



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

Determinazione dell'apertura della cricca tramite analisi di immagine su provini Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) intagliati e sottoposti a flessione.

Determination of crack opening by image analysis on notched Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) specimens in bending test.

*Relatore:* Chiar.mo

Prof. Marco Sasso

*Correlatore:* Chiar.mo

Prof. Gianluca Chiappini

*Tesi di Laurea di:*

Alanis Casaccia

A.A. 2021 / 2022

# Sommario

1. Introduzione.....	1
1.1 Prova di flessione.....	1
2. Materiali.....	4
2.1 Caratteristiche generali degli UHPFRC.....	4
2.2 Sviluppo e impiego degli UHPFRC.....	5
2.3 Proprietà e parametri meccanici.....	8
2.4 Componenti degli UHPFRC.....	10
2.5 Composizione dei provini.....	14
3. Test.....	15
3.1 Setup delle prove.....	15
3.2 Analisi di immagine.....	18
3.3 Importazione dei dati della macchina.....	23
3.4 Problema dell'errore dovuto allo spostamento.....	27
3.5 Calcolo dei risultati corretti.....	28
4. Risultati.....	42

# 1. Introduzione

L'obiettivo della tesi è quello di elaborare un algoritmo che ci permetta di determinare l'andamento dell'apertura della cricca su dei provini UHPFRC (acronimo di Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete) sottoposti ad una prova di flessione su tre punti.

Tale analisi è stata effettuata su quattro diverse tipologie di provini, che differiscono per la quantità di fibre di acciaio impiegate nella loro composizione. Sono stati sottoposti al test di flessione tre campioni per ciascuna tipologia di provino, per un totale di 12 campioni analizzati. Sono poi stati elaborate le informazioni raccolte in laboratorio per ottenere la relazione tra la forza applicata dalla macchina e la risposta del materiale. I risultati ottenuti dalle diverse prove e le differenze nella risposta alla sollecitazione per i diversi materiali sono poi stati confrontati tra loro.

Durante la prova sono state utilizzate due fotocamere che riprendevano il provino con due diverse visuali, così da acquisire le immagini utilizzate per analizzare le deformazioni del provino e l'apertura della cricca. Una fotocamera è stata posizionata in modo da riprendere la parte inferiore del provino, mentre l'altra è stata posta frontalmente in modo da riprendere la deformazione del profilo, e quindi lo spostamento verso il basso subito dal provino.

I dati acquisiti in laboratorio sono stati elaborati tramite il programma MATLAB, attraverso il quale è stato possibile effettuare la misurazione dell'apertura graduale della cricca e degli spostamenti subiti dai provini, tramite la procedura illustrata più avanti.

## 1.1 Prova di flessione

I provini sono stati sottoposti ad una prova di flessione a tre punti. Questa prevede che il provino sia posizionato su due rulli nell'intorno delle estremità e che venga applicato il carico nel punto di mezzzeria.

Con tale prova si sottopone il materiale ad un momento flettente, che causa un'inflexione verso il basso del provino. Volendo analizzare la deformazione ed il conseguente stato tensionale che si instaura nel materiale da un punto di vista teorico, possiamo considerare una trave ad asse rettilineo con sezione trasversale costante soggetta a momento flettente.

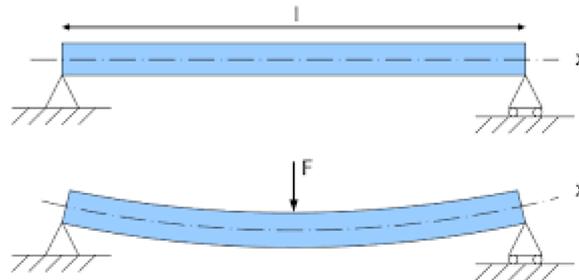


Figura 1: trave appoggiata soggetta a flessione.

Il piano individuato da  $x$  e  $z$  nella figura sottostante è chiamato piano neutro, ed è caratterizzato da valori di tensione e deformazione nulli. L'intersezione di tale piano con una qualsiasi sezione individua l'asse neutro della sezione. A causa della curvatura dell'asse neutro, una generica sezione della trave subirà una rotazione di un angolo  $d\varphi$ .

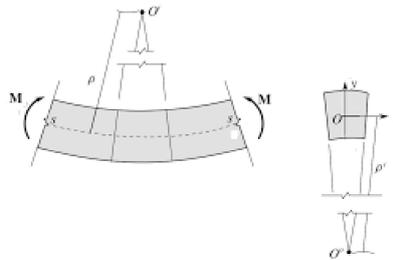


Figura 2: trave ad asse rettilineo soggetta a momento flettente positivo.

Indicando con  $\rho$  il raggio di curvatura e con  $ds$  la lunghezza di un elemento infinitesimo dell'asse neutro, la definizione di curvatura è data da:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\varphi}{ds}$$

Una fibra che si trova ad una certa distanza  $y$  dall'asse neutro subirà un allungamento  $dx$  pari a:

$$dx = -y d\varphi$$

La deformazione è definita come il rapporto tra l'allungamento e la lunghezza iniziale. La deformazione di un elemento infinitesimo sarà quindi data da:

$$\varepsilon = \frac{dx}{d\varphi}$$

Combinando le equazioni precedenti e ricordando la legge di Hooke  $\sigma = E\varepsilon$  (dove  $E$  è il modulo di Young del materiale) è possibile scrivere l'espressione della tensione come:

$$\sigma = -\frac{Ey}{\rho}$$

Si osservi inoltre che, affinché la trave soddisfi la condizione di equilibrio, il momento flettente interno prodotto dalle tensioni  $\sigma$  deve essere uguale al momento esterno  $M$ :

$$M = -\int y\sigma dA = \frac{E}{\rho} \int y^2 dA$$

Dove  $dA$  è un elemento di area infinitesima. Inoltre, il secondo integrale dell'equazione è il momento di inerzia dell'area rispetto all'asse  $z$ .

$$I = \int y^2 dA$$

Dalle ultime due equazioni è quindi possibile scrivere

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$$

Sostituendo  $\rho$  tramite l'espressione della tensione vista in precedenza:

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

Tale equazione stabilisce che le tensioni dovute a momento flettente sono direttamente proporzionali alla distanza  $y$  dall'asse neutro e al momento flettente  $M$ . Si può porre  $c = y_{max}$  ed omettere il segno meno.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{Z}$$

Dove  $Z = I/c$  è detto modulo di resistenza a flessione.

Lo stato tensionale che si crea nel materiale è di compressione nelle fibre al di sopra del piano neutro, mentre è di trazione al di sotto di esso.

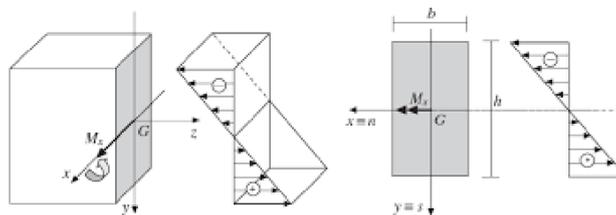


Figura 3: tensioni dovute al momento flettente.

## 2. Materiali

### 2.1 Caratteristiche generali degli UHPFRC

Gli UHPFRC, acronimo di Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, sono materiali a matrice cementizia contenente fibre di acciaio, caratterizzati da valori di resistenza a compressione maggiore dei 150 MPa, con la possibilità di attingere ai 250 MPa. Le fibre intervengono nella redistribuzione dei carichi in seguito alla rottura della matrice cementizia, riducendo il comportamento fragile del calcestruzzo semplice sottoposto a carichi trazione o flessione, e conferendo al materiale una maggiore duttilità. *“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).

Le caratteristiche che distinguono gli UHPFRC dalla prima generazione di calcestruzzi sono:

- la resistenza a compressione, sistematicamente più alta dei 150 MPa;
- l'impiego delle fibre di acciaio, che riducono la fragilità del materiale e modificano la normale richiesta di rinforzi attivi e/o passivi;
- l'alta presenza di legante, necessaria per la particolare composizione della miscela.

Oltre ad un notevole aumento dei valori di resistenza a trazione e flessione rispetto al calcestruzzo ordinario, gli UHPFRC presentano numerosi vantaggi. Tra questi vi è l'assenza di fessurazioni durante presa ed indurimento del materiale, che insieme ad un'aggiunta di minerali garantisce anche una resistenza in ambienti aggressivi, migliorandone la durabilità. Inoltre, grazie ai maggiori valori di resistenza conferiti dalle fibre, è possibile alleggerire le strutture restringendone le sezioni ed utilizzando una minor quantità di armature metalliche nelle sezioni degli elementi, con un conseguente risparmio sia in materiali da acquistare, sia in fase di trasporto e di messa in opera. Un'altra caratteristica è il comportamento post-fessurativo incrudente, che conferisce al materiale una notevole tenacità a rottura ed un ottimo comportamento a fatica. Un altro aspetto vantaggioso degli UHPFRC riguarda la sostenibilità: vengono infatti impiegati scarti industriali per conferire l'attività chimica alla matrice cementizia. L'impiego di fumo di silice, ceneri volanti e loppa micro-fine riduce inoltre 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.

## 2.2 Sviluppo e impiego degli UHPFRC

Gli UHPFRC nascono negli anni '90 per porre rimedio alle criticità dei calcestruzzi utilizzati in quegli anni. Il calcestruzzo armato infatti, che è diventato nello scorso secolo il principale materiale per opere architettoniche e strutturali, ha permesso di superare i vincoli imposti

dalle vecchie tecniche di costruzione; tuttavia, nel tempo sono sorte problematiche legate sia alle sue prestazioni che alla sua sostenibilità ambientale.

È così che, in risposta a questi problemi e alle questioni di carattere ambientale, nacque un settore di ricerca con il principale scopo di implementare le caratteristiche proprie del materiale e perfezionarne le prestazioni meccaniche, migliorando la durabilità delle strutture e riducendo le emissioni inquinanti connesse ad esso.

All'inizio degli anni '70, con lo sviluppo di nuovi additivi ed aggiunte e lo studio dettagliato dei processi di stagionatura e del mix-design, si è iniziato a ricercare metodi per rendere il materiale più performante. Nascono in questo periodo i primi calcestruzzi DSP (Densified with Small Particle), nei quali viene sperimentata la combinazione fumo di silice-superfluidificante. Si ottengono ottime prestazioni meccaniche e di resistenza alle aggressioni ambientali, ma rimangono comunque soggetti a limiti nel comportamento deformativo. *“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).

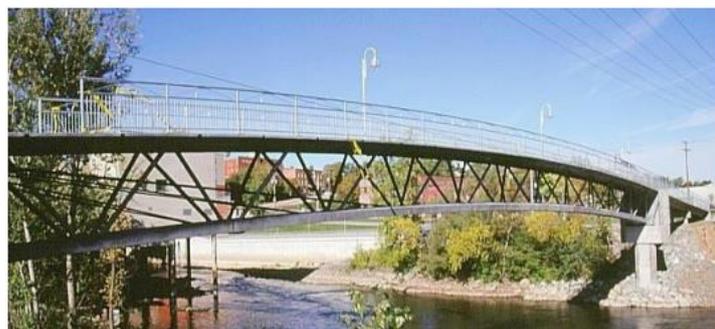
Nei primi anni '90 si è assistito alla nascita dei cosiddetti RPC (Reactive Powder Concrete), ottenuti aggiungendo al materiale DSP sia fibre d'acciaio, che ne aumentano la duttilità contribuendo all'assorbimento degli sforzi e migliorandone la risposta a carichi di trazione e flessione, sia fibre in materiali polimerici che consentono di attenuare il fenomeno dello spalling (fenomeno che porta al degrado e al distacco improvviso, anche a velocità elevata, di pezzi di calcestruzzo dal copriferro) durante gli incendi.

Si è così giunti a sviluppare materiali con i quali è possibile raggiungere, anche in tempi molto brevi, i 200 MPa per la resistenza meccanica a compressione, con un conseguente miglioramento anche della resistenza flessionale (50 MPa) e della duttilità del materiale (energia di frattura di 10000-30000 J/m<sup>2</sup>, ovvero circa cento volte superiore a quella dei calcestruzzi ad alte prestazioni)

Due tipologie di calcestruzzi in particolare sono state il frutto degli studi di questo periodo: l'RPC200, che raggiunge valori di resistenza di circa 190 MPa, e l'RPC800, che arriva a raggiungere valori superiori ai 600 MPa. Al fine di ridurre i costi degli UHPFRC, sono state recentemente studiate miscele con aggregati di dimensioni maggiori, così da diminuire la quantità di polveri.

Già partire dalla seconda metà degli anni'90, il materiale inizia ad essere impiegato nel campo dell'ingegneria civile con l'intento di sfruttare a pieno le proprietà di leggerezza, resistenza e durabilità degli UHPC.

La prima applicazione pratica è il ponte pedonale di Sherbrooke, in Canada: si tratta di una passerella sul Magog River a campata unica di 60 metri, privo di armature metalliche, costituita da sei elementi prefabbricati assemblati in opera mediante post-tensione. La struttura portante è realizzata con una trave reticolare, tipologia usata solitamente per le strutture in acciaio al fine di garantire un'elevata inerzia della sezione, riducendo allo stesso tempo i carichi permanenti. Il materiale ha dimostrato un'elevata durabilità in condizioni di esercizio severe, soggetto a cicli gelo-disgelo, elevati sbalzi termici, presenza di agenti corrosivi come sali marini e acqua di condensa, oltre sostanze chimiche pericolose e rifiuti organici. Oltre poi alle notevoli prestazioni, il materiale innovativo ha reso possibile una straordinaria libertà architettonica ed estetica per il progettista.



*Figura 4: ponte di Sherbrooke, 1999.*

In seguito al ponte di Sherbrooke sono stati effettuati studi in merito alle sezioni che consentissero di trarre maggior profitto dai materiali RPC nella realizzazione di ponti

pedonali e ciclabili, che hanno aperto la strada alla realizzazione di altre passerelle e ponti pedonali come il Peace Footbridge in Corea o il Sakata Mirai Footbridge in Giappone.

L'impiego degli UHPFRC si è poi esteso a ponti stradali e ferroviari; ad oggi i suoi utilizzi sono molteplici, ad esempio nella realizzazione di giunti strutturali, di solette prefabbricate e precomprese all'uso, senza l'utilizzo di rinforzi o armature, e di opere non strutturali come pensiline, facciate e passerelle.

### 2.3 Proprietà e parametri meccanici

Per quanto riguarda il 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.

Nel caso della resistenza a trazione uniassiale, è stato dimostrato da numerose evidenze sperimentali che per UHPC senza fibre i valori sono compresi tra 7 e 10 MPa. Il comportamento a trazione non è influenzato dalle dimensioni degli aggregati e la rottura è piuttosto fragile. La resistenza a trazione è connessa anche a quella a compressione ed alle caratteristiche che contribuiscono alla sua ottimizzazione. La presenza di una matrice cementizia migliorata in concomitanza con l'impiego di fibre ad elevata resistenza (superiore ai 2100 MPa) e con il miglioramento del legame adesivo fibre-matrice (ottenuto variando la geometria delle fibre) permettono di ottenere migliori valori della resistenza a trazione.

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 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. Le prove hanno dimostrato che i provini fibrorinforzati presentano un campo plastico più esteso rispetto ai provini senza fibre.

Per quanto riguarda i principali parametri meccanici, il modulo di elasticità di un UHPC è molto più alto di quello di un calcestruzzo ordinario (a parità di tipologia di aggregati) per via della sua struttura densa. Il suo valore è funzione delle caratteristiche meccaniche degli aggregati e della loro percentuale presente nella pasta cementizia. Nel caso di un UHPC con aggregati fini (ad esempio sabbia di quarzo) il modulo di elasticità si aggira attorno a 48 GPa. Se si impiega un aggregato più resistente, tale parametro cresce; se si considera, ad esempio, un UHPC con basalto frantumato, questo presenta un modulo di elasticità prossimo ai 58 GPa, mentre uno con bauxite può raggiungere anche i 70 GPa.

Riguardo invece la durabilità degli UHPFRC, questa risulta difficile da determinare, trattandosi materiali relativamente "giovani" e non disponendo quindi di sufficienti dati per una valutazione accurata. Inoltre, i primi impieghi degli HPC furono per elementi interni agli edifici e quindi poco esposti agli agenti ambientali, di conseguenza per valutarne la longevità è necessario un cospicuo lasso di tempo.

Considerando che le prime applicazioni pratiche risalgono ai primi anni '90, confrontandoli con i calcestruzzi ordinari, si desume comunque 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, in quanto il calcestruzzo è un elemento poroso e basilico che contiene acqua che può congelare. È invece più complicato determinare come gli agenti aggressivi penetrino nella matrice. Negli HPC con un basso rapporto acqua/cemento, a causa del basso indice di vuoti che viene a crearsi, risulta difficile anche misurare la penetrazione di acqua.

Il "Rapid chloride-ion permeability test" ha l'obiettivo di valutare la penetrabilità dell'elemento dal cloruro. 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. Effettuando il test su un campione di calcestruzzo con basso rapporto a/c, si osserva che 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 fumo di silice e che presenta un rapporto a/c di 0.4-0.45. Dal test emerge inoltre che la

connessione tra i pori decresce drasticamente con la riduzione del rapporto a/c, rendendo più difficile rispetto ai calcestruzzi ordinari la migrazione di ioni aggressivi o di gas.

## 2.4 Componenti degli UHPFRC

Gli UHPFRC sono composti di acqua, cemento, inerti, aggiunte di minerali, fibre e additivi. La miscela si differenzia da quella tipicamente utilizzata per il calcestruzzo principalmente per l'impiego delle fibre in acciaio, per la selezione di inerti e per l'uso di additivi come, ad esempio, il superfluidificante. Quest'ultimo svolge due funzioni: aumenta la lavorabilità del composto andando a diminuire eventuali vuoti d'aria ed abbassa il rapporto acqua/calcestruzzo, che ha come conseguenza una porosità bassa.

- Cemento

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) ed il gel dei silicati di calcio idrato (C-S-H). Questi ultimi sono responsabili delle prestazioni meccaniche del composto ed 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 (<2 nm) è notevolmente minore di quella dei cristalli CH (circa 1000 nm); questa disomogeneità comporta la presenza di numerosi pori e vuoti interstiziali, che compromettono le proprietà meccaniche del materiale: è infatti nell'intorno dei vuoti che si concentra la distribuzione delle tensioni, causando microfessurazioni. Tale problema è funzione del rapporto a/c e si risolve rendendo omogenea la matrice cementizia adottando diversi accorgimenti: sostituire gli aggregati grossi in favore di altri di minori dimensioni e che presentano 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; adottando un basso rapporto a/c; utilizzando additivi superfluidificanti, i quali aumentano la lavorabilità del composto.

- Aggregati

A differenza dei calcestruzzi tradizionali, in cui in genere gli aggregati non arrivano quasi mai a rottura prima degli altri componenti, negli UHPFRC questi elementi sono la parte debole del composto; risulta quindi di fondamentale importanza analizzare le loro caratteristiche meccaniche in base alla tipologia di minerale per selezionare il più adatto all'impiego richiesto.

È stato recentemente dimostrato come varie tipologie di aggregato influenzino diversamente le caratteristiche meccaniche di un UHPC. 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. I valori più alti di resistenza si ottengono con il basalto; questo perché, analizzando una fessura nel materiale, si nota come questa attraversi indistintamente la pasta cementizia e gli aggregati. Nel caso invece dei calcestruzzi con calce ed arenaria, si può affermare che la loro resistenza sia pari a quella delle rocce, essendo queste ultime l'elemento in cui avviene la fessurazione. Utilizzando la quarzite si ottiene invece una resistenza del composto inferiore a quella della pasta cementizia e dell'aggregato: ciò accade poiché la superficie del minerale è levigata e non permette una completa adesione tra aggregato e pasta.

Un altro fattore che influenza la resistenza del composto è il rapporto tra gli aggregati e il cemento: si è osservato che la resistenza a compressione aumenta con un rapporto pari a 1:1.

Un altro accorgimento da mettere in atto per migliorare le proprietà meccaniche del composto, è quello di utilizzare più aggregati di differente diametro. 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 accade con il fumo di silice, ma senza lo sviluppo di reazioni chimiche con il cemento. In questo modo la densità della matrice aumenta, con un conseguente miglioramento delle prestazioni del materiale. 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.

- Fumo di silice

Il fumo di silice (abbreviato SF), anche 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  $\mu\text{m}$ ; per quanto riguarda la composizione chimica presentano un alto contenuto di silice amorfa con piccole quantità di acciaio e magnesio. La funzione del fumo di silice è legata a tre processi di tipo fisico-chimico che questo innesca all'interno del composto:

- 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.

Grazie a questi processi si ottiene un incremento delle prestazioni, in particolare di resistenza a compressione, a flessione, modulo di elasticità, tenacità e resistenza all'abrasione, ma anche una maggiore durabilità. È stato dimostrato inoltre che il contenuto ottimale di fumo di silice si aggira generalmente intorno al 20-30%; percentuali maggiori causerebbero una decrescita delle proprietà meccaniche. Nella giusta quantità il fumo di silice consuma durante le reazioni pozzolaniche tutta la quantità di CH presente all'interno della miscela; con percentuali più elevate tali polveri rimarrebbero invece inutilizzate, provocando una caduta nelle resistenze a compressione.

- Additivi

Gli additivi impiegati sono superfluidificanti. Vengono adoperati per la loro capacità di mantenere basso il rapporto a/c ed alta la lavorabilità del composto, senza comunque intaccare la composizione granulometrica della miscela. Aumentando la lavorabilità, si facilita

la messa in opera del calcestruzzo; la diminuzione di acqua nel composto comporta invece un miglioramento delle caratteristiche meccaniche e di durabilità del composto a parità di lavorabilità. Un altro vantaggio dell'utilizzo dei superfluidificanti è la 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. In una miscela molto diluita, si ha la formazione di accumuli di cemento separati dall'acqua; questo processo si chiama flocculazione ed è causato dall'attrazione elettrostatica tra i vari granuli le cui superfici sono 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, 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, oppure 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.

- Fibre

Le fibre maggiormente utilizzate sono quelle in acciaio, che vengono generalmente prodotte con taglio o tritatura di fili d'acciaio, lamiere e barre. Le dimensioni delle fibre possono variare 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>. La sezione può essere sia rettangolare che circolare e le estremità presentano normalmente una variazione di forma: possono essere schiacciate oppure piegate ad uncino per migliorarne l'adesione al calcestruzzo. L'acciaio usato per la loro realizzazione può essere acciaio dolce (a basso contenuto di carbonio), acciaio ad alto contenuto di carbonio o acciaio inossidabile.

In fase fessurativa, le fibre influenzano le proprietà meccaniche del materiale, migliorando la capacità di trasferimento dei carichi. Quando il materiale arriva a rottura, le fibre all'interno del composto impediscono la dislocazione della fessura, intervenendo con un meccanismo

che limita la propagazione della fessura e la fuoriuscita delle fibre; questo aspetto nel diagramma carico-spostamento può essere inteso come un allungamento del tratto plastico, conferendo capacità di duttilità più ampia alla struttura.

La presenza delle fibre contribuisce inoltre a conferire una maggiore tenacità del materiale; tale proprietà dipende dal rapporto di aspetto della fibra, dal dosaggio delle fibre nel composto e dalle caratteristiche fisico-meccaniche delle fibre scelte.

La capacità duttile del materiale aumenta assieme al fattore di forma, che è il rapporto tra la lunghezza ed il diametro delle fibre, ed al dosaggio volumetrico di fibre, ovvero la quantità di fibre presenti nel composto in  $\text{kg/m}^3$ .

Altri fattori che influenzano le proprietà del materiale sono la spaziatura delle fibre ed il numero di fibre per unità di area. Ciò significa che il comportamento degli UHPFRC dipende anche dalla distribuzione casuale delle fibre nel composto, per cui due provini con la stessa composizione e lo stesso dosaggio di fibre possono arrivare a rottura con dei valori di resistenza massima distanti tra loro, essendo le fibre inevitabilmente distribuite in maniera differente nei due provini.

## 2.5 Composizione dei provini

I materiali utilizzati per i provini analizzati sono i seguenti:

- Cemento: CEM I 52,5 R della ditta COLACEM S.p.A
- Aggregati: Sabbia silicea ESINCALCE s.r.l. di tipo medio con curva granulometrica che va da 0,1 a 1,1 mm.
- Additivi:
  - I. Additivo superfluidificante Pentaflow PC 6 della ditta PENTACHEM s.r.l.: migliora la lavorabilità dell'impasto e la sua messa in opera;
  - II. Additivo Antifoam PS 5, della ditta PENTACHEM s.r.l.: elimina efficacemente e rapidamente le bolle d'aria in fase di miscela e consente di ottenere superfici finali uniformi.

III. 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: colma i vuoti interstiziali andando ad addensare il 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.

A partire da questi materiali sono stati realizzate quattro tipologie di provini che differiscono soltanto per la quantità di fibre.

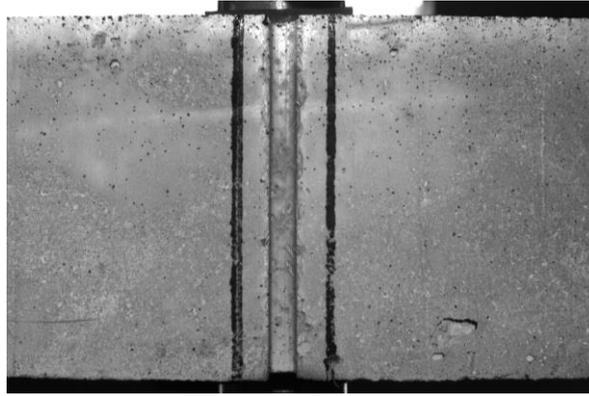
Miscele UHPFRC [Kg/m <sup>3</sup> ]						
Componenti		Getto1	Getto2	Getto3	Getto4	
Cemento 52,5 R		790	790	790	790	
Sabbia Essiccata (Esincalce)		600	600	600	600	
Pentaflow PC6 (superfluidificante)		10	10	10	10	
Antifoam PS5 (antibolle)		3	3	3	3	
CA 400		500	500	500	500	
Fumo di silice		160	160	160	160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

Tabella 1: tabella con la misura dei componenti utilizzati per le 4 miscele.

## 3. Test

### 3.1 Setup delle prove

Prima di effettuare la prova, sui provini sono state realizzate due linee con della vernice nera ai lati dell'intaglio, parallelamente ad esso. Questi verranno utilizzati in seguito come riferimenti per misurare l'apertura della cricca, che avviene per l'appunto in corrispondenza dell'intaglio; di conseguenza si osserveranno le due linee allontanarsi l'una dall'altra di una distanza che corrisponde all'apertura della cricca.



*Figura 5: esempio di come sono state realizzate le linee sui provini.*

I provini sono denominati sulla base della quantità di fibre presenti al loro interno: si avranno quindi UHPFRC50, UHPFRC100, UHPFRC150 e UHPFRC200. I tre provini di ciascuna miscela sottoposti alla prova sono poi stati indicati con la sigla corrispondente al materiale seguita dalle lettere A, B e C.

La prova prevede che il provino venga posto su due rulli laterali di appoggio, facendo attenzione al corretto centramento dello stesso. Successivamente il provino viene caricato dalla macchina tramite un rullo che applica il carico in mezzzeria; la prova si conclude quando la forza decresce considerevolmente dopo il picco massimo. Il setup di prova è composto da:

- macchinario Zwick/Roell Z050;
- Fotocamera in bianco e nero Pixelink per l'acquisizione delle immagini utilizzate per valutare l'apertura della cricca;
- 2 fotocamere in bianco e nero FLIR Blackfly S BFS-U3-88S6M-C con obiettivo Fujinon CF50ZA-1S, delle quali solo una è stata utilizzata per la valutazione dello spostamento dei provini tramite tecnica D.I.C.;
- Base con piastra in acciaio sulla quale sono saldati i due cilindri che saranno usati come appoggi;
- Faro per l'illuminazione del provino.

## 3.2 Digital Image Correlation (D.I.C.)

Per valutare lo spostamento dei provini durante la prova è stata utilizzata la tecnologia D.I.C. (Digital Image Correlation), un metodo di analisi e calcolo ottico che offre il vantaggio di non necessitare del contatto con la superficie da misurare.

Questa tecnica si basa sul tracciamento matematico di caratteristiche locali simili tra le immagini della superficie di un oggetto, acquisite prima e dopo l'applicazione di un carico; si perviene così con precisione a spostamenti e deformazioni a campo intero, bidimensionale (per valutare le deformazioni su un piano, utilizzando una fotocamera) e tridimensionale (per analizzare le deformazioni fuori dal piano, utilizzando due fotocamere).

Sul provino viene tracciato un pattern di punti con distribuzione casuale ad alto contrasto cromatico (speckles); l'esecuzione di tale operazione è estremamente semplice e non richiede nessuna attrezzatura specifica: sono necessarie una bomboletta di vernice acrilica nera ed eventualmente una bianca, per creare una base uniforme sul provino qualora la superficie del materiale non riesca a garantire un corretto contrasto.

La precisione della tecnica è funzione della distorsione delle lenti, che dipende dalla qualità delle fotocamere, dell'uniformità della distribuzione della luce e della qualità dello speckle pattern.

Le telecamere sono dotate di sensore bianco e nero, il cui segnale viene poi convertito in una 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.

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; ad ogni pixel dell'immagine viene associato uno di questi valori di luminosità "i". Questi ultimi possono variare tra 0 e 255, corrispondenti rispettivamente al nero e al bianco, i valori intermedi rappresentano le diverse tonalità di grigio. È proprio la distribuzione casuale del pattern che permette la definizione della funzione  $f(X;Y)=i$  su tutto il campo; se infatti la superficie avesse una colorazione

omogenea, sarebbe difficile individuare i diversi livelli di grigio ed associarli 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; attraverso la funzione  $f(X; Y) = i$ , si assocerà allora al punto  $P$  una certa intensità luminosa  $i$ .

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

Per la correlazione delle immagini, viene creata una griglia di punti sull'immagine tramite appositi programmi, come MATLAB. La correlazione è basata sulla definizione di funzioni che permettano la trasposizione dei nodi, ovvero i punti di intersezione della griglia, dall'immagine di riferimento all'immagine corrispondente ad una situazione deformata, ovvero permetta di rendere questi nodi sovrapponibili in termini di intensità luminosa  $i$ . Il programma individua la posizione dei nodi, li confronta con quella dell'immagine successiva e ne calcola lo spostamento tra un frame e l'altro.

### 3.3 Analisi di immagine

L'analisi delle immagini acquisite in laboratorio è avvenuta tramite il programma MATLAB, utilizzando lo strumento di Image Processing.

Per misurare l'apertura della cricca, si è sfruttata la distanza tra le due linee nere disegnate sui provini: analizzando le immagini che inquadrano la parte inferiore del provino si vede infatti come, man mano che la cricca si apre, le linee si allontanano.

Tramite un file chiamato "estensometro", contenente l'algoritmo necessario al calcolo dell'apertura, sono state elaborate le immagini acquisite in laboratorio. Come prima cosa è stata calcolata la distanza tra le due linee nere sul provino per ciascuna immagine; la procedura consiste nell'individuare due punti sulle linee, selezionando manualmente un punto sulla linea di destra ed uno sulla linea di sinistra. Il programma associa a ciascun pixel un valore di luminosità su una scala da 0 (nero) a 255 (bianco), si acquisiscono quindi tali valori di luminosità lungo una linea orizzontale che intercetta i punti selezionati in precedenza sulle due linee. È possibile quindi tracciare un grafico che descrive l'andamento dei valori della luminosità in funzione del numero di pixel lungo la linea orizzontale; ai punti

che si trovano sulle linee disegnate sul provino vengono associati i valori minimi di luminosità, prossimi allo zero.

Si è acquisita quindi per ciascuna immagine la distanza in pixel tra i due punti individuati ed è stata messa in relazione con il numero di immagini acquisite durante la prova; tale misurazione è stata ripetuta lungo tre linee che attraversano i provini ad altezze diverse al fine di individuare un valore medio, poiché la deformazione del provino può variare a seconda dei punti su cui viene effettuata la misura. La misura ottenuta finora è la distanza  $L$  tra le due linee nere, per ciascuna immagine. Ciò che ci interessa conoscere per determinare l'apertura della cricca è la differenza  $\delta$  tra  $L$  e la distanza  $L_0$  iniziale, prima che venisse applicato il carico.

$$\delta = L - L_0$$

In questo modo si è ottenuta una prima indicazione sull'apertura della cricca.

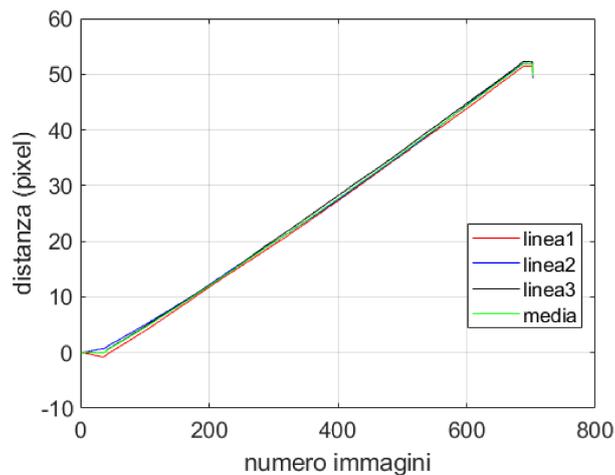


Figura 6: grafico dell'apertura della cricca calcolata lungo le tre linee e della rispettiva media per il provino 50

A.

Volendo conoscere la distanza in millimetri dell'apertura della cricca sarà sufficiente dividere la distanza in pixel per un opportuno fattore di scala. Quest'ultimo può essere ricavato andando a misurare, tramite la stessa procedura utilizzata per misurare la distanza tra le linee, l'altezza del provino in pixel; essendo infatti note le misure del provino in millimetri, tra cui la sua altezza  $d$ , il fattore di scala  $ps$  si calcola come rapporto tra la misura in pixel e quella in millimetri.

$$ps = \frac{d(pixel)}{d(mm)}$$

Essendo noto l'istante di tempo della prova corrispondente allo scatto di ciascuna immagine, è possibile a questo punto passare dalla distanza in funzione delle immagini alla distanza in funzione del tempo.

Figura 7: grafici  $\delta$ -tempo per i provini UHPFRC50.

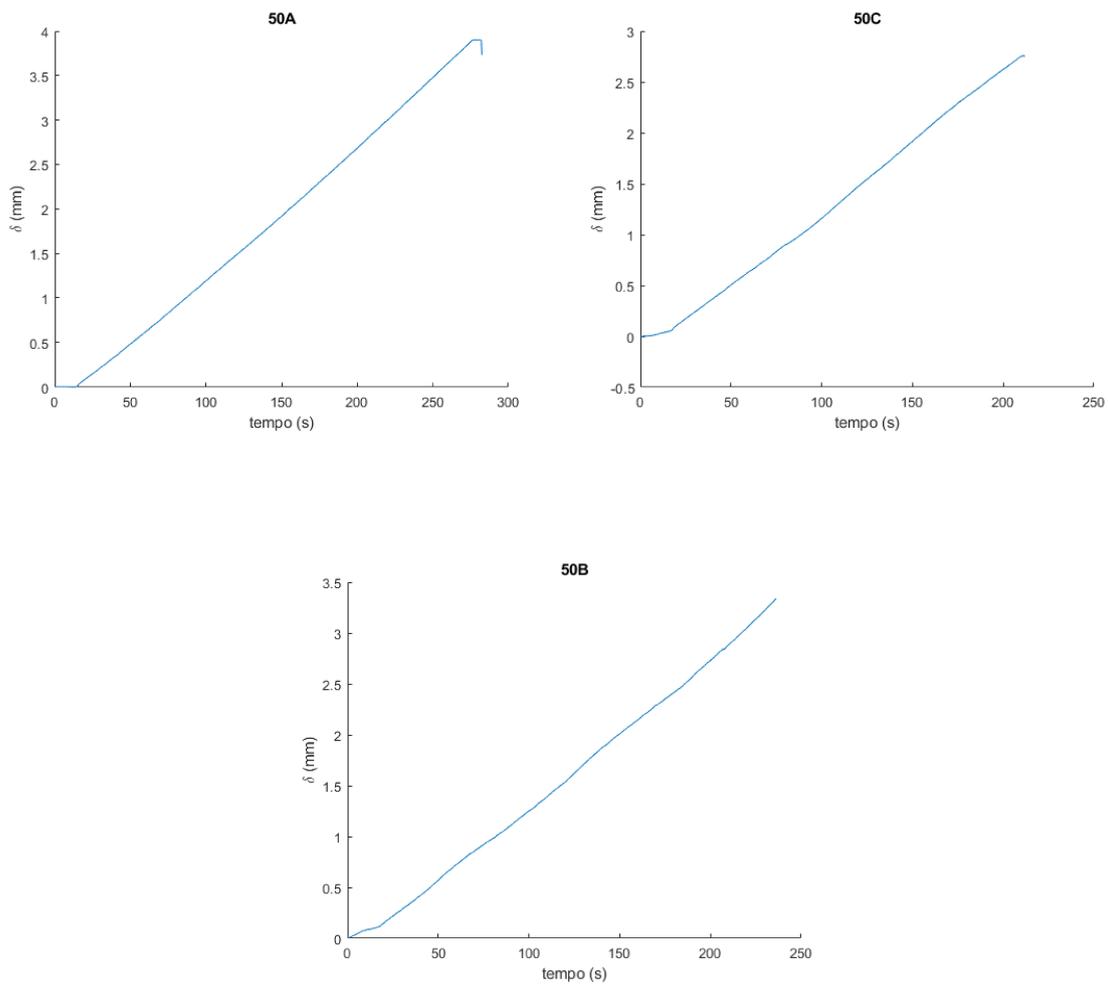


Figura 8: grafici  $\delta$ -tempo per i provini UHPFRC100.

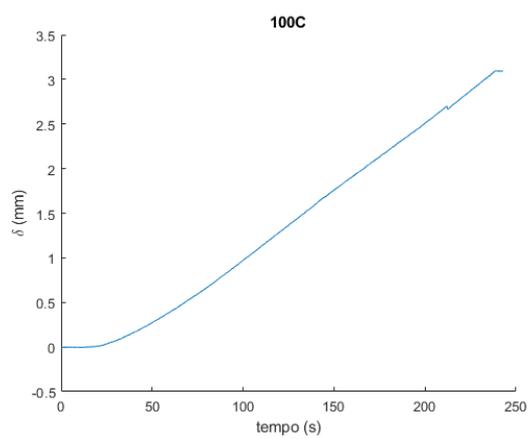
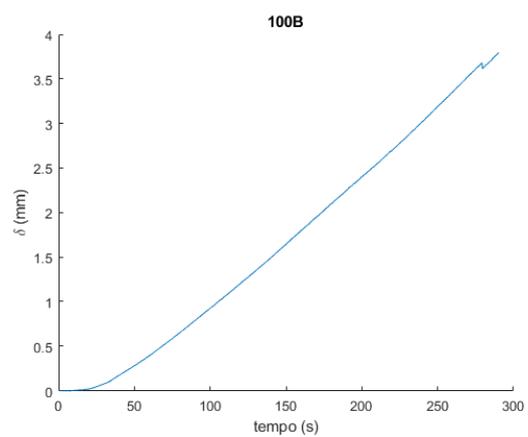
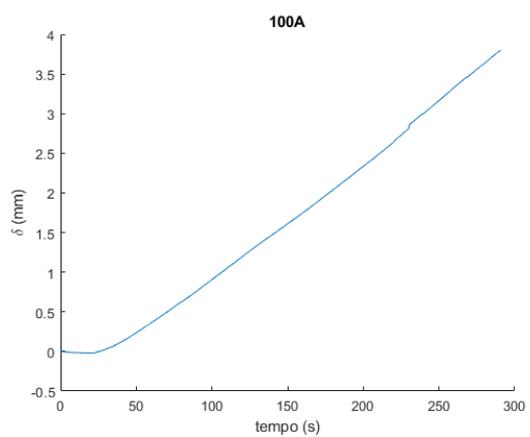


Figura 9: grafici  $\delta$ -tempo per i provini UHPFRC150.

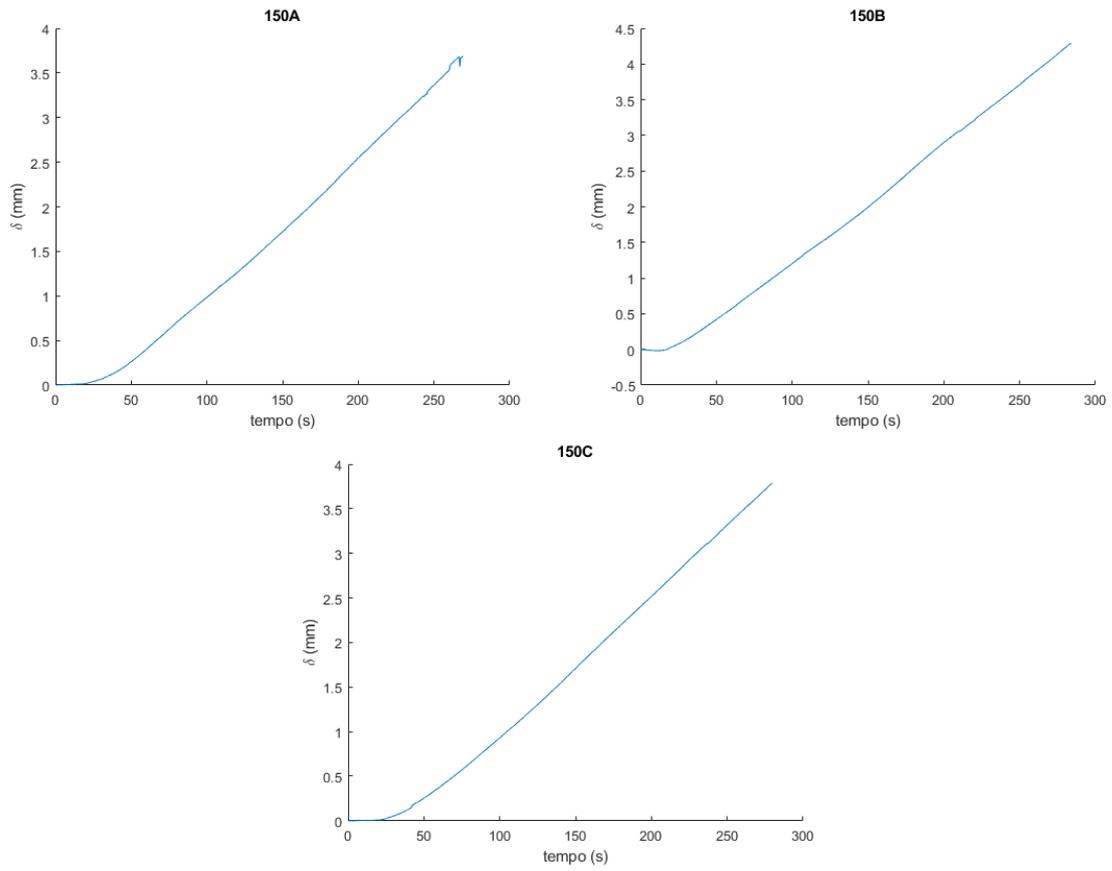
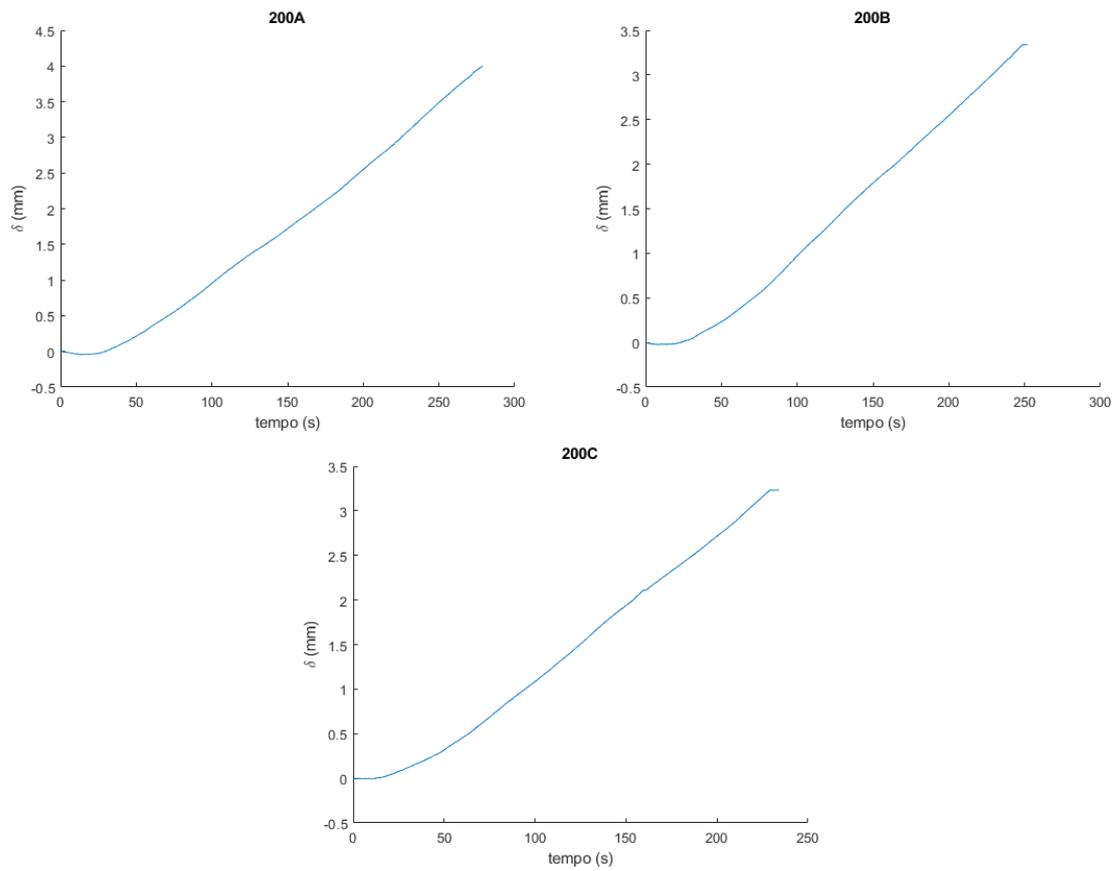


Figura 10: grafici  $\delta$ -tempo per i provini UHPFRC200.



### 3.4 Importazione dei dati della macchina

Si importano a questo punto i dati della macchina: sono noti in corrispondenza di diversi istanti di tempo i valori della forza applicata e dello spostamento della macchina. Passando quindi per la relazione che lega il tempo alla forza, è possibile ricavare dal grafico  $\delta$  - tempo il grafico che lega  $\delta$ , ossia l'apertura della cricca, alla forza applicata dalla macchina.

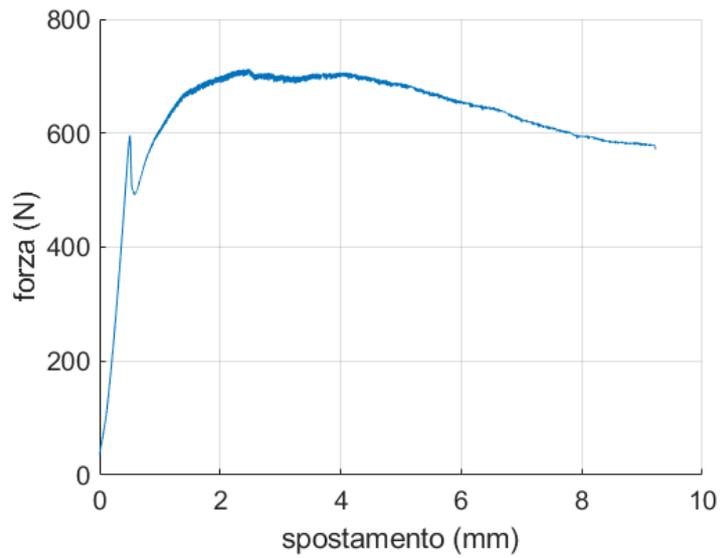


Figura 11: esempio di un grafico forza-spostamento della macchina.

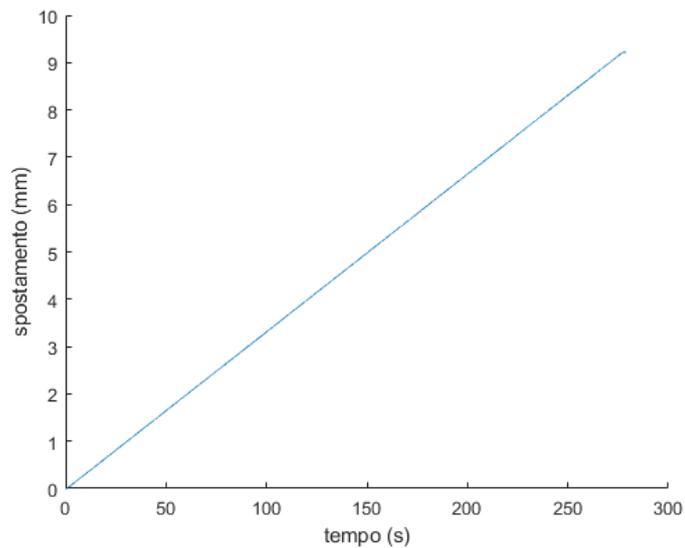


Figura 12: esempio di un grafico spostamento della macchina-tempo.

I risultati ottenuti per ognuna delle tre prove di ciascun materiale possono essere confrontati tra loro; inoltre possono essere messe a confronto le risposte alla sollecitazione esterna di ciascun materiale, rappresentando il comportamento di ognuno con una curva che sia intermedia tra quelle ottenute con le tre prove.

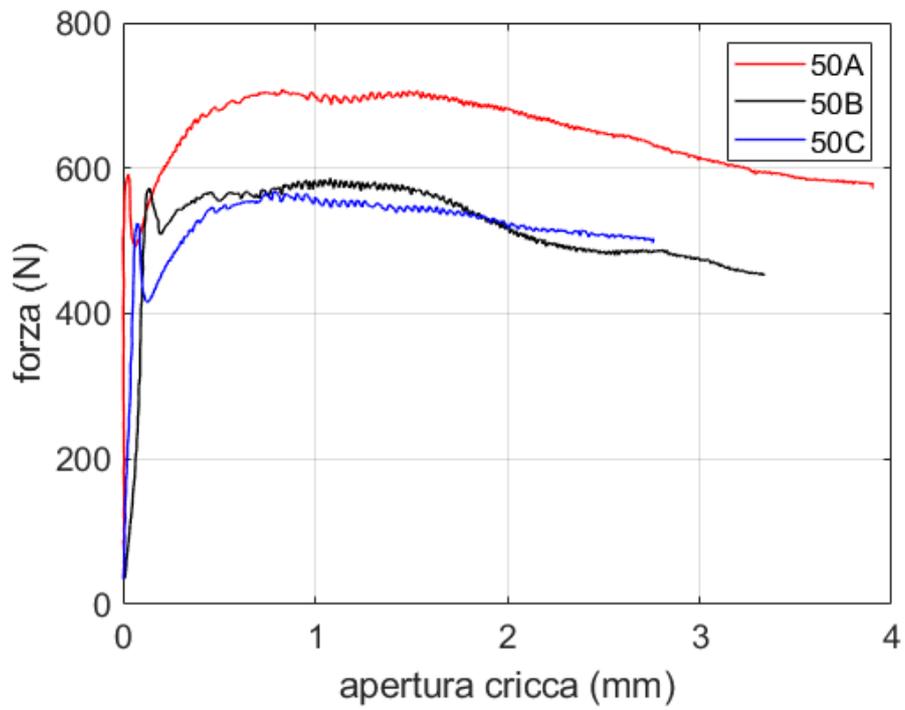


Figura 13.

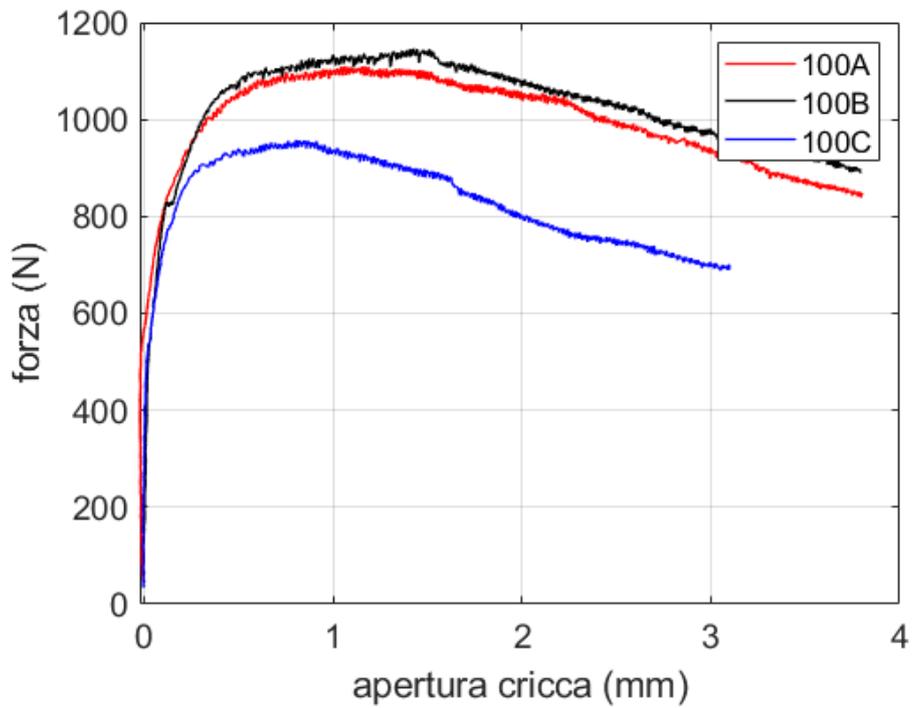


Figura 14.

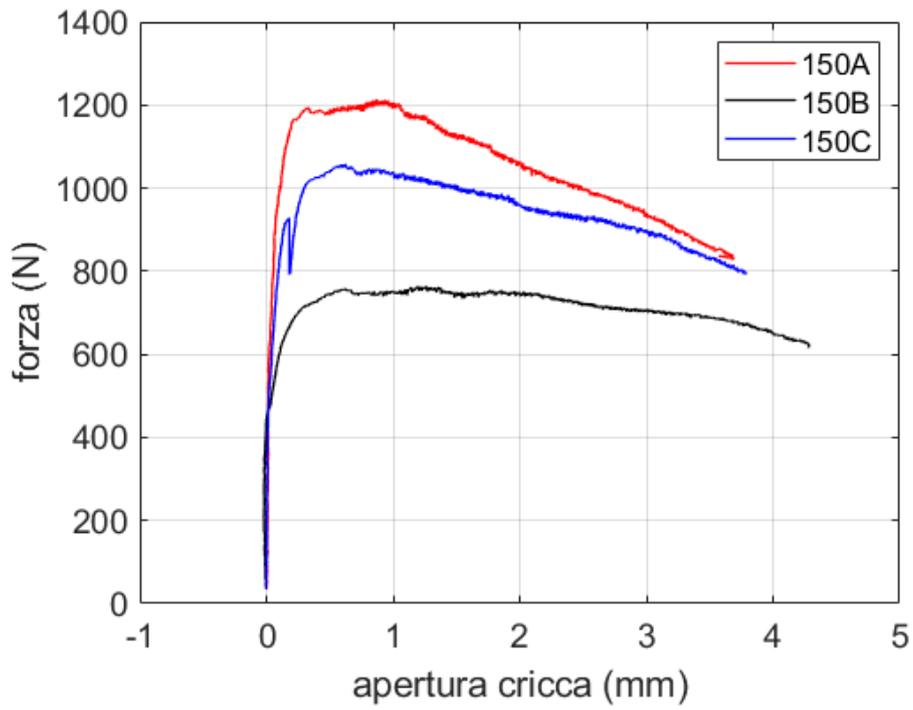


Figura 15.

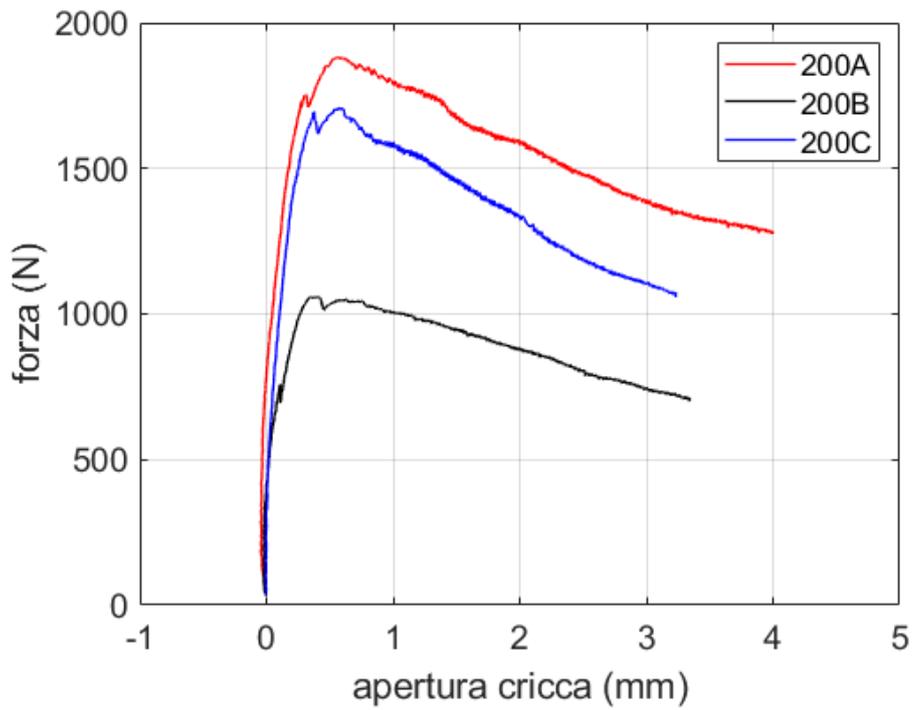


Figura 16.

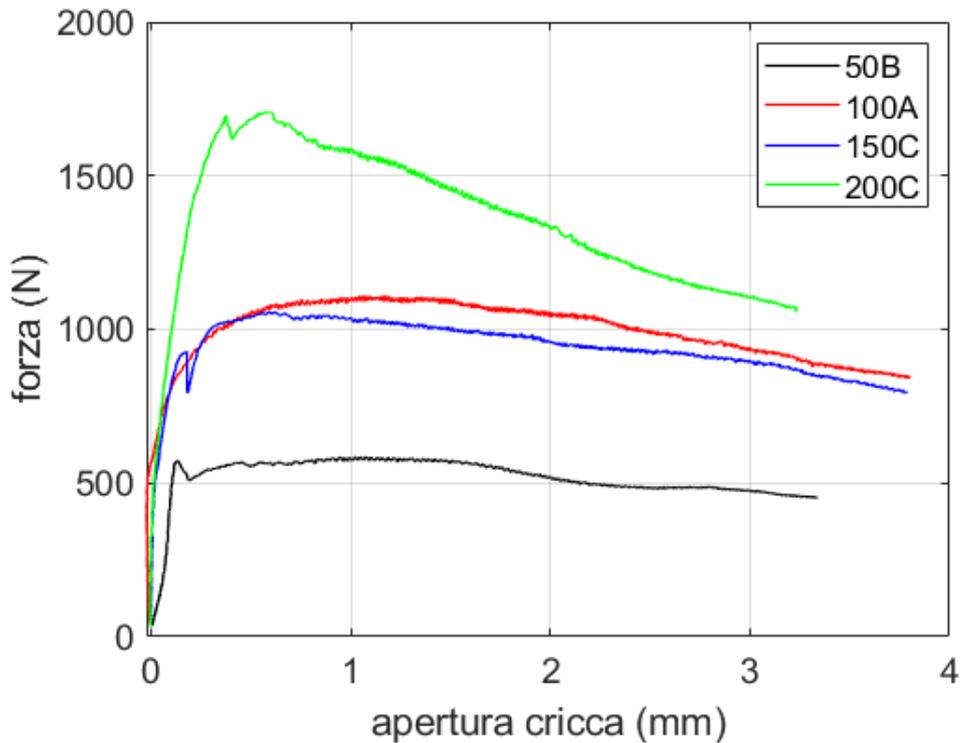


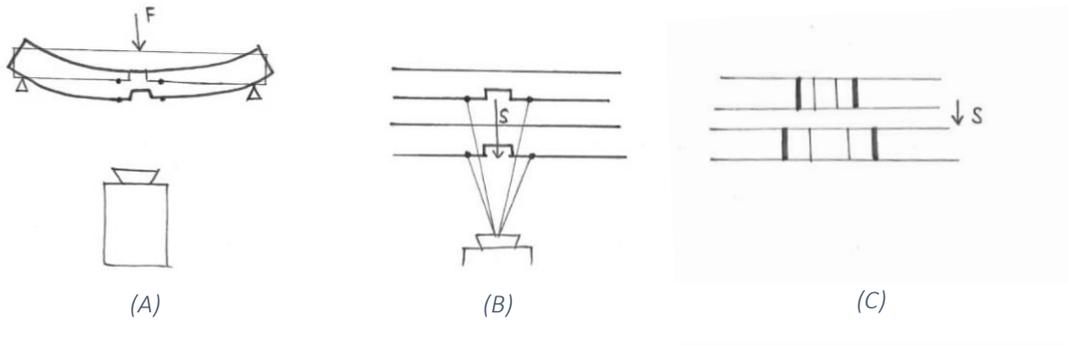
Figura 17.

### 3.5 Problema dell'errore dovuto allo spostamento

I risultati ottenuti finora sono soggetti ad un errore dovuto allo spostamento della parte centrale del provino verso il basso durante la prova, con il suo conseguente avvicinamento all'obiettivo della fotocamera, come mostrato nelle figure 8(A) e 8(B).

Man mano che la prova procede infatti, sulle immagini acquisite le due linee disegnate sul provino appaiono sempre più distanti, non solo a causa dell'apertura della cricca, ma anche per via dell'effetto ottico dovuto all'avvicinarsi del provino alla fotocamera. Di conseguenza il  $\delta$  misurato in precedenza sarà maggiore dell'effettiva apertura della cricca di una quantità pari ad un  $\delta$  dovuto allo spostamento del provino, come si può osservare nella figura 8(C).

Figura 18: illustrazione dell'effetto dello spostamento del provino.



Per effettuare una correzione, sarà allora necessario valutare innanzi tutto la progressiva distanza tra le due linee dovuta esclusivamente all'abbassamento del provino (o freccia). Per questo è stata effettuata una prova in laboratorio senza applicazione di forza, al solo fine di ottenere la relazione tra lo spostamento  $S$  e la distanza  $\delta$  tra le due linee che questo provoca. Una volta ricavato questo valore  $\delta$  "fittizio" in funzione della freccia, andrà valutata la freccia che ha subito ciascun provino durante le prove. A questo punto sarà possibile valutare l'apertura  $\delta$  provocata dallo spostamento per ciascuna prova, a seconda della freccia dei singoli provini, e sottrarre poi tale quantità ai valori di  $\delta$  ottenuti in precedenza per ciascuna prova, ottenendo così il risultato corretto.

### 3.6 Calcolo dei risultati corretti

Il primo passo per calcolare i risultati corretti dell'apertura della cricca consiste nel ripetere il procedimento descritto in precedenza di misurazione della distanza tra le due linee sul provino attraverso l'analisi di immagine, questa volta per la prova effettuata con valore della forza nullo, al fine di valutare il valore  $\delta$  dell'apertura dovuto esclusivamente allo spostamento del provino. Anche in questo caso la misurazione è stata effettuata lungo tre linee, ricavandone poi un valore medio, per ovviare ad eventuali errori dovuti alla fotocamera.

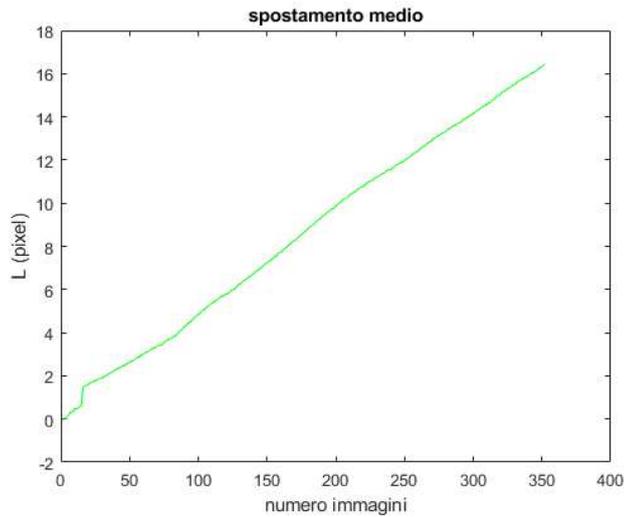
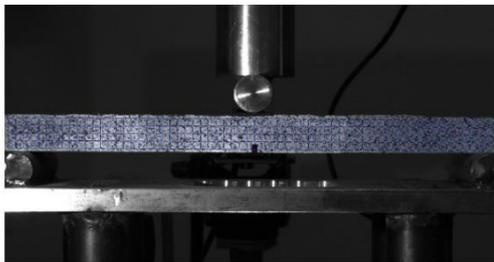


Figura 19.

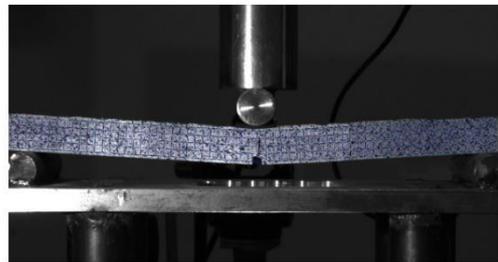
Come è stato fatto per le altre prove, la misura di  $L$  può essere ricavata facilmente in millimetri utilizzando una scala opportuna e può essere messa in relazione al tempo della prova. Importando poi i dati della macchina, si ottiene il valore dell'apertura  $\delta$  dovuta al solo spostamento, in funzione di esso.

Il passo successivo consiste nel calcolare per ognuna delle prove lo spostamento verso il basso (o freccia) subito dal provino, in funzione del tempo. A tal fine si utilizzano le immagini che riprendono il provino frontalmente, sulle quali è stata costruita in precedenza, sempre tramite MATLAB, una griglia che individua le coordinate dei vari punti del profilo.

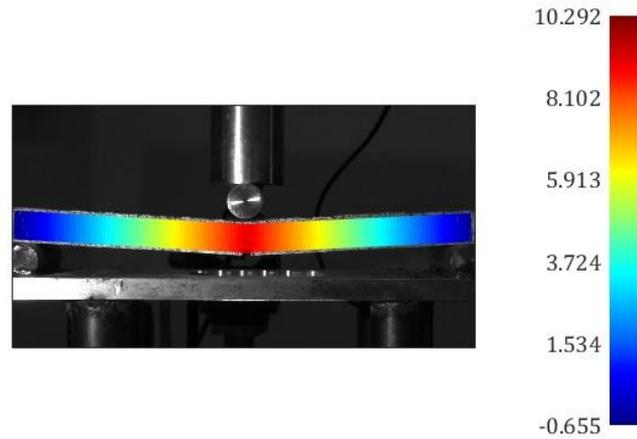
Figura 20: esempio del profilo di un provino non deformato (A) e deformato (B).



(A)



(B)



*Figura 21: esempio di una mappa cromatica che mostra lo spostamento del provino.*

Si calcola attraverso il programma lo spostamento del nodo della griglia che si trova in corrispondenza del centro dell'intaglio. Le coordinate calcolate dal programma sono in pixel, per cui anche in questo caso, noto lo spessore dei diversi provini, è necessario riportare la misura in millimetri tramite una scala adeguata.

Nei grafici di seguito sono riportati i valori dello spostamento verso il basso, indicato con  $S$ , e dell'apertura della cricca, indicata con  $\delta$ , in funzione del tempo.

Figura 22: valori di  $\delta$  e di  $S$  in funzione del tempo per i provini UHPFRC50.

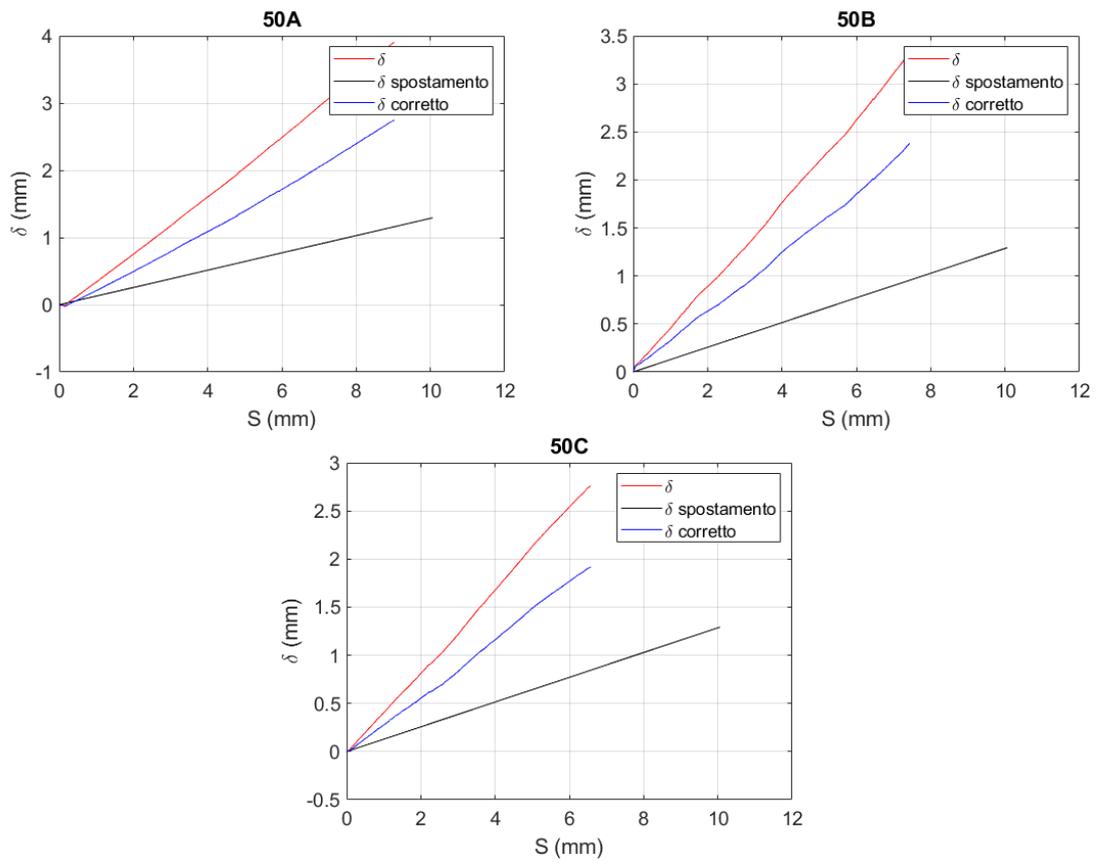


Figura 23: valori di  $\delta$  e di  $S$  in funzione del tempo per i provini UHPFRC100.

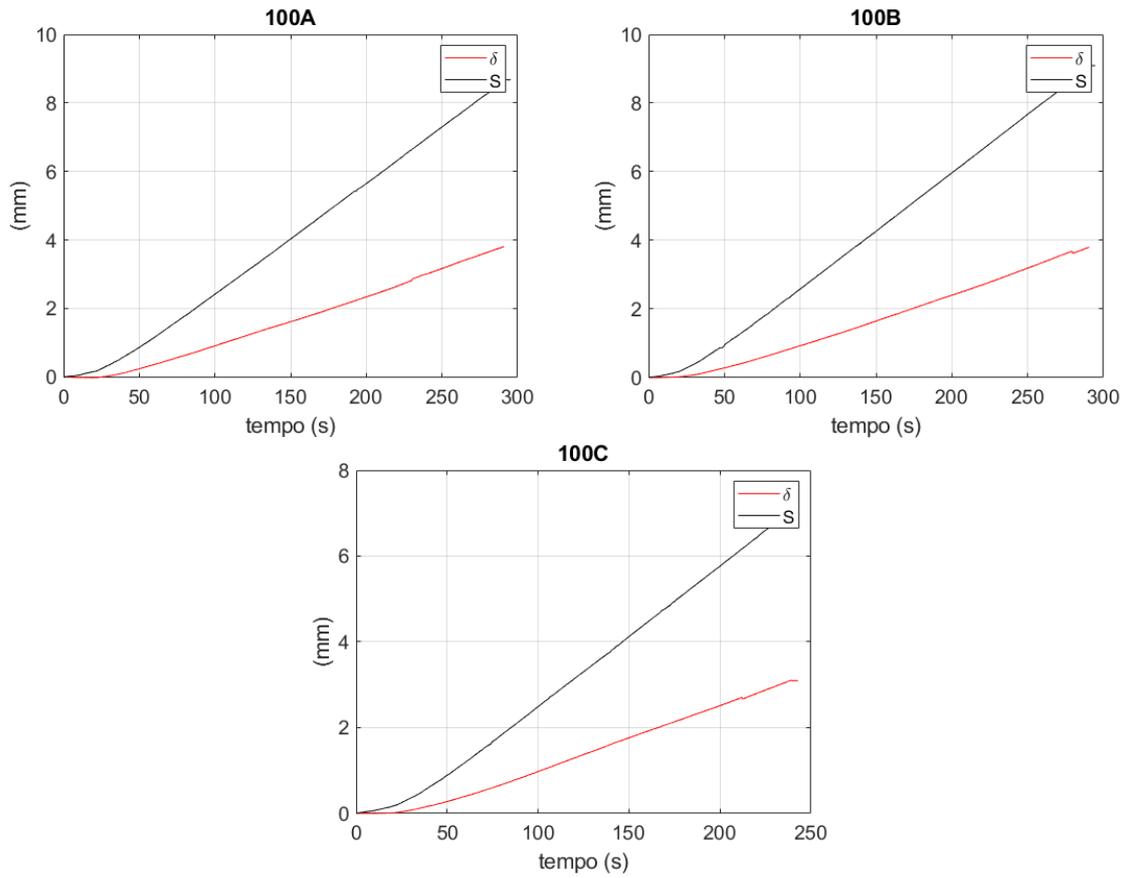


Figura 24: valori di  $\delta$  e di  $S$  in funzione del tempo per i provini UHPFRC150.

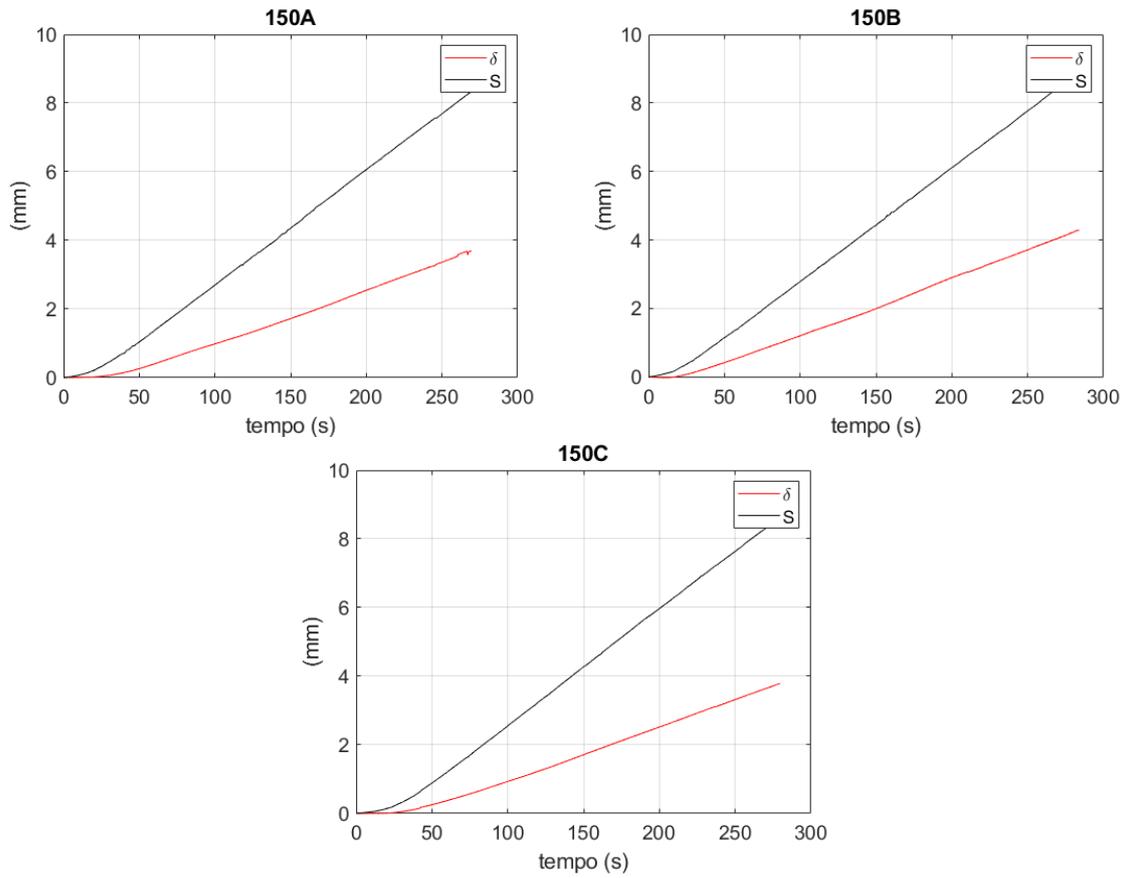
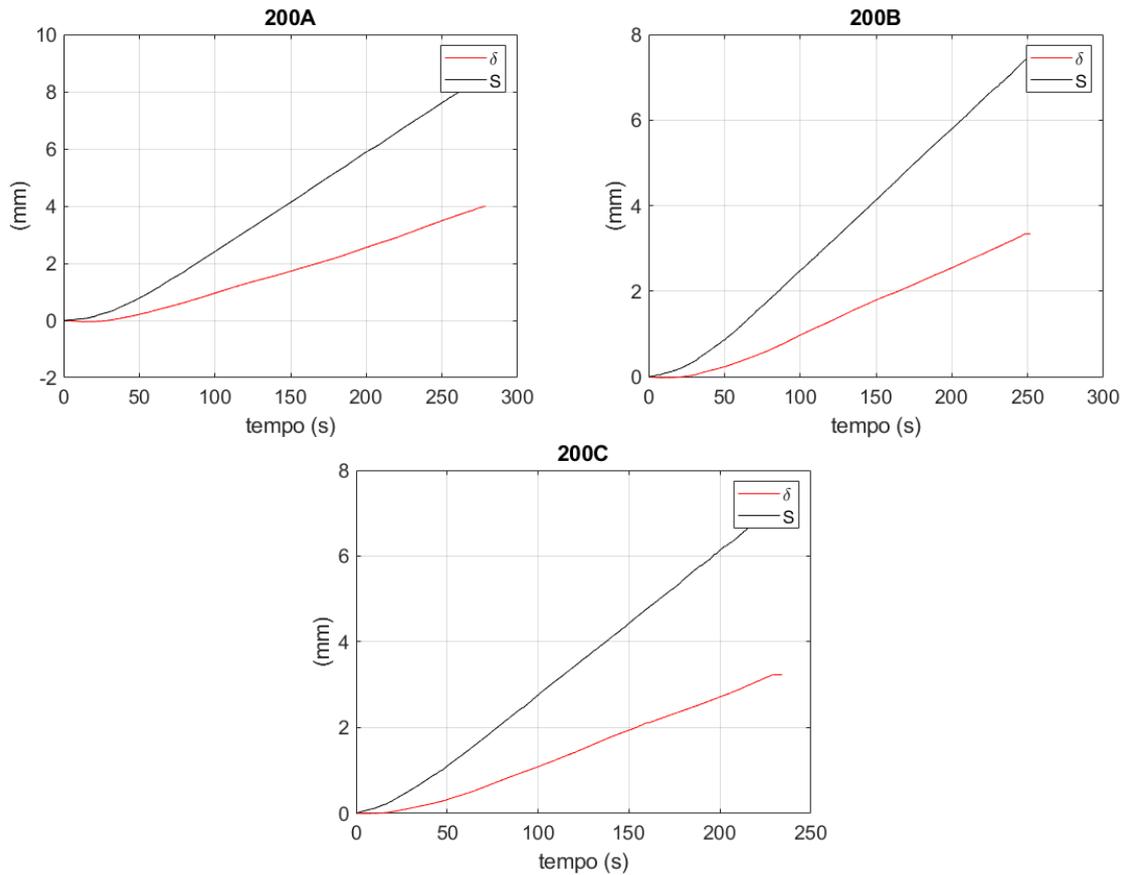


Figura 25: valori di  $\delta$  e di  $S$  in funzione del tempo per i provini UHPFRC200.



Si riportano ora i valori dell'apertura della cricca in relazione alla freccia. La curva rossa rappresenta l'apertura della cricca soggetta all'errore, mentre la curva blu indica il  $\delta$  "fittizio" misurato tra le linee del provino a causa del solo spostamento. La curva nera indica infine il risultato dell'apertura della cricca  $\delta$  corretto.

Figura 26: valori del  $\delta$  calcolato con l'errore,  $\delta$  dovuto allo spostamento e  $\delta$  corretto dei provini UHPFRC50.

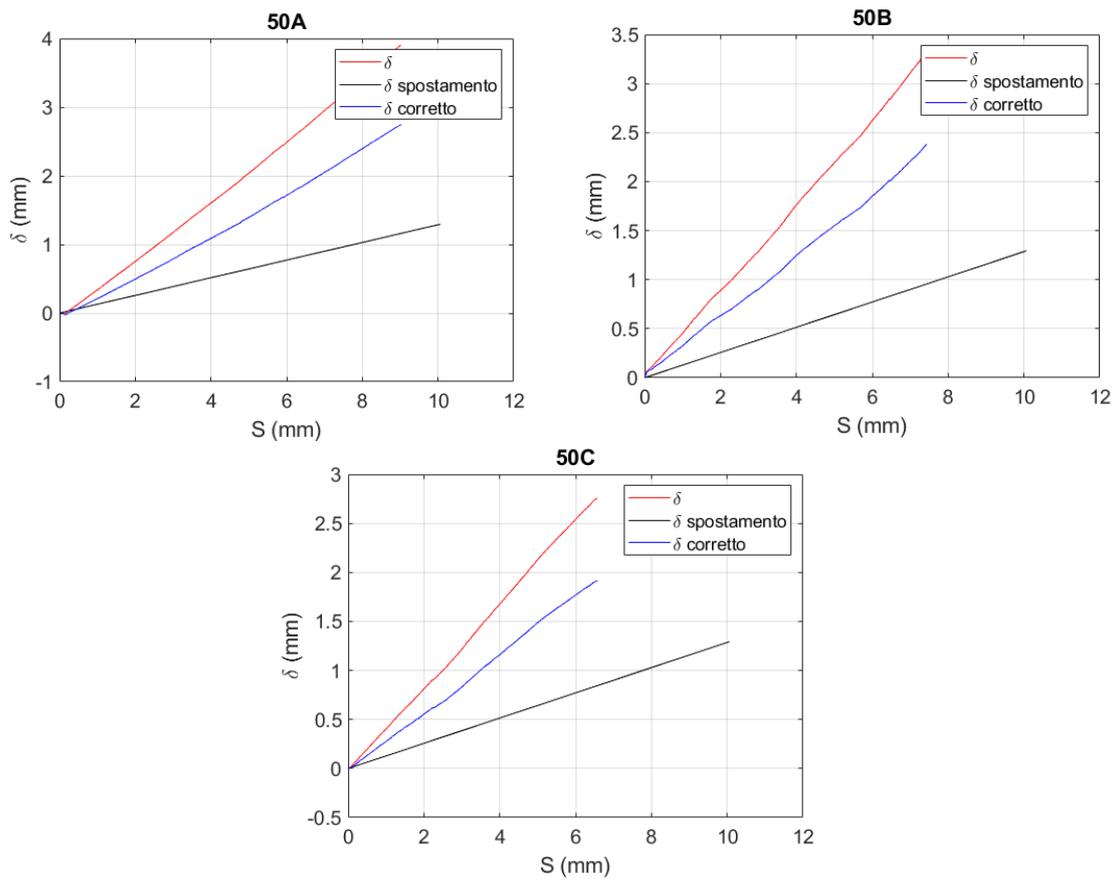


Figura 27: valori del  $\delta$  calcolato con l'errore,  $\delta$  dovuto allo spostamento e  $\delta$  corretto dei provini UHPFRC100.

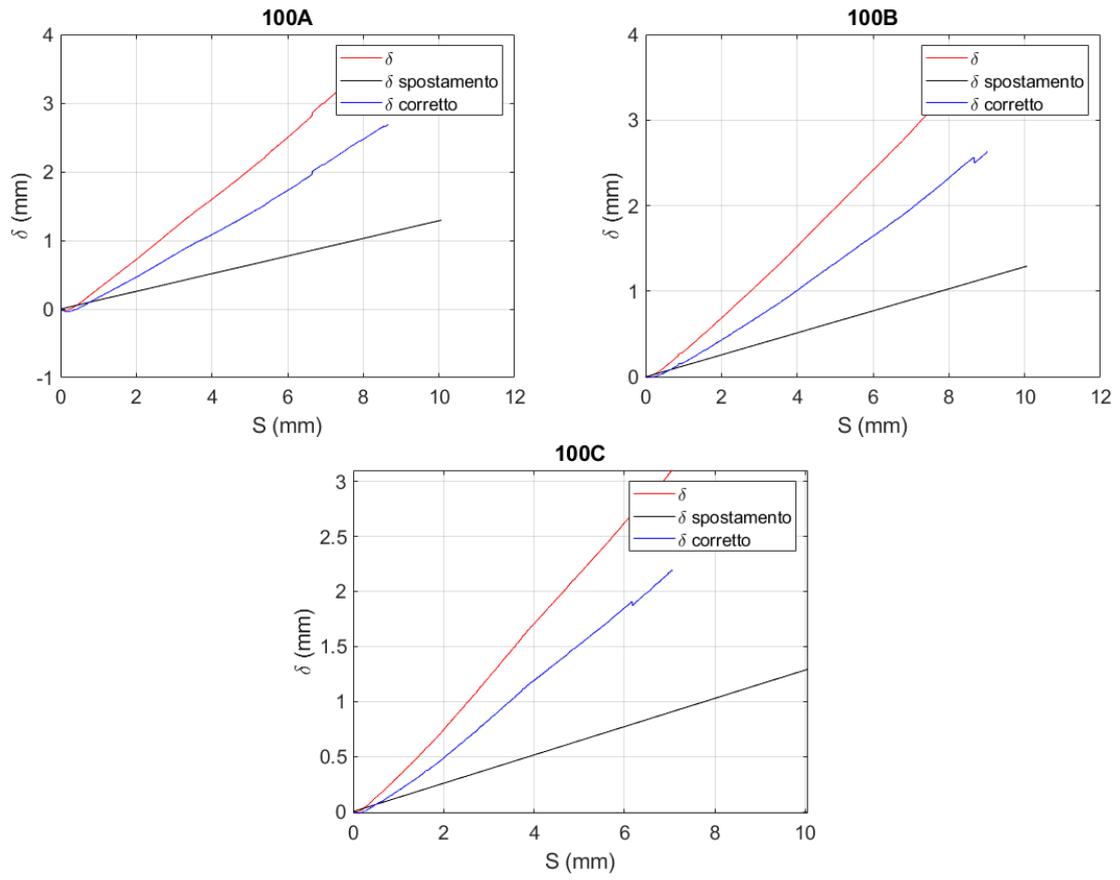


Figura 28: valori del  $\delta$  calcolato con l'errore,  $\delta$  dovuto allo spostamento e  $\delta$  corretto dei provini UHPFRC150.

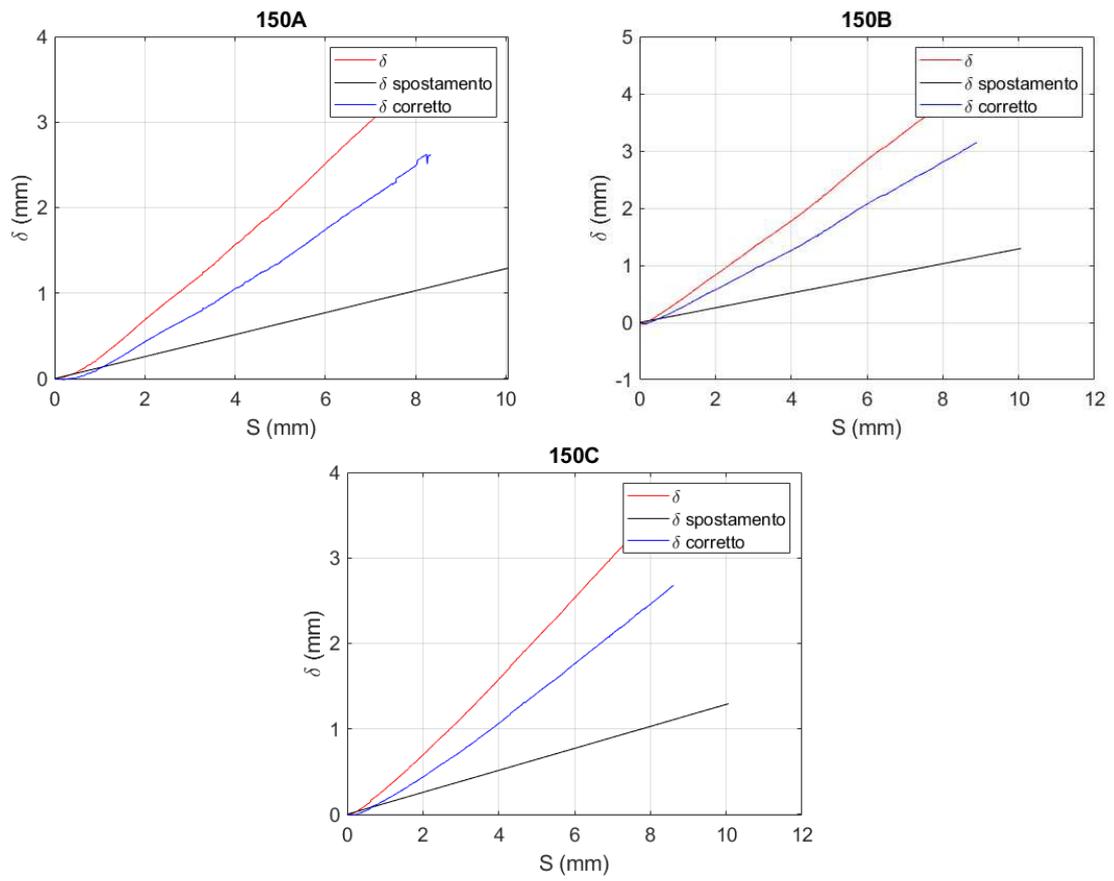
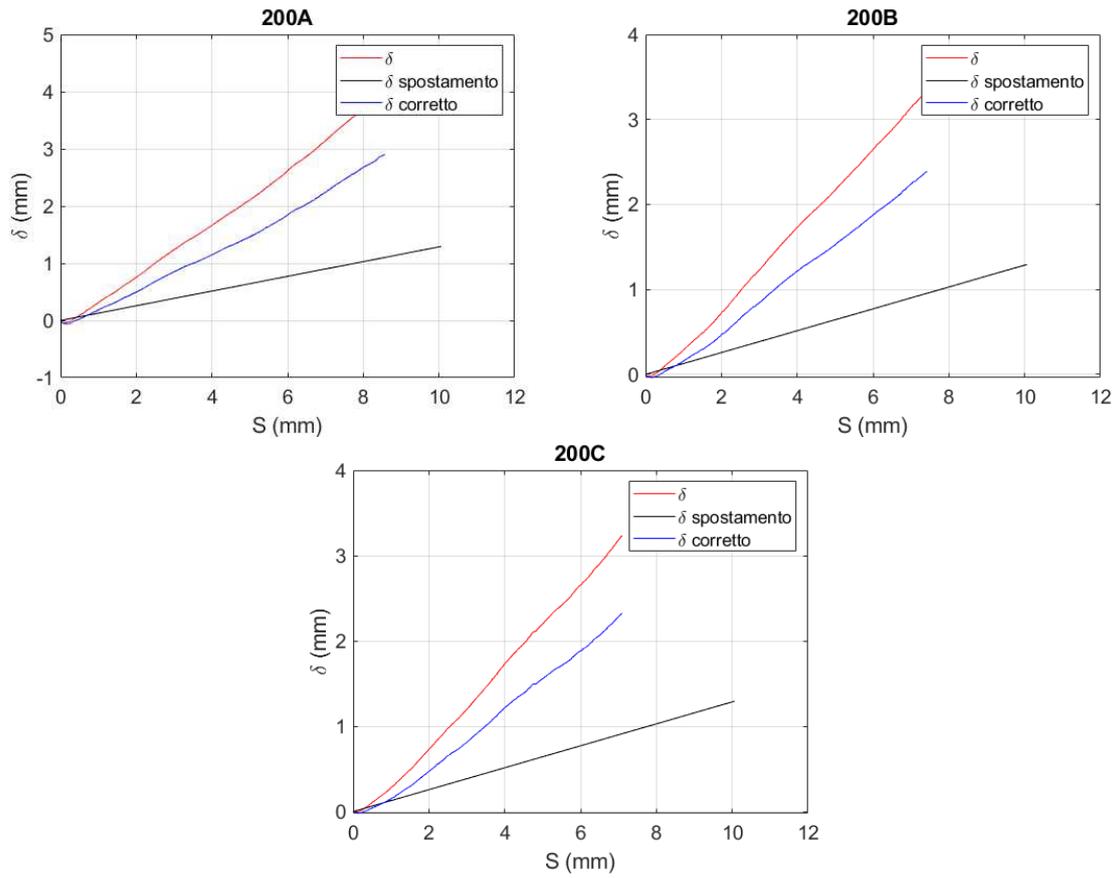


Figura 29: valori del  $\delta$  calcolato con l'errore,  $\delta$  dovuto allo spostamento e  $\delta$  corretto dei provini UHPFRC200.



A questo punto è possibile tracciare nuovamente i grafici forza-apertura della cricca, questa volta inserendo i valori corretti di  $\delta$ .

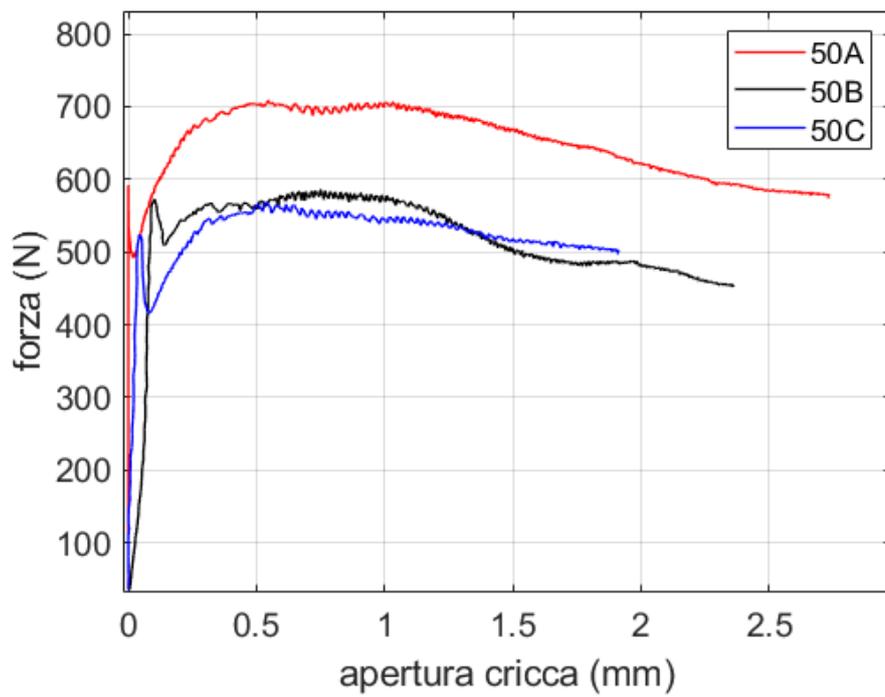


Figura 30.

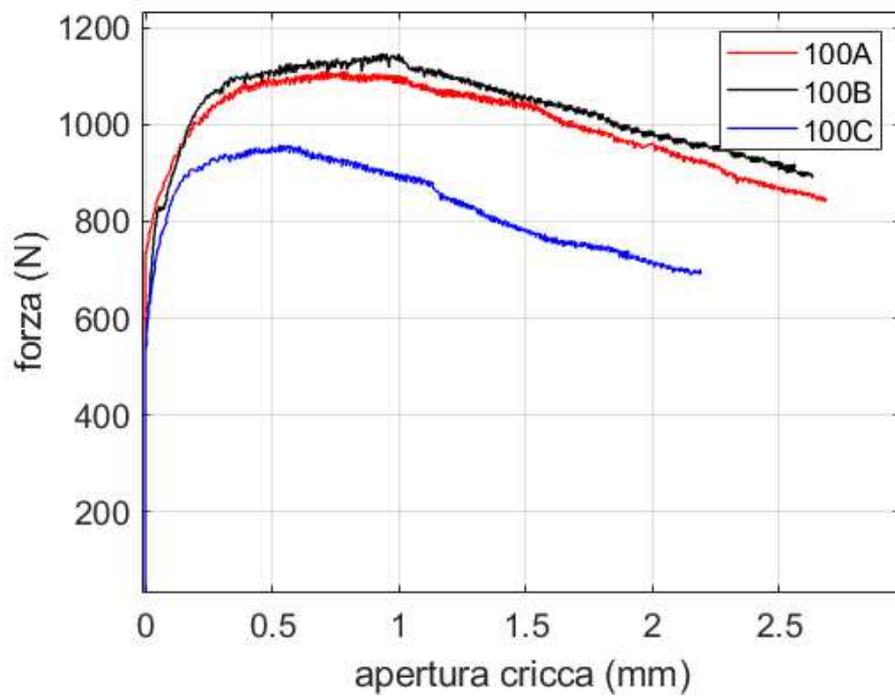


Figura 31.

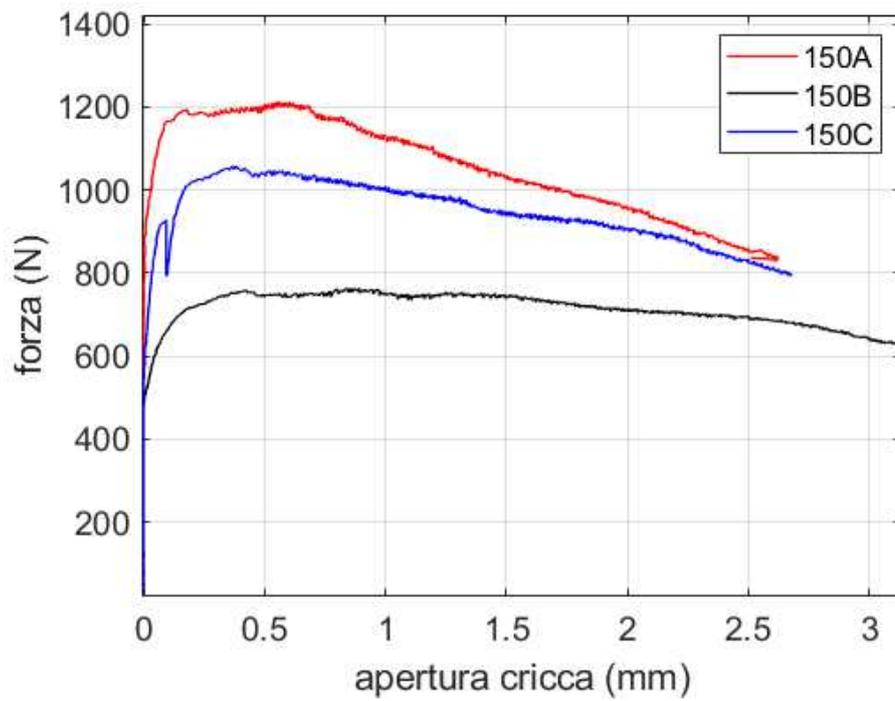


Figura 32.

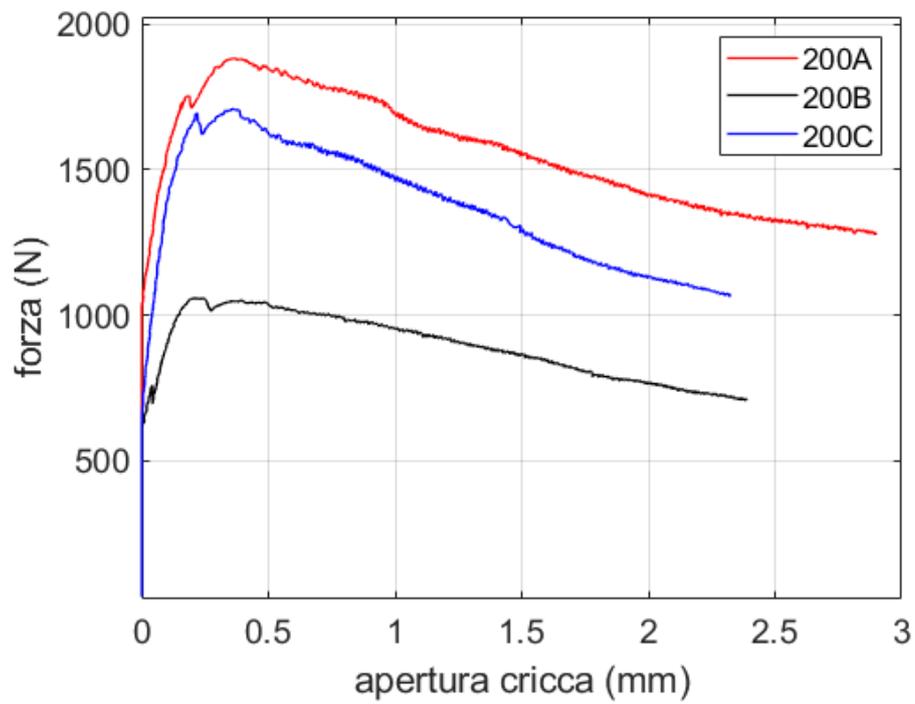


Figura 33.

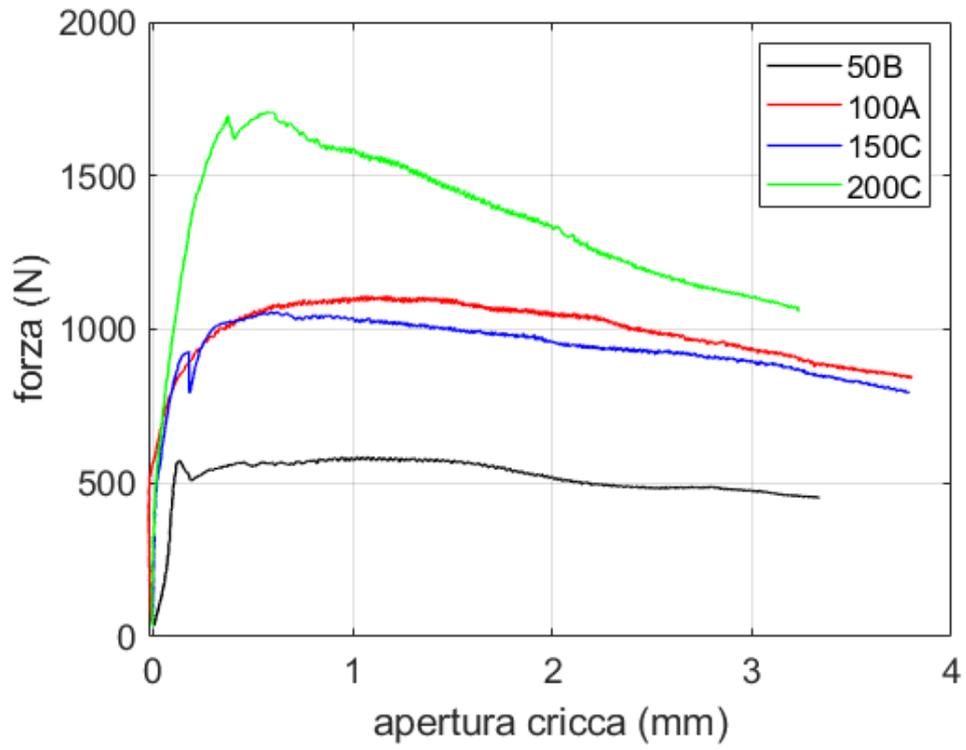


Figura 34.

## 4. Risultati

Le tabelle seguenti riportano i valori della forza in corrispondenza della rottura del provino e di forza massima, con i corrispondenti valori dell'apertura  $\delta$ . Sono riportati inoltre i valori massimi dell'apertura, raggiunti alla fine delle prove.

Provino	Carico a rottura (kN)	Carico massimo (kN)	Apertura in corrispondenza del carico a rottura (mm)	Apertura in corrispondenza del carico massimo (mm)	Aperura massima (mm)
UHPFRC_50A	0,59	0,71	0,0221	0,5434	3,9023
UHPFRC_50B	0,57	0,59	0,1349	0,7514	3,3379
UHPFRC_50C	0,52	0,57	0,0720	0,5393	2,7592
Media	0,56	0,62	0,0763	0,6114	3,3331
Deviazione standard	0,035	0,076	0,0566	0,1213	0,5716

Tabella 2: valori di forza e dell'apertura della cricca per i provini UHPFRC50.

Nei provini con dosaggio di fibre pari a  $50 \text{ kg/m}^3$  i valori di carico a rottura variano tra 520 e 590 N, con una media di 620 N. La dispersione dei valori attorno alla media è bassa, la deviazione standard del carico a rottura corrisponde infatti al 12% del valore medio.

Provino	Carico a rottura (kN)	Carico massimo (kN)	Apertura in corrispondenza del carico a rottura (mm)	Apertura in corrispondenza del carico massimo (mm)	Aperura massima (mm)
UHPFRC_100A	0,52	1,11	0,0000	0,7844	3,7962
UHPFRC_100B	0,50	1,15	0,0200	0,9392	3,7892
UHPFRC_100C	0,53	0,96	0,0207	0,5304	3,0962
Media	0,52	1,07	0,0136	0,7513	3,5606
Deviazione standard	0,02	0,10	0,0118	0,2064	0,4021

Tabella 3: valori di forza e dell'apertura della cricca per i provini UHPFRC100.

Nei provini con dosaggio di fibre di 100 kg/m<sup>3</sup> si osservano valori del carico a rottura simili a quelli dei provini con dosaggio 50 kg/m<sup>3</sup>, con una media di 520 N ed una dispersione attorno al valore medio del 9%. I valori massimi raggiunti dal carico sono invece considerevolmente maggiori: raddoppiando il dosaggio di fibre si è passati da una media di 620 N a 10700 N.

Provino	Carico a rottura (kN)	Carico massimo (kN)	Apertura in corrispondenza del carico a rottura (mm)	Apertura in corrispondenza del carico massimo (mm)	Aperura massima (mm)
UHPFRC_150A	0,62	1,21	0,0212	0,5568	3,6862
UHPFRC_150B	0,47	1,71	0,0221	0,8890	4,2803
UHPFRC_150C	0,41	1,06	0,0076	0,3843	3,7881
Media	0,50	1,33	0,0170	0,6100	3,9182
Deviazione standard	0,10	0,23	0,0081	0,2565	0,3177

Tabella 4: valori di forza e dell'apertura della cricca per i provini UHPFRC150.

Anche per i provini con dosaggio di fibre di 150 kg/m<sup>3</sup> i valori del carico a rottura rimangono nell'intorno dei valori nelle prove precedenti. I valori del carico massimo raggiunto sono maggiori rispetto a quelli dei provini con dosaggio 150 kg/m<sup>3</sup> e mediamente più del doppio rispetto ai provini con dosaggio 50 kg/m<sup>3</sup>, con una dispersione attorno al valore medio del 23%.

Provino	Carico a rottura (kN)	Carico massimo (kN)	Apertura in corrispondenza del carico a rottura (mm)	Apertura in corrispondenza del carico massimo (mm)	Aperura massima (mm)
UHPFRC_200A	0,42	1,88	0,00	0,3695	3,9892
UHPFRC_200B	0,38	1,06	0,00	0,2005	3,3385
UHPFRC_200C	0,32	1,71	0,00	0,3553	3,2316
Media	0,37	1,55	0,00	0,3084	3,5198
Deviazione standard	0,05	0,44	0,00	0,0937	0,4101

Tabella 5: valori di forza e dell'apertura della cricca per i provini UHPFRC200.

Nei provini con dosaggio di fibre di  $200 \text{ kg/m}^3$  i valori del carico a rottura risultano leggermente più bassi, tuttavia non si discostano molto da quelli osservati fin ora. Il carico massimo raggiunge valori sensibilmente più alti rispetto ai provini con dosaggi 100 e  $150 \text{ kg/m}^3$  e rispetto ai provini con dosaggio  $50 \text{ kg/m}^3$  si è ottenuto un aumento del valore medio del carico massimo del 250%. La dispersione dei valori di carico massimo attorno alla media è del 28%, percentuale maggiore rispetto alle situazioni precedenti.

Dalle considerazioni fatte, è possibile concludere che le fibre di acciaio non influiscono nel carico di prima fessurazione: essendo quest'ultimo simile per tutte le tipologie di provini, dipende soltanto dalla matrice cementizia, che è appunto la medesima per tutte le miscele. È evidente invece che aumentando il dosaggio delle fibre si raggiungono valori del carico massimo notevolmente maggiori, che possono leggermente variare tra campioni con lo stesso dosaggio in base alla distribuzione casuale di fibre al loro interno.

## Bibliografia

- *Donnini, J., Lancioni, G., Chiappini, G., & Corinaldesi, V. (2021). Uniaxial tensile behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete (uhpfrc): Experiments and modeling. Composite Structures.*
- *M. Collepardi, S. Collepardi, R. Troli, & L. Coppola. (2003). Innovative Concretes (SSC, HPC and RPC) in the Field of Architectural, Civil and Environmental Engineering.*
- *Richard G. Budynas, Keith J. Nisbett, Giovanni B. Broggiato, Gianluca Chiappini, Luca Cortese, Edoardo Mancini, Marco Rossi, Marco Sasso. (2020). Shingley. Progetto e costruzione di macchine*
- *Marco Campana, "Applicazione della Digital Image Correlation (DIC) per la caratterizzazione meccanica di diverse miscele di Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)". Tesi di laurea in ingegneria edile, Università Politecnica delle Marche. A-A 2021-2022.*
- *Valerio Sanseviero, "Analisi D.I.C. delle deformazioni in test di trazione e flessione su provini di cemento rinforzato con fibre". Tesi di laurea in Ingegneria meccanica, Università Politecnica delle Marche. A-A 2018-2019.*