10,69

Tabella 16: Tabella dei risultati della prova di flessione per i provini UHPFRC\_150\_D, E, F

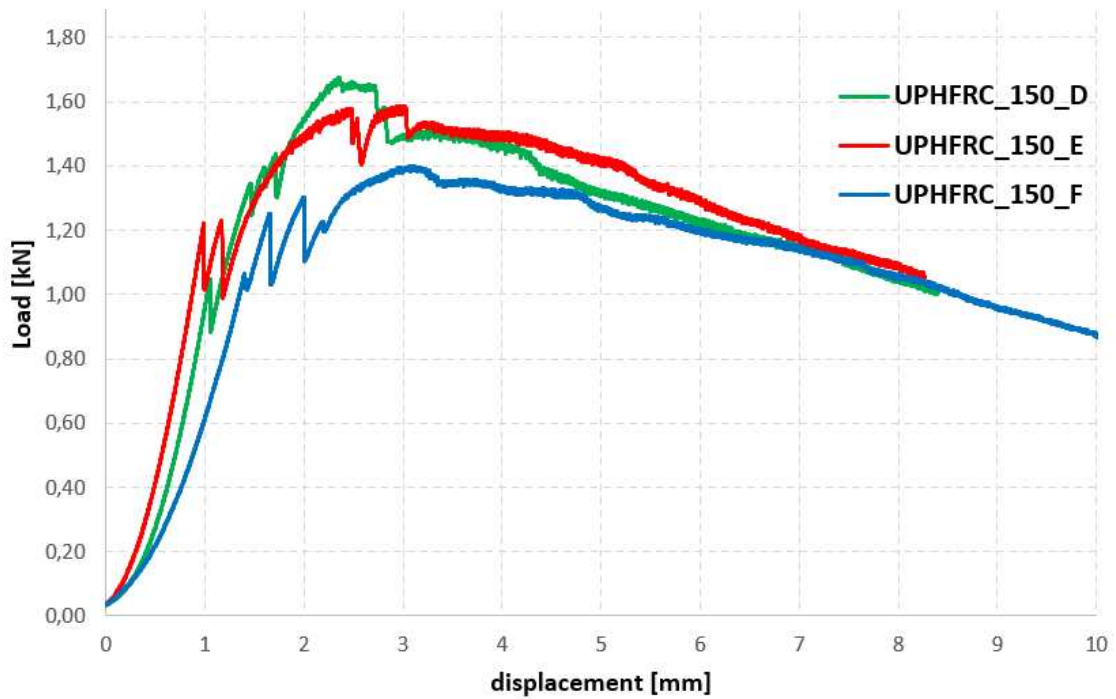


Figura 50: Grafico resistenza-spostamento della prova di flessione per i provini UPHFRC\_150\_D, E, F

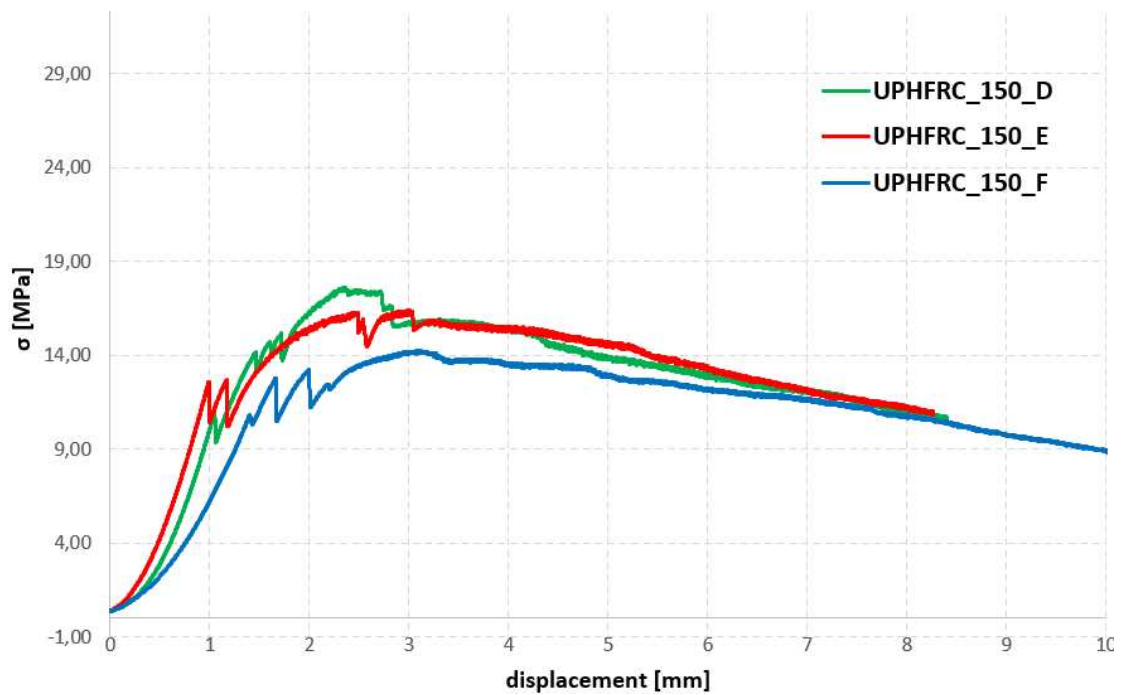


Figura 51: Grafico resistenza-spostamento della prova di flessione per i provini UPHFRC\_150\_D, E, F.

La resistenza massima a flessione dei provini con dosaggio  $150 \text{ kg/m}^3$  senza intaglio varia da 14,23 A 17,63 MPa, con una media di 16,08 MPa. La deviazione standard è pari a 1,72 abbiamo cioè un valore della media accettabile per la non rilevante differenza tra i valori presi singolarmente e la loro media. Per tutti i casi è stato registrato un carico e una resistenza di prima fessurazione in media pari a circa il 70% rispettivamente del carico massimo e della resistenza massima a flessione dei provini. Rispetto ai provini con intaglio con lo stesso quantitativo di fibre in acciaio per i provini UHPFRC\_150\_D, E, F, sono state registrate delle resistenze massime a flessione in media inferiori di circa 1,4 MPa.



*Figura 52: Partendo da sinistra troviamo le immagini della fessura principale nei provini UHPFRC\_150\_D, E, F*

Provini con dosaggio di 200 kg/m <sup>3</sup> .					
Provino	Carico massimo a rottura $F_{max}$ (kN)	Carico di prima fessurazione (kN)	Resistenza di prima fessurazione (MPa)	Spostamento al carico massimo $s$ (mm)	Resistenza max a flessione $f_{max}$ (MPa)
UHPFRC_200_D	1,54	1,00	11,08	2,08	17,03
UHPFRC_200_E	2,62	2,38	24,91	2,97	27,38
UHPFRC_200_F	1,49	1,08	12,05	2,90	16,65
Media	1,88	1,49	16,01	2,65	20,35
Deviazione standard	0,64	0,77	7,72	0,49	6,09
Coef. di variazione (%)	33,90	52,11	48,21	18,67	29,91

Tabella 17: Tabella dei risultati della prova di flessione per i provini UHPFRC\_200\_D, E, F

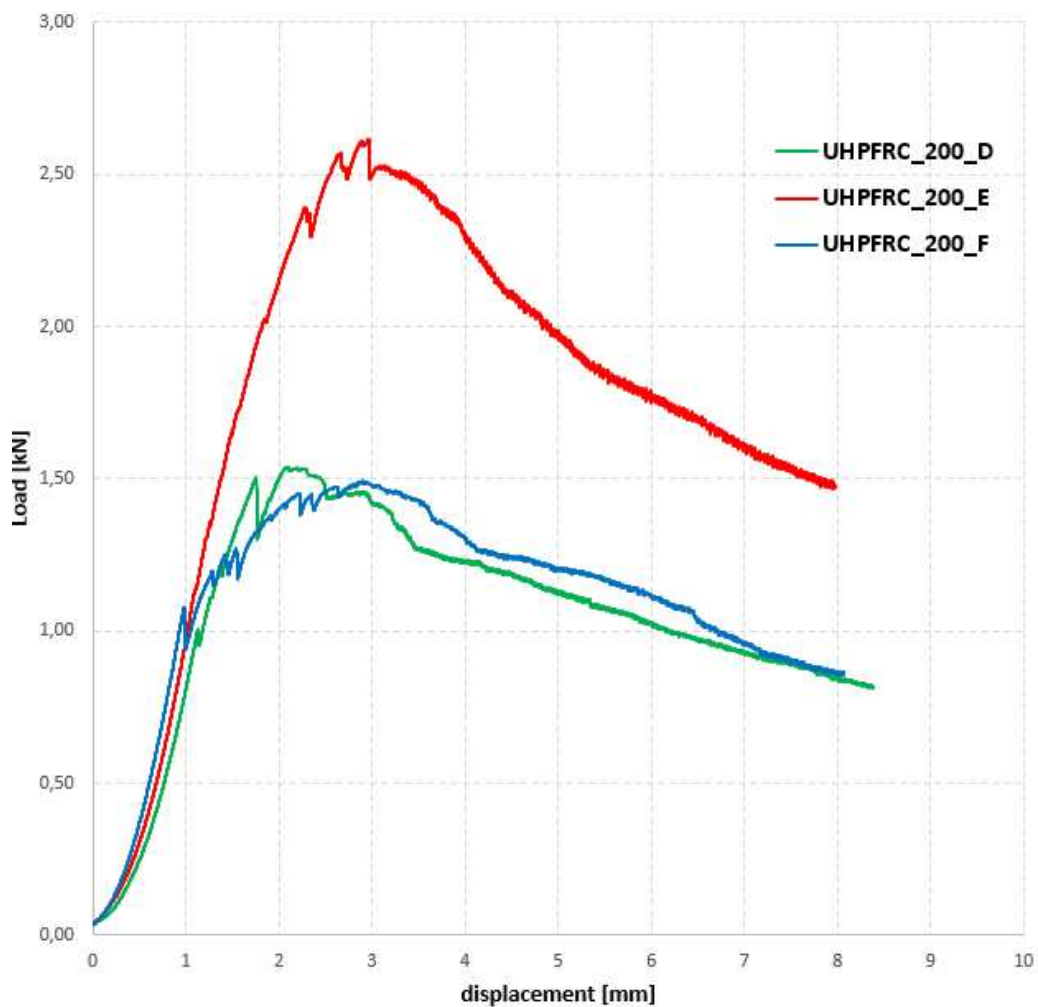


Figura 53: Grafico resistenza-spostamento della prova di flessione per i provini UHPFRC\_200\_D, E, F.



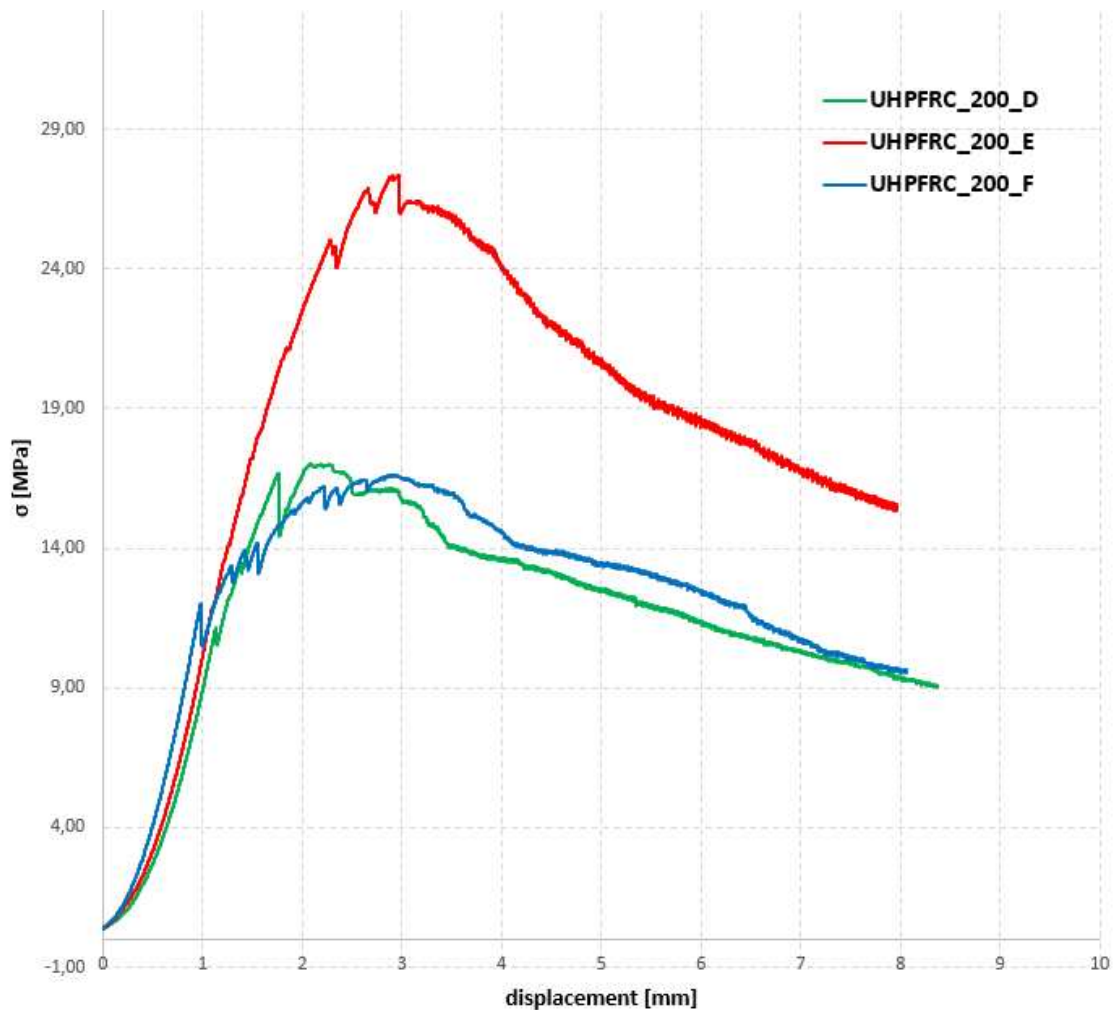


Figura 54: Grafico resistenza-spostamento della prova di flessione per i provini 200 D, E, F.

La resistenza massima a flessione dei provini con dosaggio  $200 \text{ kg/m}^3$  senza intaglio varia da 16,65 a 27,38 MPa, con una media di 20,35 MPa. La deviazione standard è pari a 6,09, un valore alto dovuto all'elevata differenza dei risultati ottenuti dalla prova rispetto alla media. Solo in un caso si è registrato un valore elevato di resistenza rispetto ai casi precedenti con dosaggi di fibre inferiori cioè per il UHPFRC\_200\_E, per la quale è stata registrato un valore di resistenza pari a 27,38 MPa. In tutti i casi è stato registrato il carico e la resistenza di prima fessurazione pari in media al 76% circa del carico e della resistenza massima registrata. Rispetto i provini con intaglio e con la stessa quantità di fibre, per i provini UHPFRC\_200\_D, E, F, sono stati registrati in media dei valori di resistenza massima a flessione inferiori di circa 7,6 MPa.



Figura 55: Partendo da sinistra troviamo le immagini della fessura principale nei provini UHPFRC\_200\_D, E, F.

### 6.2.1. Analisi valori medi dei risultati e commento

Viene riportata di seguito la tabella con i valori medi dei risultati sopra riportati per i provini, i provini sono divisi in gruppi 8 gruppi ciascuno dei quali è formato da 3 provini con lo stesso dosaggio di fibre e circa stessa altezza della sezione resistente.

Gruppo di provini	Resistenza massima a flessione media (MPa)	Resistenza di prima fessurazione media (MPa)	Carico massimo a rottura medio (kN)	Carico di prima fessurazione medio (kN)	Spostamento al carico massimo medio (mm)
UHPFRC_50_INT_A, B, C.	11,56	10,53	0,62	0,57	2,70
UHPFRC_100_INT_A, B, C.	19,47	14,69	1,07	0,80	3,77
UHPFRC_150_INT_A, B, C.	17,5	14,08	1,01	0,93	3,00
UHPFRC_200_INT_A, B, C.	28,01	24,75	1,55	1,38	2,24
UHPFRC_50_D, E, F.	13,94	13,92	1,34	1,34	1,84
UHPFRC_100_D, E, F.	15,77	13,99	1,44	1,28	3,44
UHPFRC_150_D, E, F.	16,08	11,41	1,55	1,10	2,80
UHPFRC_200_D, E, F.	20,35	16,01	1,88	1,49	2,65

Tabella 18: Tabella con i valori medi dei risultati della prova di flessione.

Analizzando i risultati sopra riportati si può affermare che aumentando il dosaggio di fibre all'interno della miscela aumenta la resistenza a flessione dell'elemento, per effetto delle fibre in acciaio che migliorano la trasmissione dei carichi e in fase fessurativa hanno un effetto ricucente della lesione nell'elemento. Possiamo ritrovare quanto detto precedentemente osservando i valori della resistenza di prima fessurazione media che hanno valori inferiori rispetto alla resistenza massima nella maggioranza dei casi. Gli spostamenti medi registrati al carico massimo vanno dai 2 ai 3 mm nella maggioranza dei

casi, gli unici due scostamenti sono i provini: UHPFRC\_50\_D, E, F, in cui abbiamo un valore leggermente sotto ai valori riportati sopra pari a 1,84 mm, e l'UHPFRC\_100\_INT\_A, B, C, in cui è stato registrato uno spostamento superiore pari a 3,77 mm.

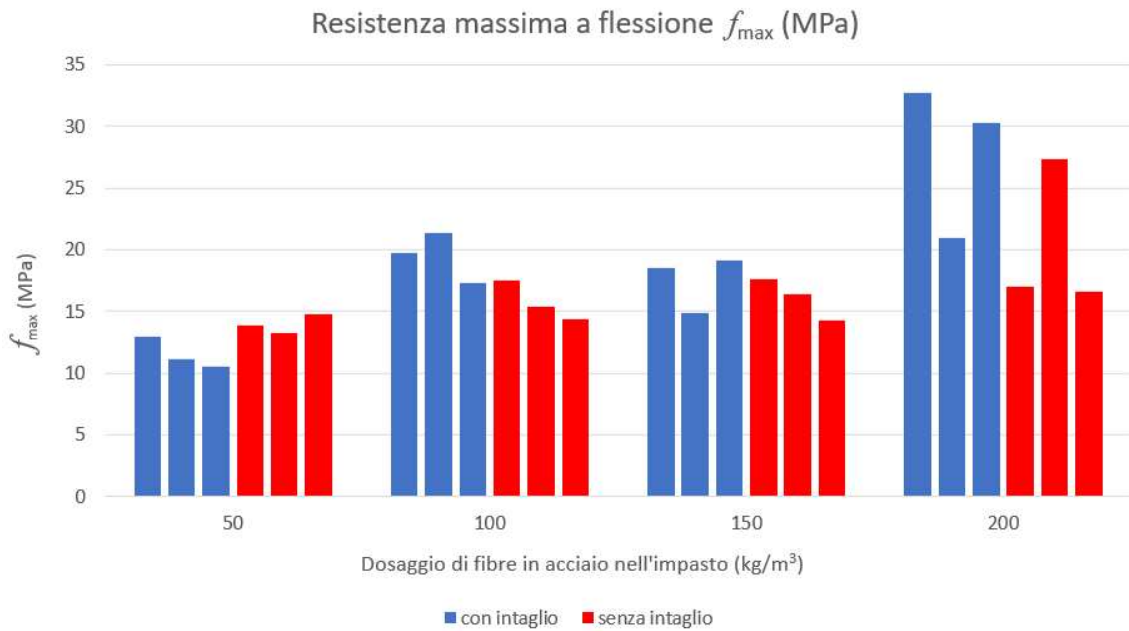


Figura 56: Confronto della resistenza massima a flessione dei diversi impasti su istogramma.

### 6.3. Risultati DIC e commento

Con la tecnica DIC 2D precedentemente descritta sono stati caratterizzati i provini UHPFRC, di seguito è riportato un grafico sigma-tempo per ogni miscela con differente dosaggio di fibre in acciaio. Sono riportate le mappe della deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm) e verticale  $f_y$  (mm), ottenute rispettivamente con la cam 0 e la cam 1, relative ai diversi punti segnati nel grafico. I punti nel grafico corrispondono a diversi istanti di tempo e sono stati scelti in modo tale da poter osservare con il punto A, l'apertura della fessura principale e con gli altri punti lo sviluppo negli istanti di tempo successivi. Per ogni immagine della deformazione longitudinale e verticale è associata a lato una scala

numerica in mm e cromatica, che riporta lo spostamento dei diversi punti rispetto al provino non deformato. Le prime 6 mappe rappresentano la deformazione longitudinale e le altre 6 la deformazione verticale.

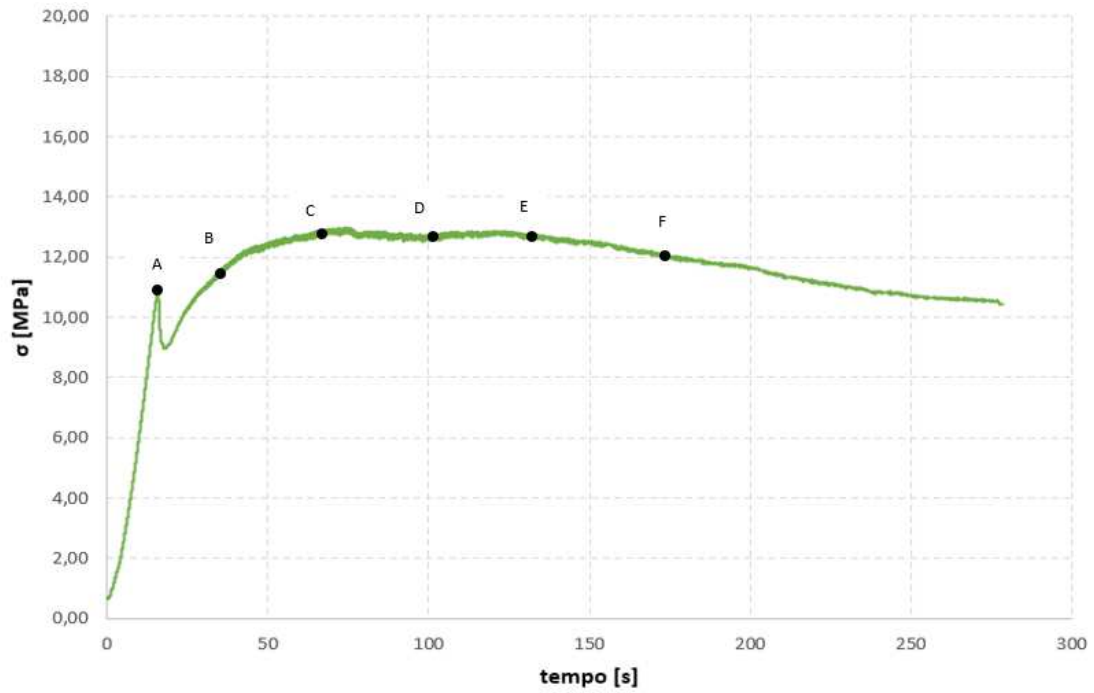


Figura 57: Curva sigma-tempo provino UHPFRC\_50\_INT\_A.

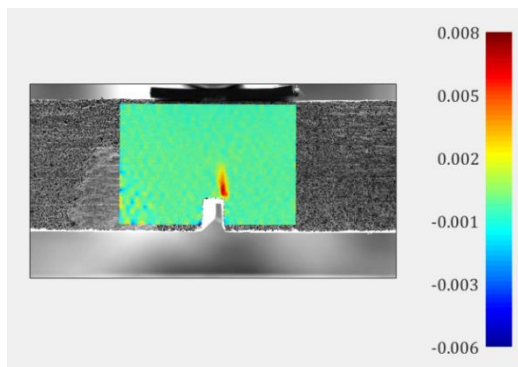


Figura 58: Punto A, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

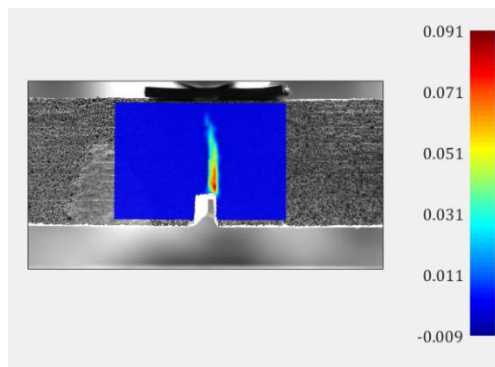


Figura 59: Punto B, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

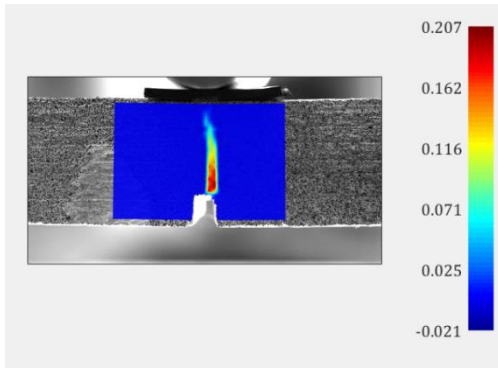


Figura 60: Punto C, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

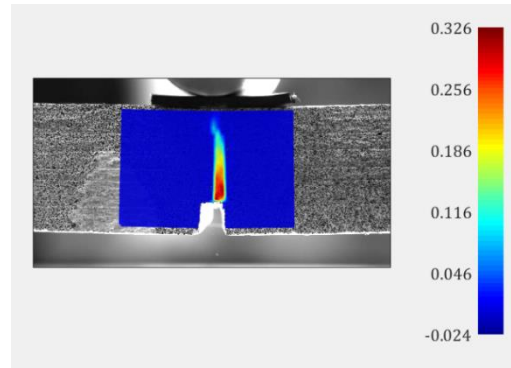


Figura 61: Punto D, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

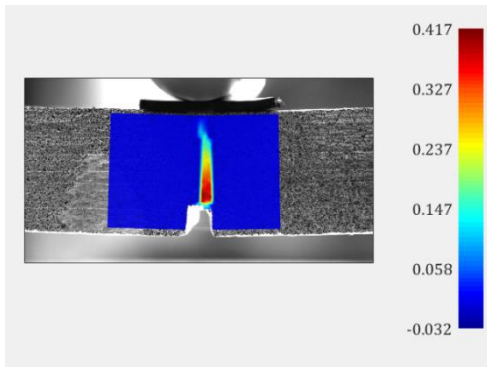


Figura 62: Punto E, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

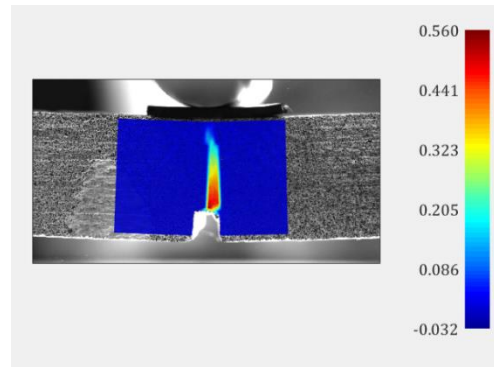


Figura 63: Punto F, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

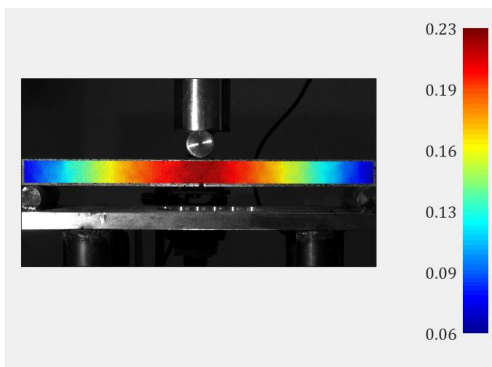


Figura 64: Punto A, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

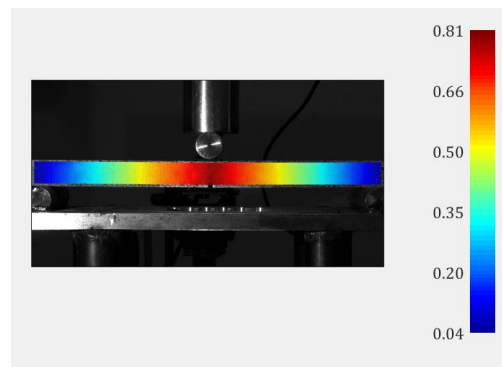


Figura 65: Punto B, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

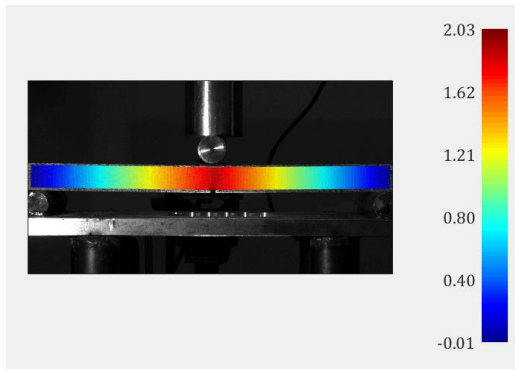


Figura 66: Punto C, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

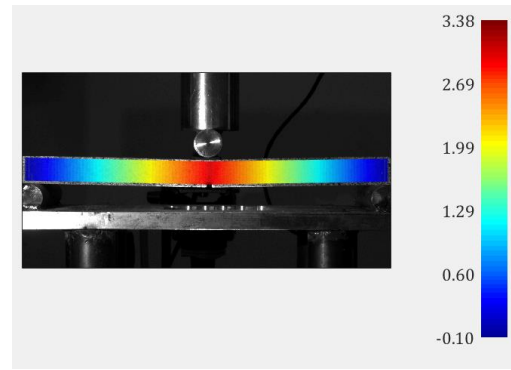


Figura 67: Punto D, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

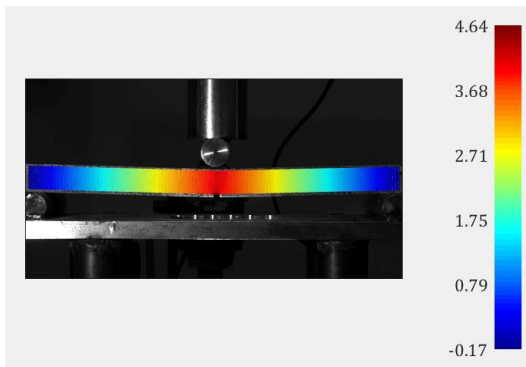


Figura 68: Punto E, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

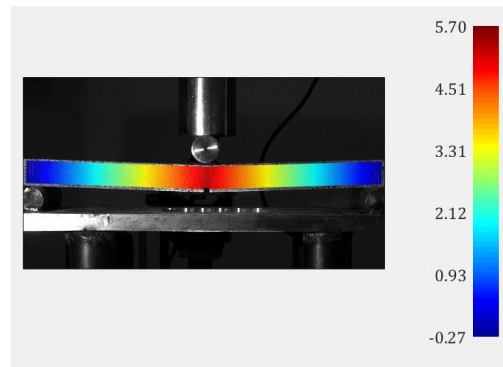


Figura 69: Punto F, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

Nel provino UHPFRC\_50\_INT\_A, possiamo osservare dalla figura 55 dove si instaura la fessura principale che è anche l'unica fino alla fine della prova. Questo aspetto è dovuto allo scarso effetto ricucente delle fibre che risultano essere di un dosaggio non sufficiente per instaurare un effetto multi-fessurativo nel provino. La freccia massima in mezzeria riportata in figura 69 è pari a 5.70 mm e risulta essere il 26,39% dell'altezza della sezione resistente del provino stesso.

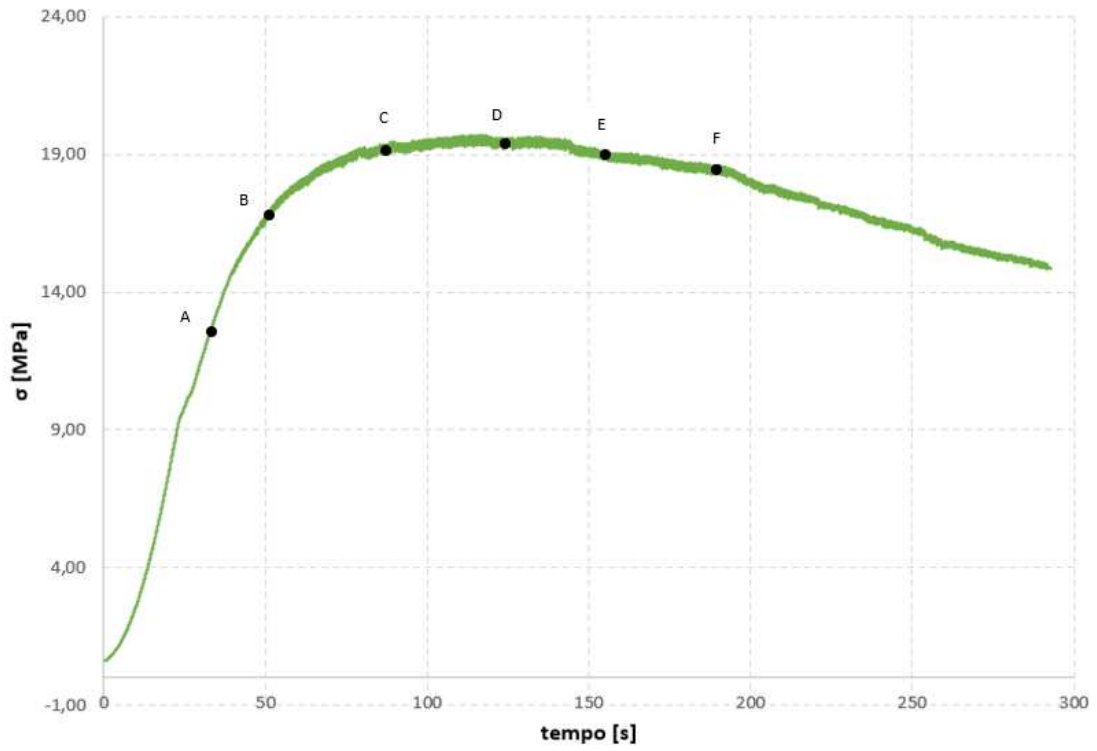


Figura 70: Curva sigma-tempo provino UHPFRC\_100\_INT\_A.

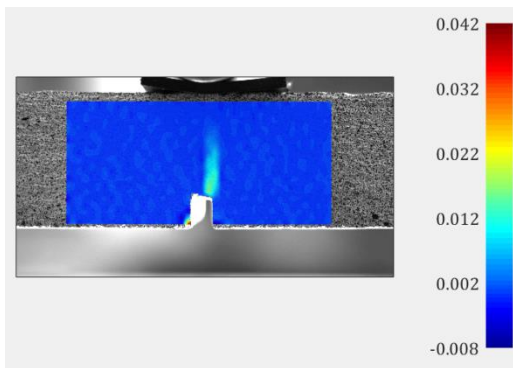


Figura 71: Punto A, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

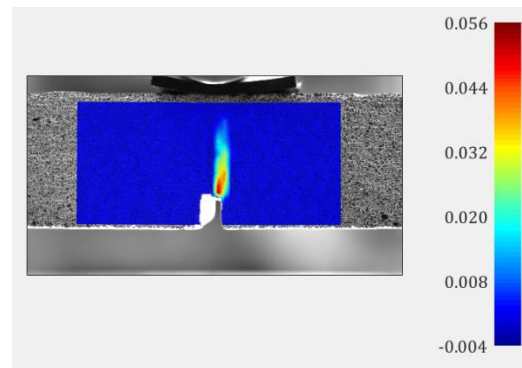


Figura 72: Punto B, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

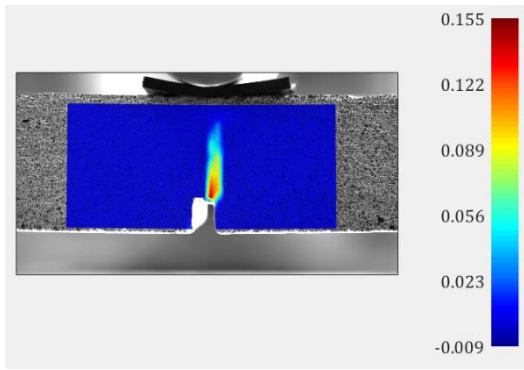


Figura 73: Punto C, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

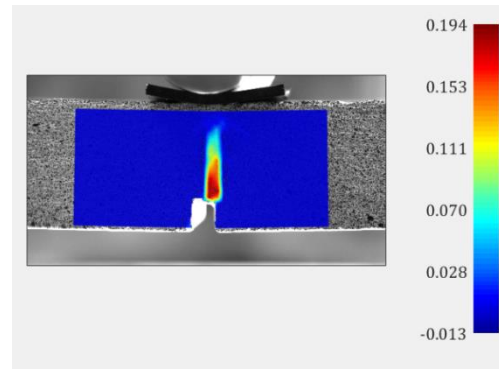


Figura 74: Punto D, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

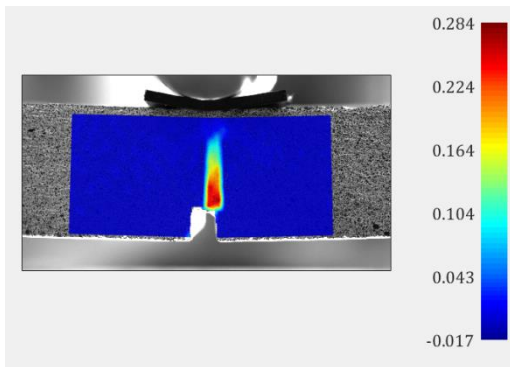


Figura 75: Punto E, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

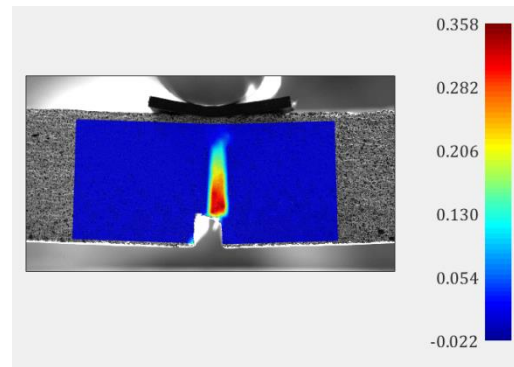


Figura 76: Punto F, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

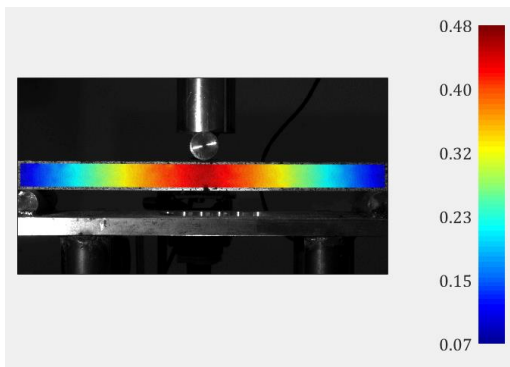


Figura 77: Punto A, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

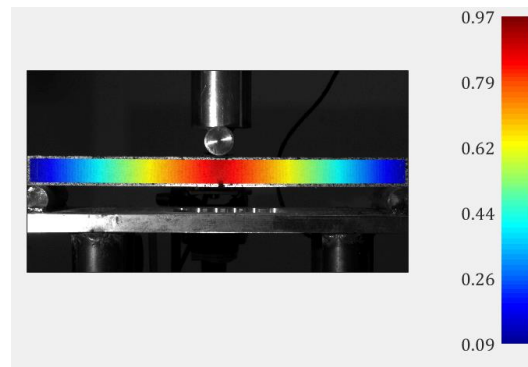


Figura 78: Punto B, deformazione verticale  $f_y$  (mm).



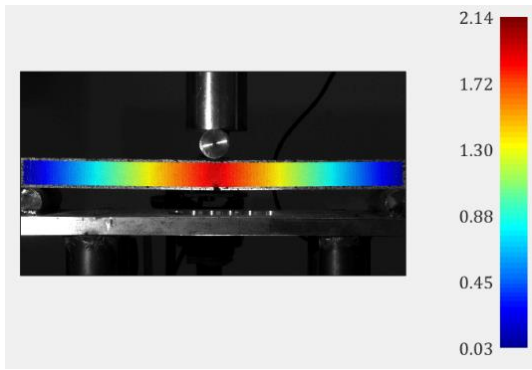


Figura 79: Punto C, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

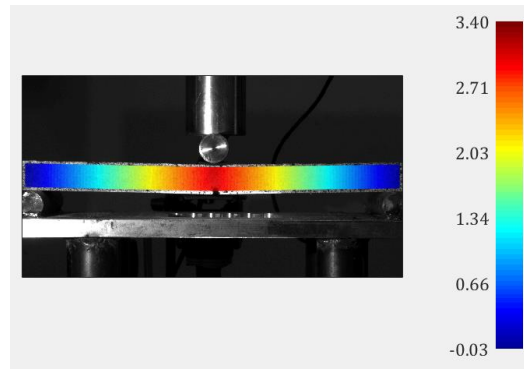


Figura 80: Punto D, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

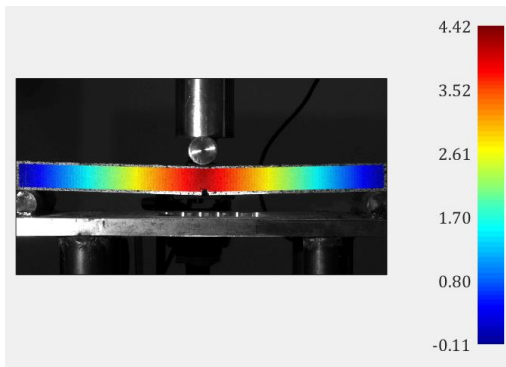


Figura 81: Punto E, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

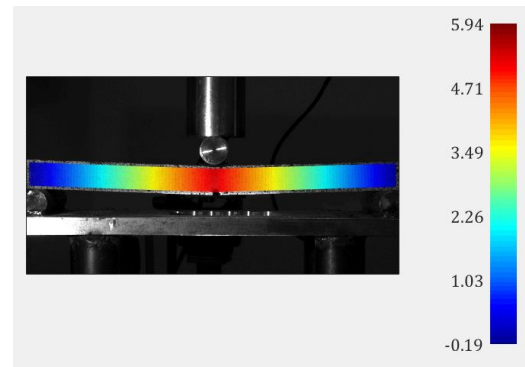


Figura 82: Punto F, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

Nel provino UHPFRC\_100\_INT\_A, come è evidente in figura 71 la fessura che si apre è unica ed è nella parte destra dell'intaglio come nel provino precedentemente analizzato. Anche in questo caso non è possibile apprezzare una multi-fessurazione a causa del dosaggio delle fibre in acciaio con dosaggio ancora non sufficiente. La massima freccia nel punto F come riportato in figura 82 è di 5,94 mm pari al 27,12% dell'altezza della sezione resistente del provino.

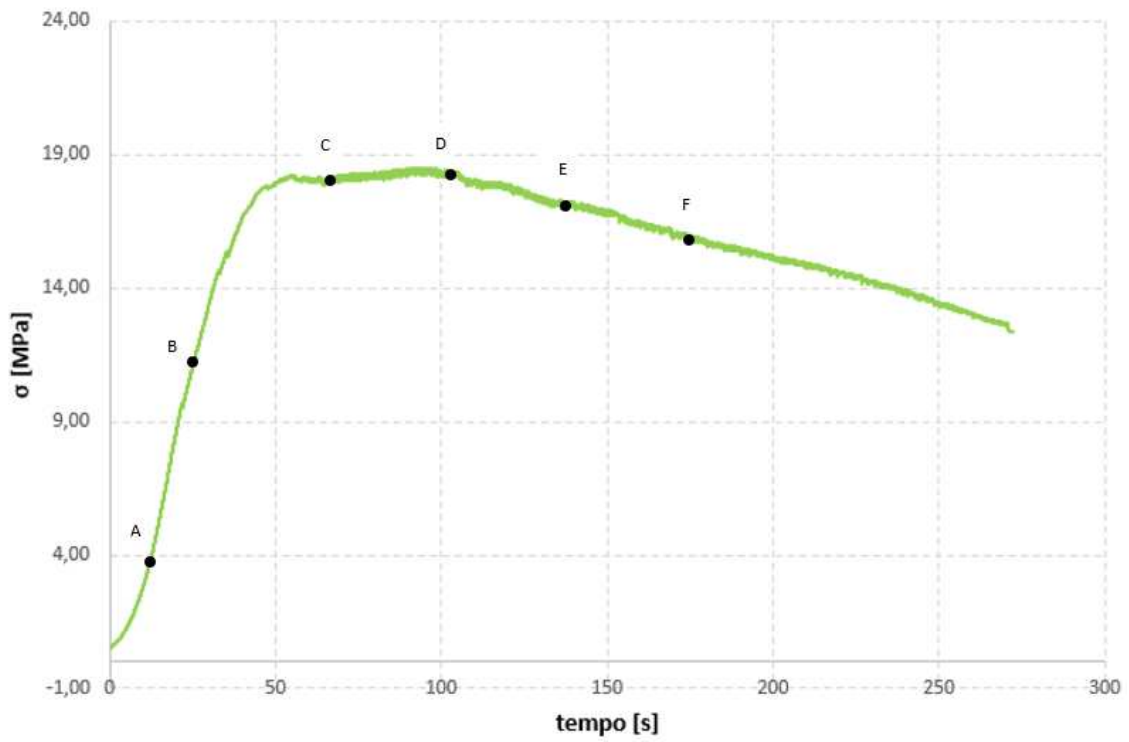


Figura: 83: Curva sigma-tempo provino UHPFRC\_150\_INT\_A.

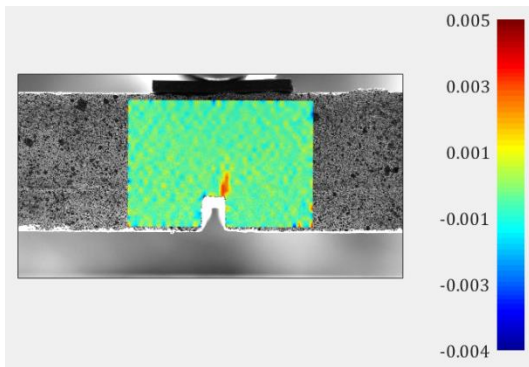


Figura 84: Punto A, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

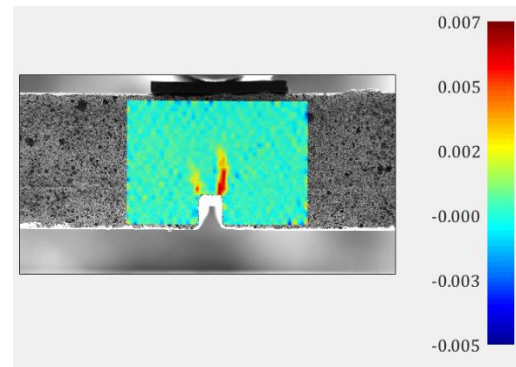


Figura 85: Punto B, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

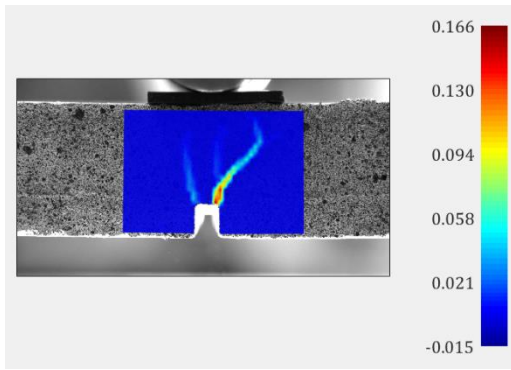


Figura 86: Punto C, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

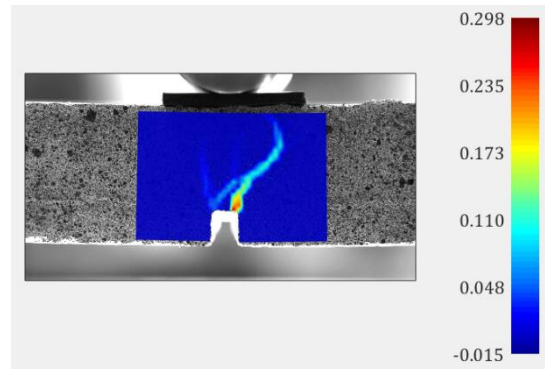


Figura 87: Punto D, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

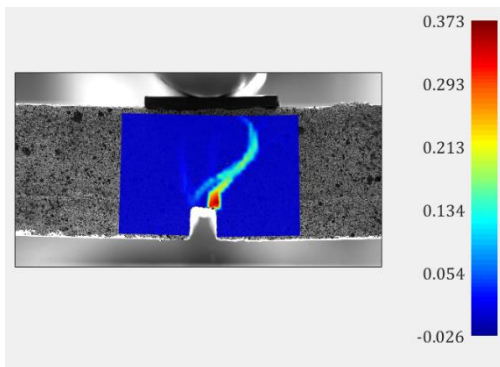


Figura 88: Punto E, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

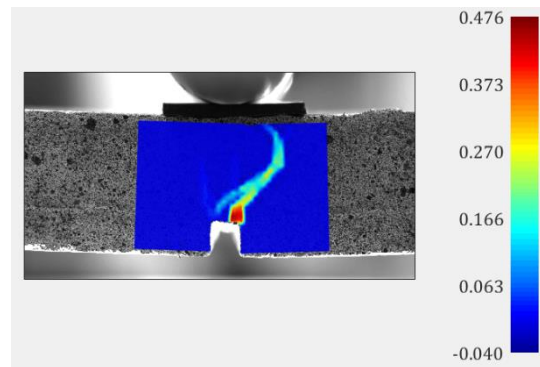


Figura 89: Punto F, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

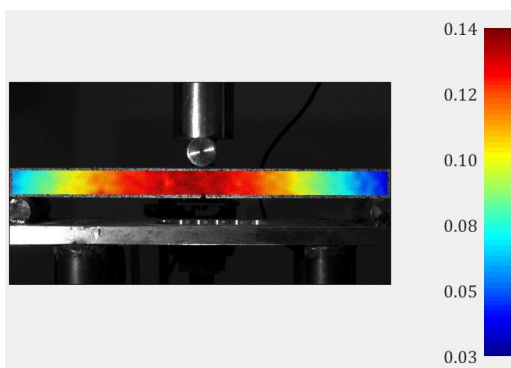


Figura 90: Punto A, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

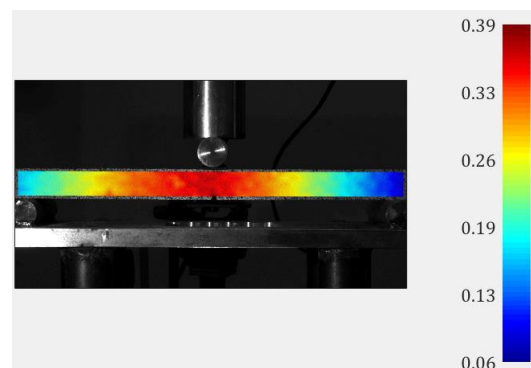


Figura 91: Punto B, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

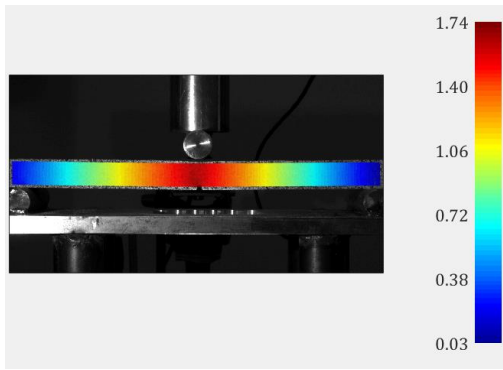


Figura 92: Punto C, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

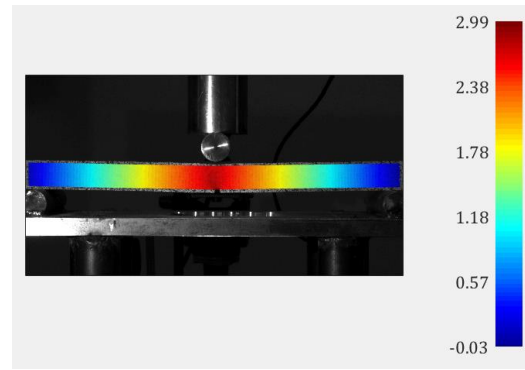


Figura 93: Punto D, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

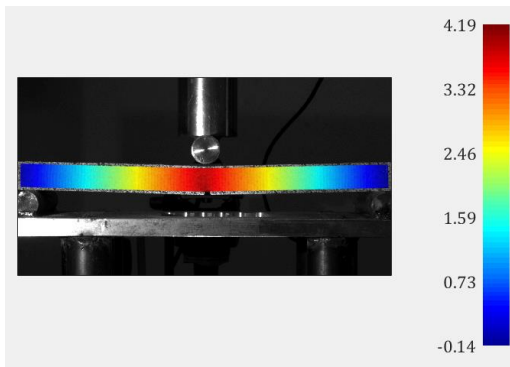


Figura 94: Punto E, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

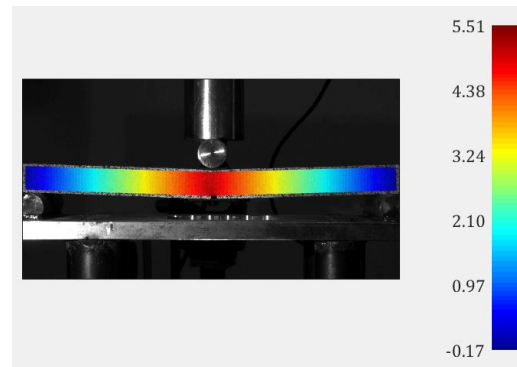


Figura 95: Punto F, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

Nel provino UHPFRC\_150\_INT\_A, come riportato in figura 85 abbiamo una fessurazione doppia nella sezione intagliata del provino, proseguendo però c'è un'unica fessurazione che prosegue. Questo aspetto è indice che aumentando la quantità di fibre nell'impasto si porta il materiale ad una ripartizione del carico più omogenea nella zona di applicazione. La massima freccia nel punto F come evidenziato dalla figura 95 è pari a 5,51 mm che risulta essere il 23,35% dell'altezza della sezione resistente del provino.

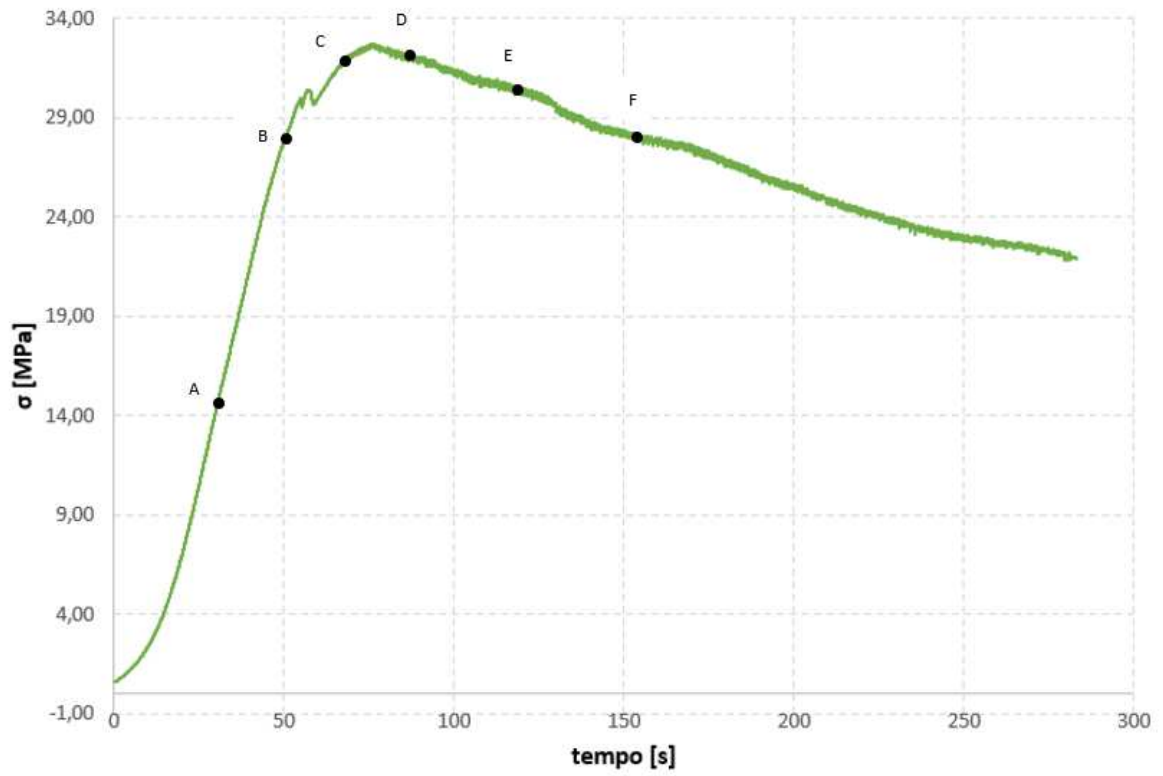


Figura 96: Curva sigma-tempo provino UHPFRC\_200\_INT\_A.

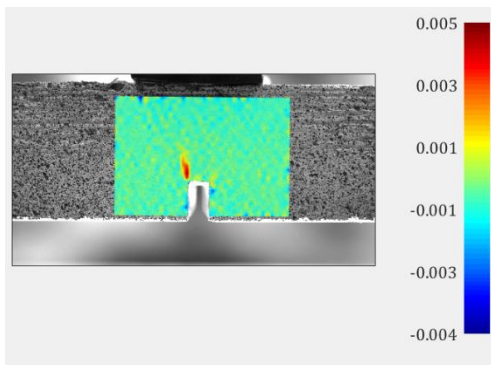


Figura 97: Punto A, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

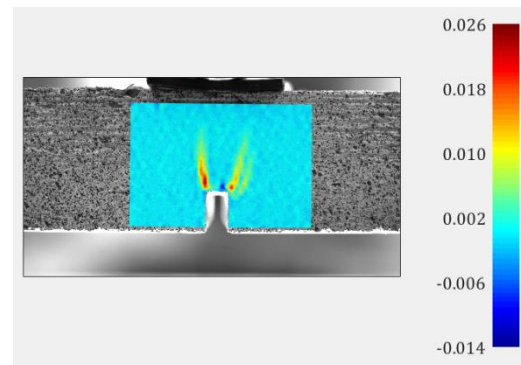


Figura 98: Punto B, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

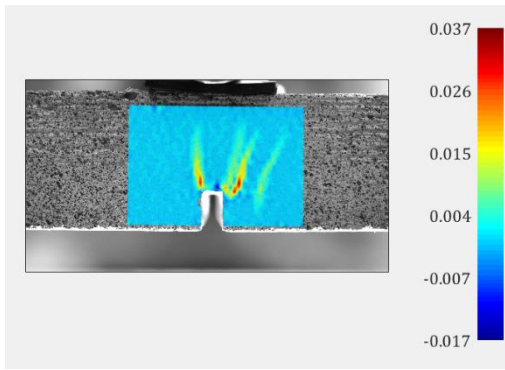


Figura 99: Punto C, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

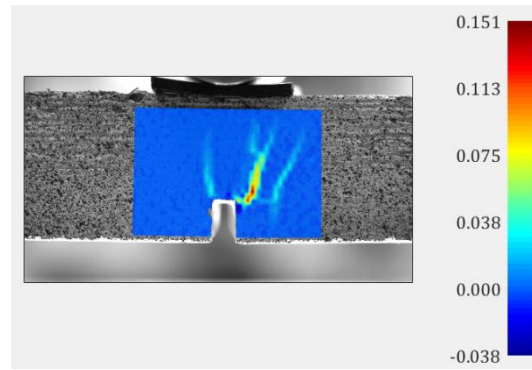


Figura 100: Punto D, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

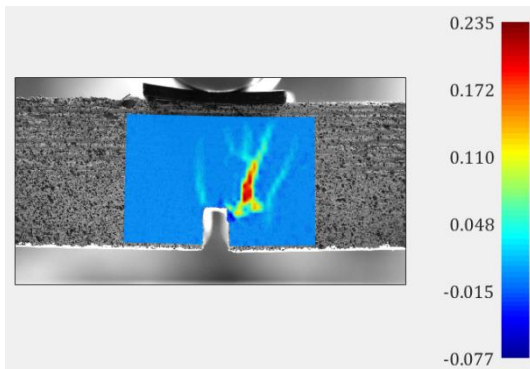


Figura 101: Punto E, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

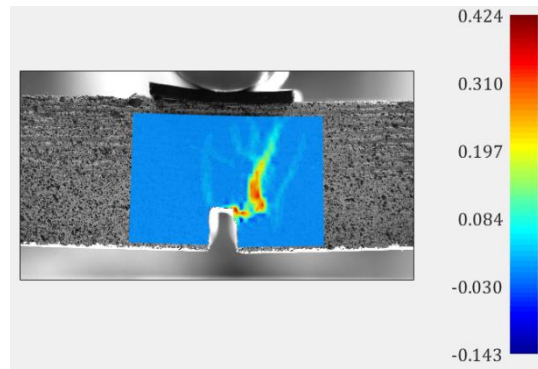


Figura 102: Punto F, deformazione longitudinale  $\epsilon_x$  (mm/mm).

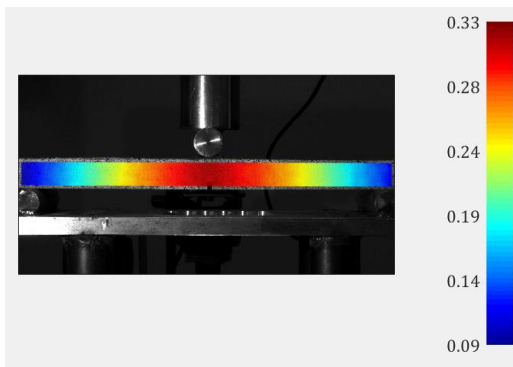


Figura 103: Punto A, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

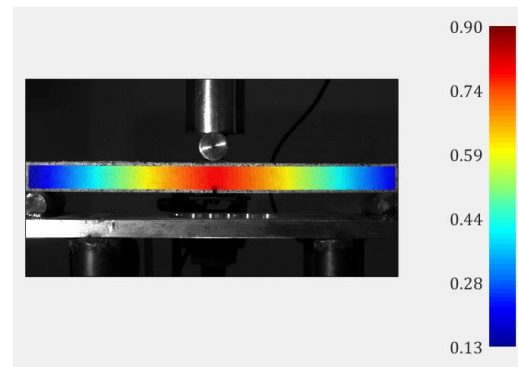


Figura 104: Punto B, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

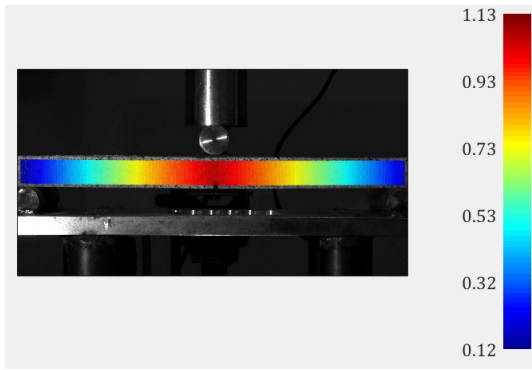


Figura 105: Punto C, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

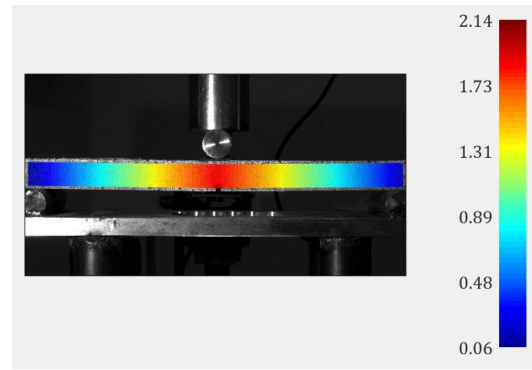


Figura 106: Punto D, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

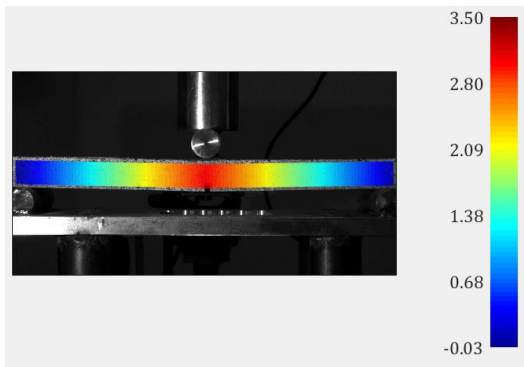


Figura 107: Punto E, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

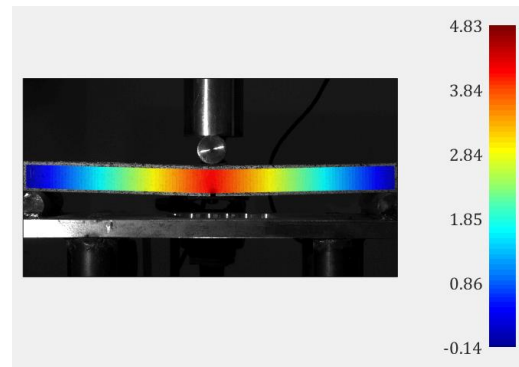
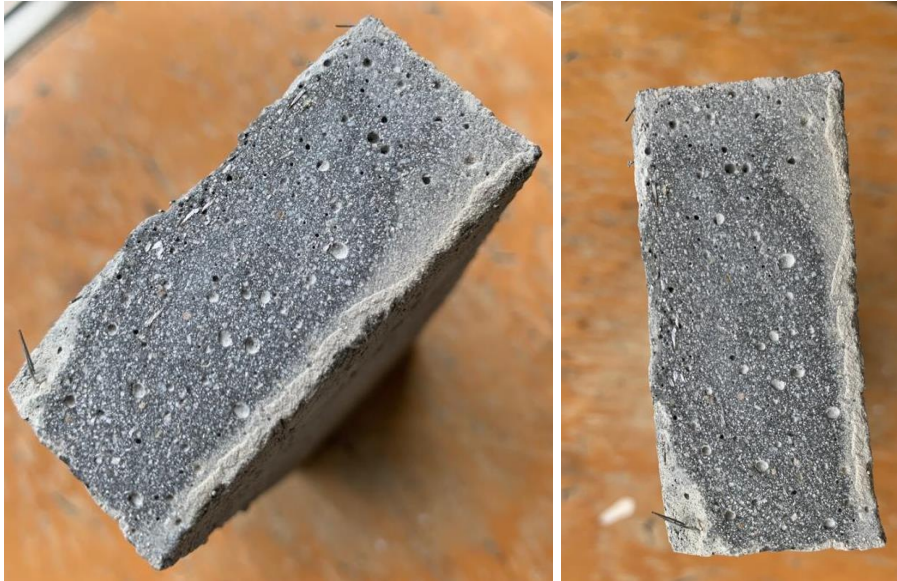


Figura 108: Punto F, deformazione verticale  $f_y$  (mm).

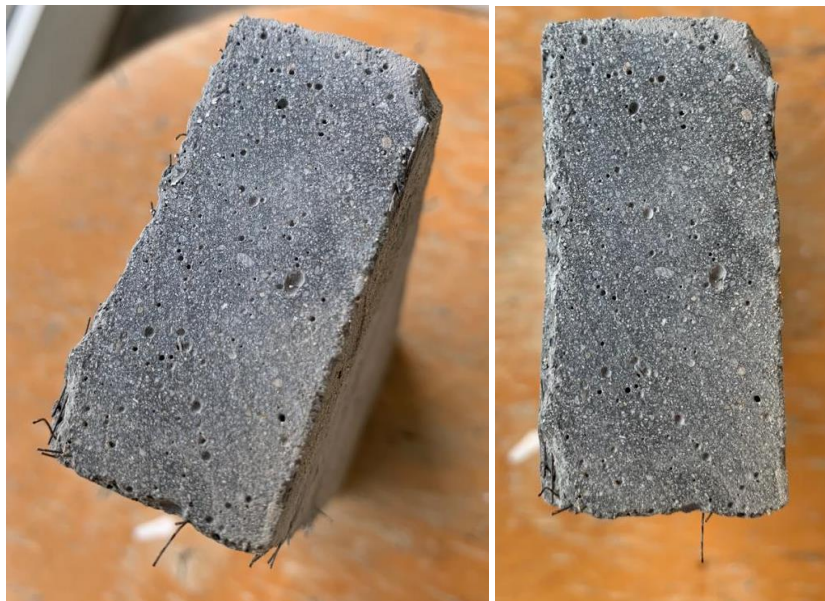
Nel provino UHPFRC\_200\_INT\_A, come è evidente dalle immagini sopra riportate della deformazione longitudinale il provino arriva a rottura con un numero di fessurazioni considerevole, specchio del fatto che aumentando il dosaggio di fibre nella miscela queste vadano a “cucire” le fessure evitandone il dislocamento. La massima freccia misurata nel punto F, come riportato in figura 108 è 4.83 mm pari al 21,80% dell’altezza della sezione massima del provino.

### 6.3.1. Analisi sezione dei provini testati

Dopo aver analizzato i provini con la DIC 2D, questi sono stati sezionati in prossimità della fessura per osservare la disposizione delle fibre ed il loro orientamento all'interno del composto. Sono stati sezionati 4 provini, uno per ogni diverso impasto con diversa quantità di fibre.

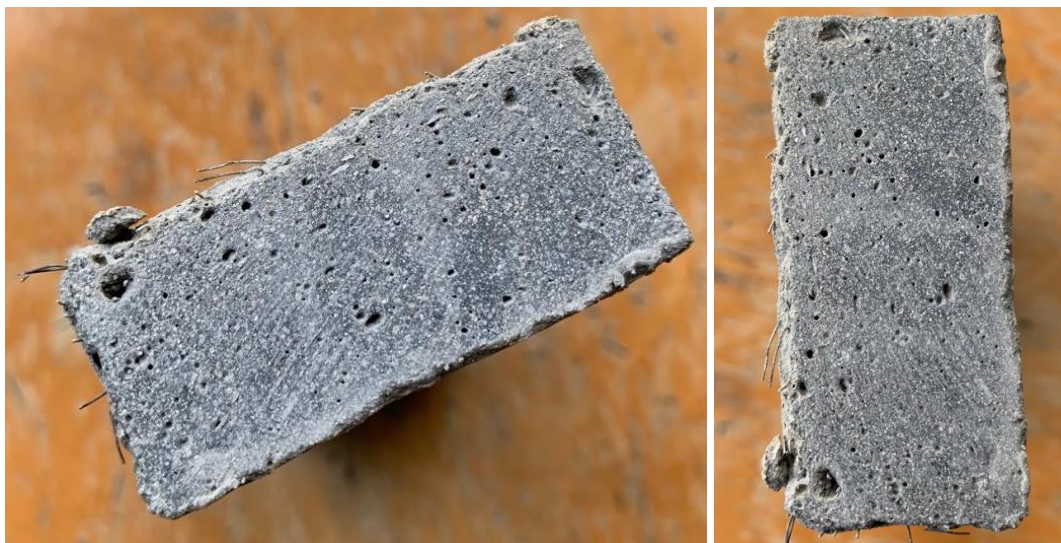


*Figura 109: Sezione del provino UHPFRC con dosaggio di fibre pari a 50 kg/m<sup>3</sup>*

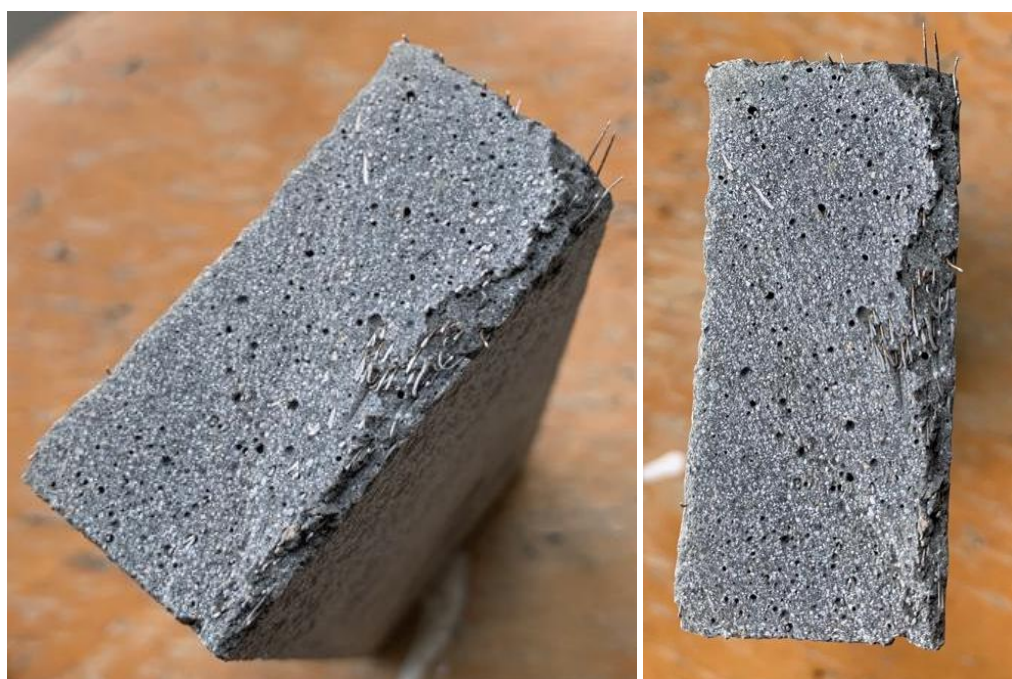


*Figura 110: Sezione del provino UHPFRC con dosaggio di fibre pari a 100 kg/m<sup>3</sup>*





*Figura 111: Sezione del provino UHPFRC con dosaggio di fibre pari a 150 kg/m<sup>3</sup>*



*Figura 112: Sezione del provino UHPFRC con dosaggio di fibre pari a 200 kg/m<sup>3</sup>*

Dalle immagini è possibile distinguere le fibre nella sezione per il loro colore più chiaro, la distribuzione all'interno del provino in tutti i casi è omogenea senza agglomerati di fibre localizzati. L'orientamento delle fibre varia al variare del dosaggio, possiamo notare che nei provini con una quantità minore di fibre nel composto la direzione

principale è quella longitudinale cioè le fibre sono disposte perpendicolarmente alla fessura il che ci suggerisce che le fibre lavorano a flessione aumentando le prestazioni del materiale. Per quanto riguarda invece i provini con maggior dosaggio, notiamo che la disposizione delle fibre è più caotica e quest'ultime hanno una direzione in alcuni casi perpendicolare e in altri parallela alla fessura. Questo aspetto è causato dalla più difficile miscelazione del composto che oltre una determinata quantità di fibre riduce molto la sua lavorabilità e la disposizione delle fibre diventa poco controllabile. Essendo la resistenza a flessione influenzata molto dall'orientamento delle fibre, per i provini che hanno registrato una minor resistenza a flessione rispetto ai valori attesi le possibili criticità possono essere:

- La creazione di una zona con una minor quantità di fibre nell'intorno della fessura;
- La disposizione delle fibre parallela alla fessura.
- La formazione di microbolle d'aria dovute ad una difficile compattazione delle matrici con elevato dosaggio di fibre.

Essendo difficile controllare la corretta disposizione delle fibre e l'omogeneità delle stesse all'interno del provino i valori della massima resistenza a flessione risultano essere molto variabili tra di loro con scostamenti considerevoli.

## **7. Conclusioni**

I calcestruzzi ad altissime prestazioni UHPFFRC oggetto delle prove di flessione per la caratterizzazione meccanica hanno confermato le prestazioni attese in termini di resistenza a flessione, quest'ultima aumenta all'aumentare del dosaggio di fibre nel composto e arriva a valori di circa 30 MPa per i provini con dosaggio maggiore di fibre. Grazie alla tecnica DIC 2D con la quale sono state create le mappe degli spostamenti del provino durante la prova è stato possibile osservare come l'aumento della quantità di fibre nel composto inneschi, in fase fessurativa, una fessurazione multipla del provino dovuta all'effetto ponte che viene a crearsi tra gli estremi della fibra nei primi istanti in cui si apre la fessura, con una trasmissione delle tensioni da una parte all'altra della fibra.

Questo aspetto conferisce una maggior duttilità al materiale e un notevole incrudimento, come è possibile osservare nelle mappe forza-spostamento precedentemente riportate. Questo aspetto è di fondamentale importanza in zona sismica in quanto una maggior snellezza delle sezioni, insieme ad un comportamento duttile della struttura permettono di diminuire la spinta sismica e di assorbire l'energia rilasciata senza il collasso fragile degli elementi strutturali.

## Bibliografia

Batoz, J.-F., & Manager, M. (2009). *UHPRFC development on the last two decades: an overview*.

British Standards Institution. (2006). *Fibres for concrete. Part 2, Polymer fibres - definitions, specifications and conformity*.

CNR-DT 204. (2008). *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato*.

CNR-DT 209. (2013). *Studi preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni per l'impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni*.

Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici Servizio Tecnico Centrale. (2019). *Linea guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)*.

Donnini, J., Lancioni, G., Chiappini, G., & Corinaldesi, V. (2021). Uniaxial tensile behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete (uhprfc): Experiments and modeling. *Composite Structures*.

E. Fehlig. (2004). *Ultra high performance concrete (UHPC)*.

- F.-J. Ulm. (2007). *Statistical Indentation Techniques for Hydrated Nanocomposites: Concrete, Bone, and Shale*.
- J. Jungwirth, & A. Muttoni. (2004). *Structural Behavior of Tension Members in UHPC*.
- M. Collepardi, S. Collepardi, R. Troli, & L. Coppola. (2003). *Innovative Concretes (SSC, HPC and RPC) in the Field of Architectural, Civil and Environmental Engineering*.
- M. I. Khan, & R. Siddique. (2011). *Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties*.
- Mazloom, M., Ramezani pour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*.
- Schmidt, M. (2004). *Ultra high performance concrete (UHPC) ; proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*.
- UNI EN 1015-3. (2007). *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse)*.
- Yoo, D. Y., & Banthia, N. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*.