



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

---

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Caratterizzazione di calcestruzzi fibrorinforzati ad elevate prestazioni con  
ridotto impatto ambientale

Characterization of high-performance fiber-reinforced concretes with  
reduced environmental impact

Relatore

Prof. Ing. Valeria Corinaldesi

Tesi di Laurea di:

Mirko Branchesi

Correlatore

Prof. Ing. Jacopo Donnini

A.A. 2022 / 2023



*Cercate di fare anche voi la vostra per questo nostro difficile paese.*  
Parte dell'ultimo messaggio di Piero Angela

*A chi non si arrende finché non lo decide lui  
a chi con le ossa rotte non pensa che a rifarsi  
a chi vuole sempre il meglio per se e per gli altri.*

# Sommario

<b>Introduzione .....</b>	<b>1</b>
<b>1 – Stato dell’arte ed inquadramento normativo .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 – Normativa sull’UHPC.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 – Normativa sull’incamiciatura con UHPC di pilastri in CA .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 – Stato dell’arte UHPC .....</b>	<b>7</b>
<b>2 – Materiali utilizzati .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 – UHPC LC<sup>3</sup> .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 – Fibre .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1 – Fibre in acciaio (SF) .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2 – Fibre in carbonio riciclate (rCF) .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 – Calcestruzzo pilastrini da rinforzare .....</b>	<b>22</b>
<b>3 – Fasi della sperimentazione .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 – Realizzazione miscele.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1.1 – Metodologie per la realizzazione delle miscele.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1.2 – Miscele utilizzate .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2 – Prove eseguite .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3 – Realizzazione cilindri da rinforzare.....</b>	<b>36</b>
<b>4 – Risultati e discussione.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 – Massa volumica .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2 – Lavorabilità .....</b>	<b>39</b>
<b>4.3 – Prova a flessione.....</b>	<b>40</b>
<b>4.3.1 – Risultati a prova flessione M-1.0 SF.....</b>	<b>41</b>
<b>4.3.2 – Risultati a prova flessione M-1.5 SF.....</b>	<b>43</b>
<b>4.3.3 – Risultati a prova flessione M-1.0 rCF .....</b>	<b>45</b>
<b>4.3.4 – Risultati prova a flessione M-1.0 SF 0.5 rCF.....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.5 – Analisi risultati della prova a flessione .....</b>	<b>49</b>
<b>4.4 – Prova a compressione .....</b>	<b>51</b>

4.4.1 – Risultati prova a compressione M-1.0 SF.....	52
4.4.2 – Risultati prova a compressione M-1.5 SF.....	53
4.4.3 – Risultati prova a compressione M-1.0 rCF .....	54
4.4.4 – Risultati prova a compressione M-1.0 SF 0.5 rCF.....	55
4.4.5 – Analisi risultati della prova a compressione .....	56
4.5 – Prova di trazione diretta .....	59
4.5.1 – Risultati prova a trazione diretta M-1.0 SF .....	60
4.5.2 – Risultati prova a trazione diretta M-1.5 SF .....	62
4.5.3 – Risultati prova a trazione diretta M-1.0 rCF .....	64
4.5.4 – Risultati prova a trazione diretta M-1.0 SF 0.5 rCF.....	67
4.5.5 – Analisi risultati della prova a trazione diretta .....	69
4.6 – Correlazioni sperimentali.....	71
5 – Conclusioni.....	74
6 – Sviluppi futuri .....	76
7 – Bibliografia e sitologia .....	77
7.1 – Bibliografia .....	77
7.2 – Sitografia .....	79

# Introduzione

Negli ultimi anni la ricerca ha prodotto calcestruzzi capaci di prestazioni meccaniche e di durabilità prima inimmaginabili. Essi sono comunemente chiamati Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) e rientrano nella categoria dei calcestruzzi fibrorinforzati a elevate prestazioni. Vengono realizzati attraverso uno studio molto attento dell'interfaccia tra i loro componenti e con materiali altamente prestanti. L'utilizzo poi di un quantitativo elevato di fibre, generalmente d'acciaio, contribuisce ad aumentare ancora di più le sue caratteristiche meccaniche, specialmente in campo post-elastico. Per questo, a differenza di un calcestruzzo ordinario, non ha più né un comportamento fragile né la necessità di essere rinforzato con un'armatura metallica.

Aspetto migliorabile degli UHPC è quello di essere un materiale altamente impattante per via dell'elevato quantitativo di cemento utilizzato, aspetto che lo rende incompatibile con le nuove richieste in materia di materiali con un basso impatto ambientale. Per questo si è utilizzato un particolare UHPC Limestone Calcined clay<sup>3</sup> (UHPC LC<sup>3</sup>) di nuova concezione avente parte del quantitativo di cemento sostituito con aggiunte pozzolaniche a minor impatto ambientale, costituite da calcare (Limestone), argilla calcinata (Calcined clay) e gesso.

Inoltre, si è deciso di valutare l'utilizzo di fibre di carbonio riciclate in sostituzione parziale e/o totale di quelle in acciaio, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale derivante dalla produzione di questo materiale. Ma anche per dare un nuovo ciclo di vita a queste fibre di carbonio che, sebbene giunte al termine del loro precedente utilizzo presentano ancora notevole resistenza a trazione.

La ricerca effettuata si basa sulla realizzazione di nuove miscele di UHPC LC<sup>3</sup> caratterizzate da un punto di vista meccanico e fisico (lavorabilità), realizzate utilizzando un UHPC a basso impatto ambientale e fibre di rinforzo in acciaio e carbonio riciclate. Si è poi iniziato a valutare la possibilità di utilizzare queste miscele come incamiciatura di pilastri in calcestruzzo. Per simulare il pilastro e per valutare al meglio l'effetto del confinamento in situazione reali si sono utilizzati dei cilindri in calcestruzzo con basse prestazioni meccaniche, in modo da rappresentare al meglio i calcestruzzi scadenti che spesso si trovano negli edifici esistenti.

Le tesi si articola nelle seguenti parti:

- Primo capitolo – STATO DELL'ARTE ED INQUADRAMENTO NORMATIVO  
In questo capitolo vengono discussi tutti i dettagli legislativi, tecnici e scientifici relativi alla sperimentazione in corso, funge quindi da inquadramento iniziale per facilitare la comprensione di quanto poi verrà fatto e discusso.
- Secondo capitolo – MATERIALI UTILIZZATI  
Avviene ora la discussione sui materiali utilizzati, specificandone le componenti con particolare attenzione alle fasi di realizzazione, scopi e normativa specifica.
- Terzo capitolo – FASI DELLA SPERIMENTAZIONE  
Vengono discusse ora le fasi della sperimentazione effettuata, descrivendo la realizzazione dei materiali oggetto della ricerca e delle prove che saranno effettuate

- Quarto capitolo – RISULTATI E DISCUSSIONE

In questo capitolo vengono discussi i risultati provenienti dalle prove effettuate nel corso della sperimentazione, con successiva discussione prova per prova di quanto si è ottenuto.

- Quinto capitolo – CONCLUSIONI

Dopo la discussione parziale dei risultati avvenuta nel capitolo precedente viene fatta ora una discussione completa su tutto quello che è stato fatto in questa ricerca. Verranno quindi discussi i punti di forza e di debolezza delle miscele testate, dando una spiegazione delle conclusioni a cui si è arrivati.

- Sesto capitolo – SVILUPPI FUTURI

Alla luce di quel che si è detto al punto precedente si suggeriscono delle possibili ricerche future in grado di ampliare gli sviluppi tecnici e scientifici delle miscele che si sono utilizzate.

# 1 – Stato dell’arte ed inquadramento normativo

## 1.1 – Normativa sull’UHPC

Sebbene l’UHPC sia un materiale abbastanza recente, abbiamo oggi a disposizione diverse normative e linee guida che ne facilitano l’utilizzo in ambito edilizio. Il primo testo normativo italiano a citare i calcestruzzi fibrorinforzati (FRC) è stato il DM 17/01/2018<sup>1</sup>, che li classifica come materiale da costruzione per utilizzi strutturali ed al capitolo 11.2.12 contiene le seguenti indicazioni in merito:

*“Il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) è caratterizzato dalla presenza di fibre discontinue nella matrice cementizia; tali fibre possono essere realizzate in acciaio o materiale polimerico, e devono essere marcate CE in accordo alle norme europee armonizzate, quali la UNI EN 14889-1 ed UNI EN 14889-2 per le fibre realizzate in acciaio o materiale polimerico.*

*La miscela del calcestruzzo fibrorinforzato deve essere sottoposta a valutazione preliminare secondo le indicazioni riportate nel precedente § 11.2.3 con determinazione dei valori di resistenza a trazione residua  $f_{R1k}$  per lo Stato limite di esercizio e  $f_{R3k}$  per lo Stato limite Ultimo determinati secondo UNI EN 14651:2007.*

*Per la qualificazione del calcestruzzo fibrorinforzato e la progettazione delle strutture in FRC si dovrà fare esclusivo riferimento a specifiche disposizioni emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.”*

Da notare che la descrizione dei calcestruzzi fibrorinforzati (FRC) è iniziata in letteratura già un decennio prima, con il Model Code 2010 della FIB<sup>2</sup>, sia per quanto riguarda la descrizione del materiale, che delle sue caratteristiche e prove per la caratterizzazione. La normativa italiana non ha fatto altro che prendere le indicazioni già contenute in queste fonti e farle proprie.

Le indicazioni del DM 17/01/2018 vengono poi riprese e ampliate dalla circolare 21/01/2019<sup>3</sup> del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, ossia dalla sua circolare applicativa. Che fissa il bisogno di avere un sistema di controllo della qualità anche per questo materiale e un contenuto minimo di fibre per cui:

*“A tale fine, si ritiene anche necessaria l’implementazione di un sistema permanente di controllo della produzione opportunamente calibrato, attraverso un processo industrializzato dotato di idonei impianti, nonché di strutture e tecniche opportunamente organizzate, al fine di assicurare il mantenimento di un adeguato livello di affidabilità nella produzione del calcestruzzo e nella conformità del prodotto finito.”*

[...]

*“Al riguardo occorre precisare che secondo le dizioni comunemente adottate nel settore della tecnologia delle costruzioni, un calcestruzzo fibrorinforzato ad uso strutturale, per essere definito tale, deve essere caratterizzato da un dosaggio minimo delle fibre al suo interno. Le norme CNR-DT 204/2006 “Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di strutture di*



*calcestruzzo fibrorinforzato”, indicano che “per impieghi strutturali deve essere garantito un dosaggio minimo di fibre” e quantificano tale dosaggio come “non inferiore allo 0.3% in volume”.*

*Pertanto, a meno di specifiche indicazioni eventualmente riportate nelle sopracitate Linee Guida, per quantitativi inferiori a tale dosaggio, allo stato un calcestruzzo che preveda l’utilizzo di fibre non può essere definito, ai fini strutturali, come “fibrorinforzato” e quindi il suo impiego, non vincolato dalle procedure autorizzative di cui al citato p.to 11.2.12, può fare riferimento alle prescrizioni per il calcestruzzo normale, contenute nei pertinenti Capitoli delle NTC.*

*Ne consegue, in termini pratici, che la presenza di un quantitativo di fibre al di sotto della soglia sopra indicata, può essere considerata nei normali calcestruzzi quale semplice ausilio per il miglioramento del comportamento del calcestruzzo in particolari situazioni, quali ad esempio le fasi di scassero, con lo scopo di tenere sotto controllo microfessurazioni e di minimizzare l’effetto di cavillature in punti sensibili del manufatto, quali spigoli e zone d’angolo, non facilmente raggiungibili dall’armatura ordinaria.”*

Da notare come il dosaggio minimo di fibre previsto nella circolare applicativa del DM 17/01/2018 sia pari a quello già previsto nella norma UNI 11039-1<sup>4</sup>. In questa normativa era fissato infatti il valore minimo di 25 kg/m<sup>3</sup> di fibre, equivalente allo 0.3% circa in volume.

In contemporanea con la circolare del Ministero dei trasporti appena detta è stata emanata dal Servizio tecnico centrale del Consiglio superiore dei lavori pubblici un’altra circolare denominata “Linea guida per l’identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica e il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)”<sup>5</sup>. In essa sono riprese le indicazioni già date con la circolare del 21/01/2019, ma vengono date anche indicazioni per i controlli di qualità e di accettazione in cantiere, e le indicazioni per la classificazione meccanica di un FRC. Hanno molta importanza poi nella linea guida le indicazioni riguardo le fibre che si possono usare, a riguardo viene detto:

*“Le fibre sono caratterizzate, oltre che dal tipo di materiale, da parametri geometrici quali la lunghezza, il diametro equivalente, il rapporto d’aspetto (rapporto tra la lunghezza in proiezione della fibra e il diametro equivalente) e la forma (rettilinee, uncinata, ondulate, ecc.).*

*Si evidenzia che, per la produzione delle fibre, devono essere utilizzati materiali e componenti qualificati secondo le procedure applicabili. In particolare, le fibre devono essere marcate CE, in accordo con le norme europee armonizzate EN 14889-1 (per le fibre realizzate in acciaio) e EN 14889-2 (per le fibre in materiale polimerico).*

*I parametri previsti dalla norma armonizzata EN 14889-2 sono riportati in Tabella 1. In aggiunta, la confezione delle fibre deve riportare anche il lotto di produzione.”*

Tabella 1: parametri da riportare sulla confezione delle fibre.

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>

(\*) I seguenti parametri non vengono determinati necessariamente sulla fibra, ma in accordo con le EN 14889.

Per la determinazione di questi parametri si veda il §3.4.2

(\*\*) Nella EN 14889.2 tale misura è indicata con tenacità.

Tabella 1 – Tabella estratta dalla Linea Guida sugli FRC del Servizio tecnico centrale riguardo i parametri per la caratterizzazione delle fibre

Sempre la Linea guida del Servizio tecnico centrale del Gennaio 2019 descrive il comportamento a trazione di un FRC, descrivendo l'interazione tra le fibre e la matrice cementizia che si è andati a rinforzare. Tale per cui:

*“L’aggiunta di fibre disperse in una matrice cementizia ne modifica le proprietà meccaniche, contrastando l’apertura progressiva delle fessure e conferendo al prodotto (calcestruzzo o malta), dopo la fessurazione, una significativa resistenza residua a trazione fino al raggiungimento di uno sforzo nullo a trazione per un valore significativo dell’apertura di fessura. L’energia specifica necessaria per rompere a trazione il conglomerato (di seguito denominata “tenacità”) o per giungere a valori di apertura di fessura predeterminati, dipende da molteplici fattori tra i quali, ad esempio, il rapporto d’aspetto della fibra, la percentuale di volume delle fibre rispetto al volume totale del composito e le caratteristiche fisico-meccaniche delle fibre in aggiunta alle caratteristiche della matrice cementizia.*

*In particolare, verificatasi la (micro)fessurazione della matrice, le fibre sono in grado di manifestare il proprio contributo, conferendo al composito una resistenza post-fessurativa, praticamente assente nella matrice senza fibre. In funzione della tipologia e quantità di fibre e delle proprietà della matrice, il legame carico-spostamento a trazione di un FRC può presentare un ramo discendente (comportamento degradante - Figura 1a), comunque caratterizzato da una resistenza residua e da una maggiore tenacità rispetto al calcestruzzo privo di fibre, o un ramo incrudente grazie alla comparsa di una multi-fessurazione (Figura 1b).”*

Riguardo le prove per la qualificazione di un FRC la normativa specifica di utilizzare la prova a flessione su tre punti in accordo con la prova armonizzata EN 14651<sup>6</sup>. Contiene inoltre indicazioni per la determinazione di altre caratteristiche, come la durabilità nei confronti dei cicli di gelo-disgelo, temperature elevate e altre condizioni d'interesse per un calcestruzzo.

Altra novità importante introdotta da questa linea guida è quella per cui si possono utilizzare in cantiere anche miscele premiscelate, fissandone anche i vincoli da rispettare a carico del fabbricante.

*“I calcestruzzi fibrorinforzati FRC devono essere preparati nello stabilimento del Fabbricante e forniti in cantiere come prodotto pronto per l’impiego oppure come prodotto secco premiscelato al quale va aggiunta l’acqua in cantiere.”*

## **1.2 – Normativa sull’incamiciatura con UHPC di pilastri in CA**

Una delle principali problematiche del costruito esistente riguarda la sua vulnerabilità nei confronti degli eventi sismici, non solo da parte di edifici di antica realizzazione, ma anche delle strutture realizzate in calcestruzzo armato di epoca moderna. Esse infatti se realizzate seguendo vecchie regole e prassi costruttive spesso hanno le travature più resistenti dei pilastri, con il risultato che quest’ultimi saranno i primi a danneggiarsi all’arrivo del sisma. Senza considerare poi l’evoluzione dei codici normativi nel tempo, che ha portato vecchie strutture a non essere più conformi ai moderni standard.

Una delle tecniche più utilizzate in questo caso è quella dell’incamiciatura del pilastro con un nuovo getto in calcestruzzo armato (CA). In modo da recuperare la continuità persa con l’innesco delle fessurazioni, fornendo una nuova armatura non danneggiata oltre che un efficace confinamento al calcestruzzo rimasto. La scoperta degli UHPC negli ultimi anni ha portato a nuove tecniche d’incamiciatura, che dalla loro hanno tutti i pregi delle precedenti ma con un minore aggravio in termini di carichi e spessori utilizzati.

Il DM 17/01/2018<sup>1</sup> quando parla d’interventi su strutture esistenti (cap 8.7) pone molta importanza riguardo la duttilità della struttura:

*“Nella progettazione di interventi sulle costruzioni esistenti, specie se soggette ad azioni sismiche, particolare attenzione sarà posta agli aspetti che riguardano la duttilità. Si dovranno quindi assumere le informazioni necessarie a valutare se i dettagli costruttivi, i materiali utilizzati e i meccanismi resistenti siano in grado di sostenere cicli di sollecitazione o deformazione anche in campo anelastico.”*

Nella circolare applicativa del DM 17/01/2018<sup>1</sup> (circolare 21/01/2019 del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti<sup>3</sup>) si hanno esempi delle tecniche che si possono utilizzare per gli interventi sulle strutture, con indicazioni utili per il loro progetto e la loro esecuzione. Da notare che le tecniche riportate sono indicative e non esaustive, non escludendo pertanto l’impiego di tecniche d’intervento non citate, metodologie innovative o soluzioni particolari che il progettista individui come adeguate al caso specifico. Non essendo presente come tecnica in esempio quella dell’incamiciatura in UHPC si fa riferimento alla tecnica più simile per materiali utilizzati, esecuzione ed effetti ottenuti, ossia l’incamiciatura in CA, per la quale si ha che la circolare riconosce la sua utilità per:

*“A pilastri o pareti possono essere applicate camicie di c.a. per conseguire tutti o alcuni dei seguenti obiettivi:*

- \_ Aumento della capacità portante verticale;*
- \_ Aumento della resistenza a flessione e/o taglio;*
- \_ Aumento della capacità in termini di deformazione.”*

Questi benefici vengono presi e ampliati dal Bollettino FIB-24<sup>7</sup>, per il quale un’incamiciatura in CA porterebbe all’aumento locale della resistenza, rigidità ed eventualmente anche della duttilità. Con la possibilità di correggere i difetti di strutture di tipo a trave forte e pilastro debole, spostando grazie all’aumento di resistenza e rigidità la domanda plastica verso le travi. Nel caso di strutture con piano sofficie invece l’incamiciatura in CA dei pilastri di quel piano, se opportunamente realizzata, porterebbe alla risoluzione del problema. In entrambi i casi si può notare come questa tecnica sia in grado di aumentare la duttilità della struttura e migliorarne il comportamento sismico con la correzione dei difetti che già aveva.

Trattandosi comunque di un’opera strutturale con il compito di reggere anche a sollecitazioni sismiche, oltre che statiche, il pilastro incamiciato con l’UHPC deve essere verificato come previsto nei capitoli 4 e 7 delle NTC2018<sup>1</sup>. Si dovrà procedere quindi con le verifiche di resistenza a compressione, pressoflessione e taglio, considerando anche l’azione del sisma. I dati d’input per questa verifica possono essere assunti secondo le indicazioni contenute nella linea guida del Consiglio superiore dei lavori pubblici del 2019<sup>5</sup>.

### **1.3 – Stato dell’arte UHPC**

Il calcestruzzo è un materiale utilizzato dall’uomo da moltissimo tempo, già 2000 anni fa i romani riuscirono a realizzare opere che ancora oggi destano ammirazione grazie a questo materiale. Il loro calcestruzzo è differente in termini di composizione e resistenza a quelli che oggi utilizziamo, infatti veniva realizzato sfruttando non il cemento portland ma la calce aerea. Questa una volta che veniva mischiata con degli inerti pozzolanici e dell’acqua reagiva prima producendo idrossido di calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e poi prodotti d’idratazione del tutto simili a quelli dei moderni clinker.

La possibilità di sfruttare la pozzolana e la sua reazione con il  $\text{Ca(OH)}_2$  non è svanita con la scoperta del cemento portland. Dato l’alto impatto di questo materiale in termini ambientali e di costi, oltre che in termini di calore d’idratazione, durabilità e di porosità, si è ricominciati a usare le aggiunte pozzolane nei cementi, ottenendo i cosiddetti cementi di miscela. Questo è stato possibile grazie alla reazione d’idratazione del cemento che produce anche il  $\text{Ca(OH)}_2$  e grazie alla grande disponibilità sul mercato di aggiunte pozzolaniche di scarto. Non provenienti da rocce estratte dalla cava ma da altre settori, come quello siderurgico o delle centrali termiche, che avevano necessità di smaltire questi sottoprodotti della loro attività<sup>8</sup>. L’aggiunta di queste sostanze, specialmente se di dimensioni estremamente ridotta si è dimostrata un grandissimo successo dato che donano al calcestruzzo una maggiore resistenza nei confronti delle reazioni aggressive e un migliore riempimento delle porosità al suo interno. Con un conseguente aumento della durabilità

e delle prestazioni ottenibile senza un aggravio in termini di costi, impatto ambientale e calore d'idratazione.

Altra grande innovazione nella storia del calcestruzzo è stata l'invenzione negli anni '70 del 1900 del superfluidificante, che ha permesso la riduzione del rapporto acqua/cemento senza andare a penalizzare la lavorabilità dell'impasto. Permettendo di realizzare con relativa facilità calcestruzzi che potessero avere resistenze sempre più elevate senza penalizzare la messa in opera del materiale.

Sempre a partire dagli anni '70 lo sviluppo di nuovi additivi e aggiunte minerali, accanto allo studio attento dei processi di stagionatura e del mix-design, hanno permesso di trasformare il calcestruzzo in un materiale "high-tech" in grado di esprimere prestazioni sempre più avanzate e diversificate. In tale periodo si assiste alla nascita dei cosiddetti calcestruzzi DSP (Densified with Small Particles). Il primo contributo originale allo sviluppo dei materiali DSP è dovuto a Baach, che nel 1981 ha pubblicato gli straordinari risultati che si possono conseguire con l'uso combinato di superfluidificanti e particelle ultra-fini come il fumo di silice. La notevole riduzione di acqua consentita dall'impiego dei superfluidificanti e il contemporaneo riempimento dei vuoti interstiziali fra i granuli di cemento a opera delle particelle di fumo di silice rendono la matrice cementizia così densa da consentirle di superare le prestazioni meccaniche dei comuni aggregati lapidei impiegati nei calcestruzzi ordinari.

L'aggiunta di fibre in acciaio alla miscela dei calcestruzzi DSP ha permesso lo sviluppo degli UHPC (anche detti UHPCFRC) come oggi li conosciamo oggi, materiali estremamente costosi ma anche estremamente duttili e resistenti, sia meccanicamente che ai fenomeni di degrado. Grazie a queste caratteristiche possono essere impiegati per applicazioni dove sia importante avere sezioni molto ridotte, come per applicazioni architettoniche di pregio o dove sia importante avere un peso ridotto<sup>9, 10</sup>. O anche dove sia necessario avere un comportamento post-fessurativo incrudente che garantisce una notevole tenacità a rottura e un ottimo comportamento a fatica. Senza considerare poi che applicazioni in questo materiale possono essere prodotte in laboratorio, a fronte di una garanzia di qualità, e successivamente assemblate in cantiere<sup>11</sup>.



*Immagine 1 – Esempio di utilizzo di una struttura prefabbricata autoportante in UHPC*

Il principale problema, oltre al costo, di questi materiali è il fatto che sviluppano un elevato calore d'idratazione e che hanno un impatto ambientale molto alto. Aspetti dovuti all'elevato quantitativo di clinker necessario per arrivare ad avere rapporti acqua/cemento molto bassi e di conseguenza resistenze molto elevate. Negli ultimi anni la ricerca è riuscita a trovare una soluzione a questa problematica andando a utilizzare la reazione pozzolanica. Infatti si sono sviluppati calcestruzzi UHPC detti LC<sup>3</sup> che hanno la metà del quantitativo di clinker sostituito da aggiunte pozzolaniche. Esse sono date da un nuovo materiale l'Argilla calcinata (Calcined Clay) già utilizzato per altre applicazioni e ampiamente disponibile in natura, che necessita di essere cotto a temperature molto più basse del clinker. Facendo in questo modo si riesce a produrre un minor quantitativo di CO<sub>2</sub> per via delle minori temperature di cottura, e si riesce a ridurre il calore d'idratazione utilizzando la reazione pozzolani in maniera più estensiva. Altre aggiunte minori che si utilizzano oltre all'argilla calcinata sono date dal calcare (Limestone) che viene utilizzato come filler, che in alcune situazioni riesce anche lui a reagire e a dare altri prodotti d'idratazione, e dal gesso (Gypsum) che viene utilizzato come regolatore di presa<sup>12,13</sup>.

## 2 – Materiali utilizzati

### 2.1 – UHPC LC<sup>3</sup>

L'oggetto di questa sperimentazione riguardava la caratterizzazione meccanica e fisica di miscele UHPC LC<sup>3</sup>, contenenti fibre in acciaio e di carbonio riciclate sviluppate a partire da una miscela dell'Università di Dresda. I componenti della miscela sono i seguenti:

Componente	Dose [g/lt]
Cemento CEM I 52.5 R-SR3/NA	599
Calcare (Limestone)	190
Argilla calcinata (Calcined Clay)	379
Gesso (Calcium Sulphate)	30
Sabbia di quarzo (Quartz sand)	536
Superfluidificante (Water reducer)	18
Additivo modificatore di viscosità (VMA)	0.3
Acqua (Water)	360

Tabella 2 – Componenti UHPC LC<sup>3</sup> secondo le indicazioni dell'Università di Dresda

La ricetta dell'UHPC contiene inoltre la procedura di mixing da utilizzare in modo da operare in maniera analoga ai ricercatori tedeschi, già da loro utilizzata per un quantitativo di tre litri di miscela. Questa procedura si articola su più fasi che vanno dal mixing delle polveri secche, per poi arrivare all'aggiunta di acqua e delle fibre, per una durata complessiva stimata di 14 minuti.

Dato che la ricerca effettuata riguardava una particolare ricetta di un UHPC realizzato dall'Università di Dresda tutti i materiali anche se disponibili commercialmente sono stati forniti da loro. Operando in questo modo si è evitato di effettuare errori grossolani derivanti dall'utilizzo di materiali differenti tra chi ha realizzato la ricetta e chi la sperimentazione.

Andando a parlare dei singoli materiali si può dire:

- **Cemento CEM I 52.5 R-SR3/NA:** la norma UNI EN 197-1<sup>14</sup> prevede oltre alla classificazione dei calcestruzzi per composizione anche quella in base alla resistenza meccanica che sono in grado di raggiungere e della velocità con cui lo fanno. Per la realizzazione di un UHPC si è scelto l'utilizzo del CEM I 52.5 R, capace di arrivare a una resistenza a compressione normalizzata di 52.5 N/mm<sup>2</sup>. La scelta di questo tipo di cemento è data sia dall'elevata resistenza che può arrivare a raggiungere, ma anche dal fatto che sia un cemento di solo clinker e gesso, con nessuna altra aggiunta non nota che possa influenzare la miscela. Sarebbe auspicabile l'utilizzo di un cemento a basso contenuto di celite (C<sub>3</sub>A), ossia di quel componente mineralogico del cemento che sviluppa maggior calore d'idratazione, al fine di contrastare questa problematica. Da notare il fatto che in un normale calcestruzzo la scelta del tipo di cemento dipende da una seria ampia di fattori, mentre nell'ambito degli UHPC la scelta è dettata prevalentemente dalla resistenza che il cemento è in grado di garantire.

Nel corso di questa sperimentazione il quantitativo di cemento è stato ridotto di un 50% rispetto a un normale UHPC, grazie all'utilizzo come legante anche dell'argilla calcinata (30%), calcare (15%) e gesso (5%). Il cemento in questa miscela ha il compito quindi non solo di dare resistenza meccanica, ma anche di fornire il  $\text{Ca(OH)}_2$  necessario ad avviare la reazione pozzolanica con le aggiunte appena dette.

- **Argilla calcinata (Calcined Clay):** come già detto nella descrizione generale del materiale viene utilizzata come aggiunta pozzolanica in sostituzione del 30% circa del clinker. Questa sostituzione porta ad avere un minor calore d'idratazione e un minore impatto ambientale, con penalizzazioni limitate della resistenza a compressione.

Parlando delle aggiunte pozzolaniche si può dire che secondo la professoressa Karen Scrivener molte di esse, come la cenere volante, non saranno più disponibili in futuro perché prodotte a partire dalla combustione di carbone. Senza considerare la loro già ridotta disponibilità e le emissioni di  $\text{CO}_2$  necessarie alla loro produzione. L'argilla calcinata invece si inserisce in questo contesto presentando i seguenti vantaggi:

Disponibilità: è presente in tutti i continenti mondiali in depositi facilmente sfruttabili, situati a profondità minori di 5.00 m. Sebbene sia un materiale già ampiamente utilizzato dalle industrie della ceramica, della carta e altre l'abbondanza di questo materiale non è stata intaccata affatto dall'utilizzo che già si faceva, rendendolo tuttora ampiamente disponibile. Inoltre il costo dell'argilla da calcinare a oggi si attesta a circa 30-50% di quello del cemento portland.
Impatto ambientale: per essere utilizzata come aggiunta pozzolanica deve essere calcinata tramite una cottura a una temperatura di 900°C, più bassa di quelle a 1'500°C necessarie per la produzione del clinker. Ne consegue che si può passare da una produzione di $\text{CO}_2$ di 900 kg/ton a una di 90 kg/ton se si utilizzano fornaci elettrificate. Da tenere in considerazione poi che la calcinazione è effettuata in fornaci a rotazione, ma che può avvenire anche in fornaci già utilizzate per la produzione di clinker.
Costi: la possibilità di cottura a temperature più basse rispetto a quella del clinker, e la sua sostituzione fino a un 30%, permette anche un abbassamento dei costi di produzione. Questo può essere reso anche maggiore considerando che per la sua produzione si possono utilizzare attrezzature già disponibili per la produzione di clinker, evitando di doverne predisporre altre <sup>12</sup> .
Colore: possibilità di controllarne il colore passando dal rosso naturale a qualsivoglia altro colore.
Durabilità: utilizzando l'argilla calcinata come materiale per la realizzazione di UHPC LC <sup>3</sup> , con una sostituzione del clinker fino al 30% si riesce a evitare l'innesco della reazione alcali-aggregato e dell'attacco di cloruri.

*Tabella 3 – Vantaggi dell'argilla calcinata secondo la professoressa Karen Scrivener*





*Immagine 2 – L'argilla calcinata utilizzata nel corso della sperimentazione*

- **Calcare (Limestone):** come già detto nella descrizione generale questo materiale viene utilizzato in questa miscela in sostituzione del 15% di clinker. Il suo utilizzo permette di avere un'aggiunta che oltre a riempire i vuoti della matrice cementizia per via della sua granulometria reagisce dando altri prodotti d'idratazione.

Anche esso è un materiale dalla grande disponibilità in natura e già ampiamente utilizzato, anche nell'industria del cemento. Il suo utilizzo è già contemplato nella UNI EN 197-1<sup>14</sup> per la realizzazione di cementi al calcare, appartenenti alla categoria dei cementi di miscela (CEM II). Il suo utilizzo nelle miscele cementizie è legato al fatto che se finemente macinato si comporta come filler della matrice cementizia, andando a diminuire la porosità e con essa aumentando le prestazioni del calcestruzzo. Il suo utilizzo in sostituzione del clinker in un cemento permette inoltre una riduzione dei costi, impatto ambientale e un aumento della durabilità. Per essere impiegato in questo scopo però deve rispettare vincoli riguardo la granulometria e il tenore di altre sostanze, come quelle organiche o argille.

Utilizzato in un UHPC LC<sup>3</sup> si è notato che reagisce con gli alluminati provenienti dall'argilla calcinata, fornendo ulteriori prodotti d'idratazione con ulteriore vantaggio in termini di prestazioni e durabilità. Inoltre permette di stabilizzare l'ettringite proveniente dall'utilizzo di gesso come regolatore di presa e dalla sua reazione con gli alluminati provenienti dall'idratazione del cemento<sup>15</sup>.

Il calcare utilizzato nel corso di questa sperimentazione è stato prodotto dalla SH Minerals e è commercializzato con il nome di "Saxodol". Da scheda tecnica le sue dimensioni sono comprese nell'intervallo 0-90  $\mu\text{m}$  con dimensioni medie di 20  $\mu\text{m}$ .



*Immagine 3 – Calcare utilizzato nel corso della sperimentazione*

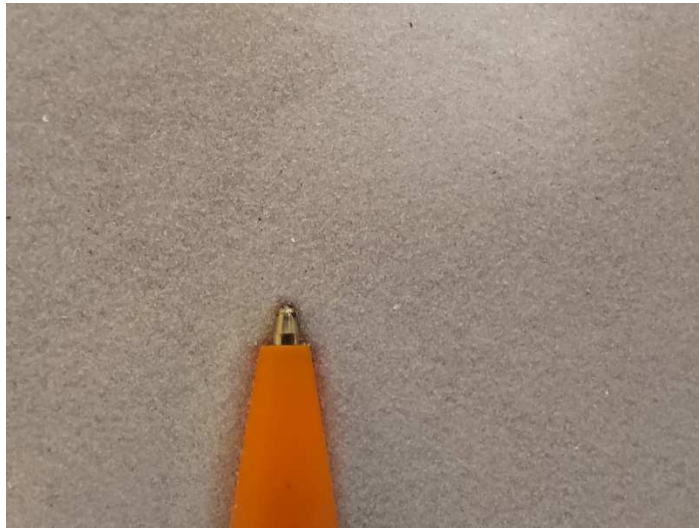
- **Sabbia di quarzo (Quartz sand):** in un UHPC a causa delle sue elevate prestazioni meccaniche si rischia che l'anello debole del getto non sia più la pasta cementizia ma l'aggregato. Occorre quindi utilizzare aggregati con caratteristiche granulometriche e meccaniche attentamente valutate.

È stato dimostrato<sup>16</sup> come varie tipologie di aggregato influenzino diversamente le caratteristiche meccaniche di un calcestruzzo ad altissime prestazioni. In particolare, confrontando più varietà di rocce (gabbro, basalto, quarzite, calcare, arenaria), si è visto che la resistenza a compressione del calcestruzzo cresce con il crescere di quella delle rocce e che gli aggregati con un alto valore di resistenza all'abrasione producono un calcestruzzo con alta resistenza all'abrasione. Sebbene i migliori risultati a compressione si possano raggiungere con aggregati in basalto, nel caso della presente ricerca si è deciso di utilizzare aggregati in calcare. La scelta è motivata dalla resistenza attesa dell'UHPC non alta abbastanza da giustificare l'utilizzo di inerti in basalto, eccessivamente più resistenti della pasta cementizia. Gli inerti in calcare sono abbastanza resistenti da poter sfruttare al pieno sia la loro resistenza che quella della pasta cementizia, dove avviene la rottura, senza avere riserve di resistenza non utilizzate.

Il comportamento degli UHPC è funzione anche di altri parametri connessi alla natura degli aggregati presenti nella miscela. L'utilizzo combinato di aggregati di taglia differente migliora notevolmente le prestazioni di un UHPC rispetto all'uso di un solo componente<sup>17</sup>.

Gli aggregati devono poi essere conformi, con relativa certificazione CE, alla UNI EN 12620 (2013)<sup>18</sup> e ai requisiti richiesti dalla UNI 8520-1 (2022)<sup>19</sup> e UNI 8520-2 (2022)<sup>20</sup>, unitamente alla UNI 8520-22 (2020)<sup>21</sup> per la verifica delle espansioni accelerate dei provini di calcestruzzo, dovute alla potenziale reattività tra gli alcali contenuti nel cemento e certe forme di silice reattive presenti negli aggregati.

Nel corso della sperimentazione si sono utilizzati aggregati preconfezionati certificati CE a base di quarzo con granulometria compresa all'interno del range 0.06-0.2 mm al fine di soddisfare tutte le caratteristiche richieste appena dette.

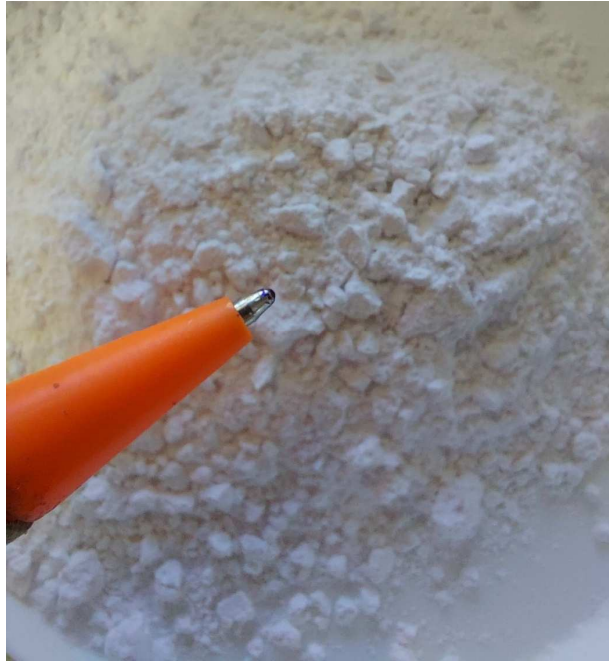


*Immagine 4 – Sabbia di quarzo utilizzata nel corso di questa sperimentazione*

- **Gesso (Calcium Sulphate):** utilizzato come detto nella descrizione generale in sostituzione del 5% del clinker originale, il suo utilizzo è legato all'azione di regolazione di presa nelle prime fasi della reazione d'idratazione. Azione che esercita andando a reagire con gli alluminati prodotti dal clinker appena idratato e formando ettringite. Facendo in questo modo si evita una presa rapida da parte del getto per via del consumo degli alluminati necessari affinché avvenga. L'ettringite prodotta dalla reazione con il getto in questa fase non provoca reazioni espansive dannose in quanto il getto essendo ancora fluido riesce ad assorbire questo aumento di volume.

L'aggiunta di nuove sostanze pozzolaniche richiedono l'aggiunta di un corrispondente quantitativo di regolatore di presa in modo da evitare che gli alluminati prodotti dalla reazione pozzolanica provochino la presa rapida del gesso.

Le aggiunte di gesso sono fissate al a un valore del 5% rispetto al peso delle aggiunte pozzolaniche. Per un valore come questo non si sono osservate in letteratura azioni espansive dannose per il getto, si può quindi escludere il loro innesco<sup>15</sup>.

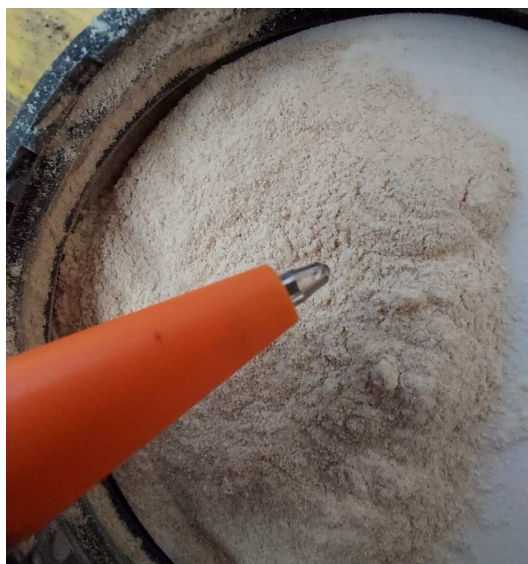


*Immagine 5 – Gesso utilizzato nel corso della sperimentazione*

- **Superfluidificante (Water reducer):** utilizzati in questo calcestruzzo per ridurre il rapporto acqua/cemento senza compromettere la lavorabilità del getto. L'utilizzo di questi additivi si è reso ancora più necessario rispetto a un normale calcestruzzo per via dell'elevato quantitativo di particelle fine, che con la loro elevata superficie specifica aumentano la richiesta d'acqua dell'impasto. Il loro dosaggio è stato variato nel corso della realizzazione delle varie miscele in modo da andare incontro alle loro caratteristiche, evitando fenomeni indesiderati a causa di dosaggi elevati.

Il tipo di superfluidificante utilizzato è a base di policarbossilati, il suo funzionamento si basa quindi sull'impedimento sterico. In questo meccanismo gruppi carbossilici del superfluidificante vanno a legarsi con le molecole di cemento e per mezzo di rami laterali neutri, costituiscono un ingombro all'aggregazione dei granuli di cemento. Facendo così si riesce a defloccare gli agglomerati di cemento, vincendo le forze di attrazione elettrostatiche generate per effetto della macinatura e della rottura dei legami ionici presenti nei costituenti del clinker. Il superfluidificante utilizzato è liquido, cosa che permette di rendere la sua azione più rapida ed efficace rispetto a quelli in polvere, non avendo necessità di sciogliersi in acqua.

- **Additivo modificatore di viscosità (VMA):** additivi a base di biopolimeri che si utilizzano in calcestruzzi autocompattanti o con elevate quantitativi di parti fini, indicativamente sopra i  $450 \text{ kg/m}^3$ . Permettono di conciliare l'elevata fluidità dell'impasto con la necessità di evitare fenomeni di bleeding o di segregazione degli inerti.



*Immagine 6 – Additivo VMA utilizzato nel corso di questa sperimentazione*

- **Fibre:** per via della loro complessità e delle loro importanza su questa ricerca verranno trattate nel successivo capitolo 2.2 – Fibre.
- **Acqua (Water):** deve rispettare le indicazioni contenute all'interno della norma UNI EN 1008 (2003)<sup>22</sup>, che fissa valori da rispettare in termini di caratteristiche e sostanze disciolte al suo interno, con tanto di specificazione delle prove da effettuare per la loro determinazione. Viene posta molta attenzione a questo componente dell'UHPC in quanto può essere veicolo di sostanze che vanno a interferire con la reazione d'idratazione o che possono danneggiare il getto. In generale vale il discorso che quando si prepara un calcestruzzo occorre utilizzare un'acqua limpida, non salata, proveniente da una fonte che dia garanzie sulla sua composizione. Essa può essere l'acqua potabile normalmente distribuita negli acquedotti, oppure l'acqua prodotta da fonti fatte analizzare.

Il quantitativo di acqua utilizzato è tale da garantire una porosità più bassa possibile, ma tale da permettere le reazioni d'idratazione del cemento e pozzolanica, necessarie per la buona riuscita del getto. Per garantire questo la ricetta originaria utilizzata, fornita dall'Università di Dresda, utilizzava un rapporto acqua/parti fini pari a 0.3, riconosciuto dalla letteratura tecnica come il minimo necessario alle reazioni del getto.

L'acqua utilizzata nel corso della ricerca è stata presa dall'acquedotto locale della città di Ancona, è la stessa utilizzata nell'università per fini anche alimentari, questo garantisce sulla sua qualità per l'utilizzo nei calcestruzzi.

## 2.2 – Fibre

I calcestruzzi fibrorinforzati (FRC) sono calcestruzzi additivati con fibre corte di acciaio o di materiali di altra natura al fine di migliorare le caratteristiche del getto. Possono infatti essere utilizzate fibre ad alto modulo elastico (acciaio, carbonio...) per migliorare le prestazioni meccaniche del getto, o fibre a basso modulo elastico (polimeriche) in modo da contrastare il fenomeno di fessurazione da ritiro plastico.

Parlando di quelle ad alto modulo elastico, oggetto di questa ricerca, si può dire che la loro aggiunta in una matrice cementizia contrasta l'apertura progressiva delle fessure. Permettendo di avere una fase post-fessurativa con una significativa resistenza residua a trazione, fino al raggiungimento di uno sforzo nullo a trazione per un valore significativo dell'apertura della fessura. Per garantire questo occorre che le fibre poste a cavallo della fessura riescano a collegare in modo efficace i due lembi, cosa sempre più difficile man mano che aumenta la distanza tra i due. Infatti la fibra potrebbe arrivare a rottura o potrebbe non aver legato in maniera efficace con la matrice cementizia, non riuscendo quindi semplicemente a trasferire gli sforzi.

Il comportamento di un calcestruzzo varia al variare del quantitativo di fibre presenti, infatti in relazione a un certo "volume critico ( $V_{cri}$ )" si possono avere due comportamenti ben differenti:

- **Incrudente** ( $V_{cri} < V$ ): il contenuto di fibre utilizzato è maggiore del volume critico, si ha quindi che dopo la prima fessurazione della pasta cementizia e dopo un breve tratto di riassetamento, le tensioni del grafico tensione-deformazione continuano a salire. Il numero di fessurazioni in questo caso è molto alto, dato che con la formazione di una nuova fessura si forma subito anche una zona più resistente per via dell'effetto delle fibre. In questo modo si innesca un processo continuo di formazione di nuove fessure ed aree più resistenti che porta a rottura zone differenti del getto. Quando il getto verrà considerato "rotto" sarà caratterizzato da un numero di fessurazioni molto alto con una diffusione su tutta la sua estensione, tutte ricucite dalla presenza delle fibre.
- **Degradante** ( $V < V_{cri}$ ): il contenuto di fibre utilizzato è minore del volume critico, si ha quindi che dopo la fessurazione della pasta cementizia le tensioni nel grafico tensione-deformazione iniziano a scendere, anche se non di schianto come se nel calcestruzzo non ci fossero fibre. Quanto detto per la fessurazione per i calcestruzzi di tipo incrudenti non è più vero in questo caso, ora quando si forma la prima fessura il quantitativo di fibre presenti non è tale da riuscire a ricucirla e creare una nuova zona forte. Si avrà quindi che all'innescio della prima fessura essa tenderà ad allargarsi fino ad arrivare a rottura senza generarne altre. Le fibre presenti a cavallo della fessura lavoreranno fino a quando non arriveranno a rottura o verranno sfilate dalla pasta cementizia.

La circolare del 21-01-2019 del Consiglio superiore dei lavori pubblici<sup>5</sup> riconosce i comportamenti incrudenti e degradanti, fornendo le seguenti indicazioni qualitative a riguardo (Immagine 7).

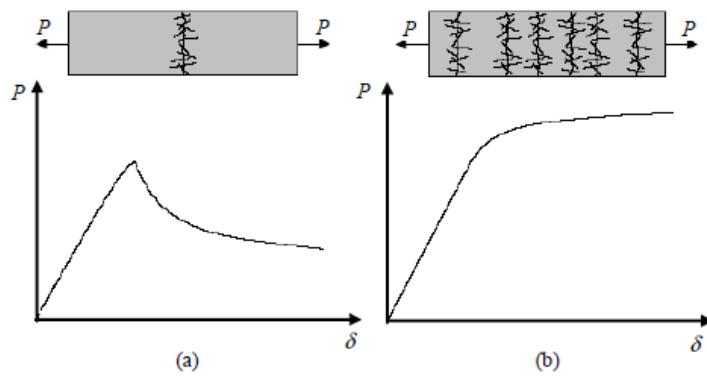
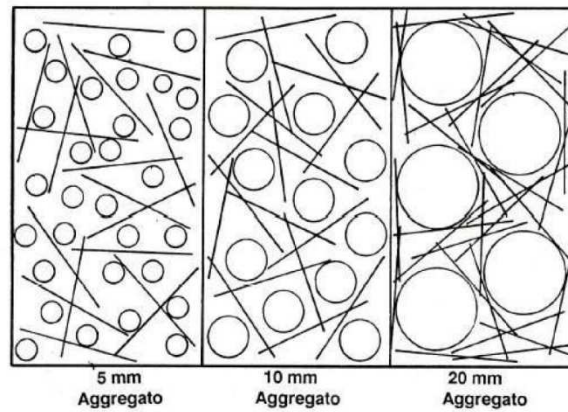


Figura 1: Curva carico  $P$ -spostamento  $\delta$  per conglomerati fibrorinforzati caratterizzati da: basse percentuali di fibre (a) e alte percentuali di fibre (b).

Immagine 7- Grafici estratti dalla Linea guida sugli FRC del Servizio tecnico centrale riguardo il comportamento post fessurativo al variare del quantitativo di fibre

Nei calcestruzzi fibrorinforzati è importante la grandezza del rapporto d'aspetto, inteso come il rapporto tra la lunghezza della fibra e il suo diametro equivalente, con un valore ideale nel caso di fibre metalliche tra 60/80 a seconda delle caratteristiche della fibra. A parità di composizione e di dosaggio, l'efficacia delle fibre migliora al crescere del rapporto d'aspetto. Infatti al suo crescere aumenta anche l'aderenza fra i due materiali e di conseguenza migliorano le prestazioni del rinforzo fibroso, poiché le fibre sollecitate a trazione tendono più difficilmente a sfilarsi, con una diminuzione del volume critico e un peggioramento della lavorabilità. L'adesione alla matrice cementizia migliora anche in funzione della forma della fibra, tanto più è a contorno irregolare tanto più è efficace. A tal proposito le forme come le estremità piegate o uncinata, ondulate, ecc. consentono di massimizzare l'ancoraggio della fibra nella matrice. Per poter sfruttare al meglio l'aggiunta di fibre ad una miscela cementizia occorre garantire la loro perfetta dispersione in essa, pena l'inefficacia del rinforzo.

La presenza di fibre si interfaccia molto con gli inerti presenti all'interno del calcestruzzo, la loro lunghezza dipende dal loro diametro massimo in modo da poter realizzare un intreccio ottimale. A seconda della dimensione dell'aggregato si possono aggiungere all'impasto più o meno fibre, motivo per cui non si utilizza di solito aggregato eccessivamente grosso negli FRC.



*Immagine 8 – Interazione tra fibre e dimetro degli aggregati*

Nel corso di questa ricerca si sono utilizzate sia fibre di acciaio (SF) che di carbonio riciclate (rCF), con l'obiettivo di valutare se quest'ultime potessero essere in grado di sostituire anche parzialmente quelle in acciaio negli UHPC.

### **2.2.1 – Fibre in acciaio (SF)**

Le fibre che hanno trovato il maggior impiego nella composizione degli FRC e di UHPC sono quelle d'acciaio. Tali fibre hanno una lunghezza, generalmente compresa tra i 6 mm e 70mm e un diametro equivalente, compreso tra 0,1 mm e 1,20 mm. La resistenza a trazione raggiunge normalmente i 1'500 MPa e talvolta supera i 2'500 MPa. Nel caso delle fibre utilizzate in questa sperimentazione si può dire che erano lunghe 13 mm e avevano un diametro di 0.20 mm senza la presenza di piegature per migliorare l'aderenza al getto. Da dire che avevano subito un trattamento superficiale di ottonatura, che si è osservato reagire con la pasta cementizia formando una superficie ossidata in grado di fornire una migliore aderenza. Questo si è dimostrato essere causato dall'ambiente alcalino della pasta cementizia che reagisce con la patina superficiale in ottone formazione di cristalli d'idrossido di zinco all'interfaccia tra fibre e pasta di cemento<sup>23</sup>.





*Immagine 9 – Fessura ricucita dalle fibre metalliche*



*Immagine 10 – Fibre d'acciaio utilizzate nel corso di questa sperimentazione*

### **2.2.2 – Fibre in carbonio riciclate (rCF)**

L'utilizzo di fibre di carbonio, specialmente quelle riciclate, ha destato sempre maggiore interesse negli ultimi anni. Nel corso di questa ricerca si vuole indagare sulla possibilità di riutilizzare la grande capacità resistente di queste fibre che altrimenti diventerebbero rifiuti. Queste provengono da precedenti applicazioni che le vedevano utilizzate negli FRP in una serie di campi d'applicazione molto vasta. Il processo di riciclo prevede la rimozione della resina in modo da riottenere di nuovo la fibra dry, che però ora appare di lunghezza inferiore dato che nel corso di questo processo è soggetta a rotture. Comparando la fibra di carbonio riciclata con quella nuova

si può notare anche come si ha una diminuzione del diametro di circa  $1.5 \mu\text{m}$ , con un diametro di  $6.0 \mu\text{m}$  contro i  $7.5 \mu\text{m}$  di quella nuova.

L'utilizzo di fibre di carbonio nei calcestruzzi presenta le seguenti problematiche:

- Aderenza con la pasta cementizia: carbonio e pasta cementizia sono due materiali molto diversi tra di loro, infatti il primo è organico mentre il secondo inorganico. Questo porta ad avere un'assenza di reazioni tra i due che possano garantire un'aderenza chimica, senza la quale l'unico tipo di aderenza possibile è quella per attrito tra le superfici. A vantaggio di questa però vi sono i residui di resina presenti sulla superficie della fibra di carbonio riciclata che non si riescono a eliminare del tutto durante il riciclo. Oltre che la sua elevata lunghezza, che le potrebbe permettere se non aggrovigliata all'interno del getto, di avere un'elevata superficie capace di generare attrito.
- Assorbimento dell'acqua: l'utilizzo di fibra di carbonio riciclata nei calcestruzzi ha portato a notare una tendenza a comportarsi in maniera diversi nei confronti dell'acqua nelle fasi di getto se non preventivamente bagnata, come nel caso questa ricerca. Infatti appena inserita all'interno del getto sembrerebbe assorbire l'acqua portando anche a una diminuzione sensibile della lavorabilità. Successivamente poi, sempre con una ridotta lavorabilità del getto, questa acqua viene rilasciata ed è possibile osservarla sulla superficie o vederla uscire da ogni minima fessura del cassero.

Si ipotizza che questo fenomeno possa essere causato dall'acqua che viene intrappolata tra i filamenti di fibra di carbonio appena essi vengono aggiunti al getto. Successivamente questa acqua viene allontanata per l'effetto combinato dell'idrofobicità della fibra e della compattazione. A rendere più probabile questa ipotesi è che la fibra faciliterebbe un fenomeno del genere a causa della sua elevata lunghezza.



*Immagine 11 – Rilascio di acqua da parte della fibra di carbonio, defluita verso il cassero vuoto a dx*

- Tendenza ad aggrovigliarsi: la fibra di carbonio utilizzata in questa ricerca è stata fornita dall'Università di Dresda e si presentava sotto forma di un cumolo abbastanza compatto di fibre dry. Per permettere una migliore dispersione all'interno del getto, su indicazione dei ricercatori tedeschi, si è provveduto a distanziare le fibre attraverso l'utilizzo dell'aria compressa. L'operazione ha portato a fibre maggiormente separate le une dall'altre ma che una volta immerse nel getto tendevano a raggrupparsi in grumi che legavano poco con la pasta cementizia. Situazione lontana quindi da quella ideale con le fibre di carbonio disperse nel getto a creare una sorta di reticolo fitto capace d'influenzare il comportamento meccanico del calcestruzzo.

Questo secondo le indicazioni contenute in letteratura è dovuto alla lunghezza delle fibre (elevato rapporto d'aspetto) che ne rende difficoltosa una dispersione all'interno del getto, a peggiorare la situazione vi è anche la superficie idrofobica delle fibre di carbonio. Unico aiuto alla dispersione all'interno del getto, oltre la soffiatura, è il superfluidificante a base di polycarbossilati. Il suo effetto è dovuto ai suoi ioni che vanno ad alterare la superficie idrofobica della fibra rendendola maggiormente idrofila<sup>24</sup>.



*Immagine 12 – Fibra di carbonio utilizzata in questa sperimentazione*

### **2.3 – Calcestruzzo pilastri da rinforzare**

Dato che la ricerca prevedeva la valutazione di queste nuove miscele di UHPC LC<sup>3</sup> anche come materiali da rinforzo strutturale a pilastri si è dovuta dare importanza anche alla loro realizzazione. Si è deciso quindi di realizzare dei cilindri in calcestruzzo non armati alti 40 cm e di diametro 14 cm, a simulare un pilastro reale. Si è scelto di adottare queste dimensioni in modo da avere, una volta eseguito il rinforzo, un cilindro di dimensioni di 20 per 40 cm, con rapporto massimo tra le dimensioni di 1:2, analogo ad altri esempi presenti in letteratura<sup>25, 26</sup>.

Il calcestruzzo utilizzato per la loro realizzazione è volutamente realizzato con criteri di bassa qualità e approssimazione, a simulare quanto veniva fatto spesso nelle vecchie strutture in CA. La resistenza fissata per questo calcestruzzo doveva essere compresa tra i 10 e i 15 N/mm<sup>2</sup> e doveva essere di tipo fluido (S4), in modo da riuscire a inglobare al meglio un'ipotetica armatura. La ricetta per questo calcestruzzo è la seguente:

Componente	Dose [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM II/B 32.5R	355
Acqua (acqua/cemento= 0.62)	220
Pietrisco	985
Sabbia	330

Tabella 4 – Dosaggio componenti del calcestruzzo dei cilindri da rinforzare

Al fine di ricreare nel miglior modo possibile un calcestruzzo come quello spesso impiegato nelle vecchie strutture in CA si sono utilizzati i seguenti accorgimenti:

- Additivi: non si sono utilizzati additivi di alcun tipo, si è dovuto quindi far ricorso a un maggior quantitativo d'acqua in modo da soddisfare la richiesta di fluidità, con aumento del rischio di bleeding e di segregazione degli inerti.
- Inerti: per la determinazione del loro quantitativo non si sono utilizzate curve granulometriche, si è semplicemente fatta una proporzione tra inerte grande (75%) e piccolo (25%).
- Maturazione: la maturazione di questi cilindri in calcestruzzo è avvenuta per una settimana all'interno del cassero in PVC utilizzato per la loro realizzazione, con solamente la parte superiore esposta all'aria a temperatura e umidità ambientali. Dopo questo periodo di tempo sono stati rimossi i casseri e fatti maturare all'aria, senza che venissero né bagnati, come un reale pilastro.

Da notare che si sono comunque rispettate tutte le norme riguardo la qualità dei materiali utilizzati, già menzionate al capitolo 2.1 – UHPC LC<sup>3</sup>.

Il getto di questo calcestruzzo è avvenuto utilizzando una betoniera a bicchiere e vibrando il getto per circa cinque secondi con una sonda a immersione una volta gettato in modo da ottenere una migliore compattazione. A seguito di questo è stato possibile notare che l'elevato quantitativo d'acqua ha provocato una sua risalita in superficie con uno strato spesso 1 mm circa. Non si sono comunque notati fenomeni di segregazione degli inerti, e a seguito del taglio dei cilindri o della rimozione dei casseri e il getto appare abbastanza ben distribuito nelle sue componenti.



*Immagine 13 – Sezione del pilastrino, da notare la buona distribuzione dei componenti*

Per valutare le prestazioni di questo calcestruzzo prima di questo getto si sono anche realizzati provini di cubici di lato 10 cm che si è provveduto a rompere a compressione secondo la UNI EN 12390-3:2019<sup>27</sup>. Queste prove hanno portato a valutare la resistenza massima a compressione del calcestruzzo a  $13 \text{ N/mm}^2$ , quindi entro il range previsto. A confermare la buona riuscita del getto vi è la forma dei provini una volta rotta, che si sono rotti correttamente dando la classica forma a clessidra.



*Immagine 14 – Aspetto dei provini dopo la prova di rottura a compressione, da notare la forma a clessidra*

## 3 – Fasi della sperimentazione

### 3.1 – Realizzazione miscele

#### 3.1.1 – Metodologie per la realizzazione delle miscele

Per la realizzazione delle miscele di UHPC si è seguita una procedura ben precisa comune a tutti i getti utilizzati, in modo da evitare differenze nei risultati causate da una disomogeneità tra le fasi realizzative. Il procedimento utilizzato è stato il seguente:

- Pesa: tutti i materiali utilizzati sono stati pesati con una bilancia elettronica con una precisione di  $\pm 0.5$  grammi. Durante questa fase si sono utilizzati di volta in volta secchi ripuliti dal materiale precedente in modo di evitare di alterare i materiali utilizzati.
- Miscela del secco: tutti i componenti secchi sono stati mescolati senza che vi fosse aggiunta d'acqua utilizzando un mixer meccanico fino a ottenere un impasto uniformemente miscelato, con tutte le componenti disperse e senza grumi. Indicativamente questa fase ha una durata di 4.00 minuti.
- Aggiunta acqua: l'acqua e il superfluidificante vengono aggiunti gradualmente all'impasto con il mixer ancora in moto, viene lasciato poi tempo all'impasto di mescolarsi con l'acqua. Il superfluidificante prima di essere aggiunto al getto è stato mescolato al quantitativo d'acqua in modo da ottimizzare la fase di mixing e rendere più uniforme il suo impatto sulla miscela. Indicativamente questa fase ha la durata di un minuto durante il quale il mixer continua ininterrottamente a impastare. Sia durante questa fase o la precedente se si nota la formazione di grumi o di altre imperfezioni si procede a mescolare manualmente fino alla loro dissoluzione.
- Aggiunta fibre metalliche: sempre con il mixer in azione vengono aggiunte le fibre metalliche, avendo accortezza di farlo in modo graduale in modo da evitare che si aggrumino. Se questo dovesse succedere occorre spegnere il mix e disperdere il grumo manualmente. Questa fase ha una durata di circa due minuti.
- Aggiunta fibre di carbonio riciclate: questa fase viene svolta con un trapano miscelatore in modo da poter agire manualmente sull'impasto permettendo un migliore inglobamento delle fibre di carbonio. La loro aggiunta viene eseguita in maniera graduale, dando tempo alla miscela di inglobare le fibre che si sono già aggiunte prima di aggiungerne altre.

Tra la pesa e l'aggiunta nel getto è importante procedere a soffiare le fibre di carbonio in modo da farle perdere la compattezza acquisita durante il trasporto, avvenuto in un sacco chiuso che ha compattato tra di loro le fibre. Questa operazione è eseguita mettendo in un sacchetto di plastica chiuso le fibre di carbonio pesate e soffiando al suo interno con dell'aria compressa. Il risultato finale saranno delle fibre molto meno compatte e che più difficilmente formeranno grumi.

- **Getto:** la miscela così ottenuta viene gettata nei casseri per la realizzazione dei provini o come rinforzo dei cilindri in calcestruzzo descritti successivamente nel capitolo 3.3. In entrambi i casi i casseri devono essere preventivamente trattati superficialmente con olio disarmante in modo da favorire il disarmo. In questa fase avviene anche la vibratura della miscela in modo da far uscire il maggior quantitativo d'aria possibile.

Nel caso del rinforzo dei cilindri il cassero è stato realizzato con un tubo in PVC con al suo interno in posizione centrata il cilindro da rinforzare, con l'accortezza di ottenere uno spessore del rinforzo uniforme lungo tutta la sua estensione. Il cilindro in calcestruzzo prima di ricevere il rinforzo è stato bagnato con acqua corrente in modo da ricreare la situazione di preparazione del getto che si avrebbe in cantiere.



*Immagine 15 – Cilindro in calcestruzzo pronto a ricevere il getto di rinforzo, da notare la centratura rispetto al cassero esterno*

- **Maturazione:** una volta gettata la miscela si procede a farla maturare, prima per il periodo della presa all'interno del cassero adeguatamente coperto con un telo plastico in modo da evitare che l'aria lo secchi. Una volta che il getto inizia a indurirsi si procede poi allo scassero e all'immersione in acqua in modo da permettere una reazione d'idratazione ideale. I getti rimarranno immersi in questo bagno d'acqua fino a pochi giorni dalle prove, in modo da dare all'aria il tempo di asciugarli. La maturazione dei getti nel caso di questa ricerca ha avuto una durata di almeno 28 giorni, la reazione d'idratazione è da intendere quindi come pienamente sviluppata.

Nel caso dei cilindri rinforzati si è provveduto anche a una molatura superficiale, in modo da facilitare l'utilizzo della Digital Image Correlation (DIC) nella prova di rottura a compressione. Lo scopo di questa operazione è stato quello di rimuovere lo strato superficiale non perfettamente regolare facilitando il riconoscimento di punti fissi da parte della DIC.



Immagine 16 – Cilindri in calcestruzzo rinforzati durante la maturazione immersi in acqua, da notare il  $\text{Ca(OH)}_2$  che si è depositato tra i due e in sospensione sulla superficie dell’acqua, situazione tipica con gli UHPC che maturano in acqua.

### 3.1.2 – Miscele utilizzate

Nel corso della sperimentazione si sono utilizzate molte ricette, variando di volta in volta in modo da correggerne i difetti o permettere variazioni delle loro caratteristiche. Da dire che si è partiti con la ricetta originaria dell’Università di Dresda variando la ricetta in modo da poter accogliere al meglio quantitativi e tipi di fibre differenti. Nel corso di questo si è cercato di realizzare una miscela prestante dal punto di vista meccanico, ma allo stesso tempo sufficientemente fluida da essere colabile per la realizzazione di un incamiciatura di un pilastro.

Si sono quindi ottenute le seguenti miscele:

Componente	Dosaggio [g/lt]					
	Prova 1	Prova 2	M-1.0 SF	M-1.5 SF	M-1.0 rCF	M-1.0 SF 0.5 rCF
Cemento CEM I 52.5 R-SR3/NA	599	599	599	599	599	599
Calcare	190	190	190	190	190	190
Argilla calcinata	379	379	379	379	379	379
Gesso	30	30	30	30	30	30
Sabbia di quarzo	536	536	536	536	536	536
Superfluidificante	18	9	10	10	18	18
Additivo modificatore di viscosità	0.3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Acqua	360	320+40	360	340	360	360



Fibre d'acciaio	75 (1%)	75 (1%)	75 (1%)	112,5 (1.5%)	/	75(1%)
Fibre di carbonio	/	/	/	/	18 (1%)	9 (0.5%)

*Tabella 5 – Miscele di UHPC LC<sup>3</sup> utilizzate nel corso della sperimentazione*

A proposito di queste miscele si può dire che:

- Prova 1: questa miscela di prova è stata realizzata seguendo la ricetta originale fornita dall'Università di Dresda a cui è stato aggiunto l'1% di fibre d'acciaio per valutare il suo comportamento con questa aggiunta. La miscela così realizzata è stata valutata come completamente insoddisfacente dato che si è dimostrata incapace d'inglobare al suo interno le fibre. L'impasto è apparso fin da subito troppo fluido e aggiungendo al suo interno le fibre esse si sono sedimentate subito sul fondo.



*Immagine 17 – Secchio con la miscela della prima prova al suo interno. Da notare il mucchio di fibre metalliche (sx) separato dalla miscela (dx), e la sua elevata fluidità.*

Nonostante questo si è provato a realizzare dei provini da rompere poi a trazione e a flessione. Nel corso della loro realizzazione la miscela è stata colata nei casseri senza che la maggior parte delle fibre venisse coinvolta, tanto che alla fine dei getti più di metà delle fibre era ancora sedimentata sul fondo del secchio. Una volta stagionato il getto dei provini e scasserato si è potuto notare come anche in questo caso le fibre fossero tutte sedimentate sul fondo. Ancora più grave il fatto che un provino “a osso di cane” si fosse fessurato da solo, rompendosi di netto, mentre maturava all'interno del cassero, sintomo di elevato ritiro e assenza di fibre.



*Immagine 18 – Provino “a osso di cane” che si è rotto da solo durante la stagionatura per via dell’elevato ritiro e dell’assenza di fibre.*

Analizzando la ricetta utilizzata si è dato la colpa di questo comportamento all’elevato quantitativo di acqua e superfluidificante, già maggiormente efficace perché fluido ma anche utilizzato al suo dosaggio massimo.

- **Prova 2:** realizzata con la stessa ricetta della precedente ma avendo l’accortezza di dimezzare il quantitativo di superfluidificante e ridurre il quantitativo d’acqua. La miscela realizzata in questo modo è risultata troppo poco fluida, con uno spandimento limitato anche alla prova della tavola vibrante. Dovendo correggere questo difetto in modo da permettere la messa in opera per colatura si è provveduto ad aggiungere un quantitativo d’acqua tale per cui complessivamente si è arrivati a quello della prova precedente. La miscela così ottenuta ha buone caratteristiche in termini di fluidità ma l’aggiunta di acqua quando già la reazione d’idratazione è iniziata non è corretto dal punto di vista procedurale. Si è provveduto quindi a realizzare una nuova miscela dove tutto il quantitativo d’acqua è aggiunto fin dall’inizio.
- **M-1.0 SF:** analoga alla precedente ma con un quantitativo di superfluidificante leggermente aumentato (+1 g/lit) e tutto il quantitativo d’acqua aggiunto fin da subito. Le correzioni portate hanno il compito di aumentare la fluidità rispetto al caso precedente e permettere quindi la messa in opera per colata. La miscela così ottenuta è apparsa fin da subito molto fluida ma abbastanza coesa da permettere d’inglobare al suo interno le fibre metalliche utilizzate una volta fatta riposare alcuni minuti. Anche quando si è provveduto alla realizzazione dei provini con annessa vibratura dei getti, non si è notato alcun fenomeno di segregazione, né di bleeding.

- **M-1.5 SF**: si differenzia dalla precedente per via del maggiore quantitativo di fibre d'acciaio (1.5% totali) e del minore quantitativo d'acqua (-20 g/lit) in modo da ottenere una miscela leggermente meno fluida in modo da inglobare fin da subito tutte le fibre. Nonostante questo si è ottenuto una miscela molto fluida, anche se leggermente meno della precedente, e in grado d'inglobare tutte le fibre senza bisogno di alcun riposo. Il getto del rinforzo dei cilindri e dei provini con questa miscela è risultato agevole e non si segnalano problemi di alcun tipo. La compattazione è stata eseguita ed ha portato all'espulsione di bolle d'aria senza un'eccessiva risalita d'acqua.



*Immagine 19 – Miscela M-1.5 SF, da notare la sua fluidità*

- **M-1.0 rCF**: prima miscela realizzata con la fibra di carbonio riciclata (1%), che ha sostituito del tutto quella metallica. Dato che ci si aspettava una perdita di fluidità i quantitativi di superfluidificante (18 g/lit) e acqua (360 g/lit) sono stati riportati ai valori previsti dall'Università di Dresda. Aggiungendo la fibra di carbonio si è notato che nonostante le accortezze prese per non farla aggrovigliare non si è riusciti nell'intento, con grumi facilmente visibili immersi e bagnati dalla pasta cementizia. La fluidità è apparsa fin da subito molto ridotta rispetto al caso precedente rendendo necessaria un'energica vibratura del getto del rinforzo e dei provini per avere una buona compattazione.



*Immagine 20 – Miscela M-1.0 rCF allo stato fresco, visibili i grumi di fibra di carbonio al suo interno e la fluidità non elevata*

Da segnalare che la miscela così realizzata a causa del comportamento della fibra di carbonio tendeva a “rigettare” all’esterno un leggero quantitativo d’acqua, come già detto nel capitolo 2.2.2 – Fibre di carbonio riciclate (rCF).

- **M-1.0 SF 0.5 rCF**: ultima miscela realizzata nel corso di questa sperimentazione, conteneva al suo interno sia fibre di carbonio (0.5%) che di acciaio (1.0%), per il resto risultava analoga alla precedente. Il suo comportamento risulta intermedio tra le miscele M-1.5 SF e M-1.0 rCF, con una fluidità ridotta ma ancora buona e un fenomeno di rilascio d’acqua ancora presente ma ridotto rispetto alla M-1.0 rCF. Per la sua messa in opera si è deciso di procedere ugualmente a un’energica vibratura in modo da assicurarsi una perfetta compattazione del getto.

### **3.2 – Prove eseguite**

Al fine di caratterizzare meccanicamente le miscele si sono utilizzate metodologie di prova normate, o comunque con un riferimento in letteratura scientifica. Tutte le prove sono avvenute dopo i 28 giorni del getto, a reazione d’idratazione ultimata e dopo una stagionatura in acqua con asciugatura finale. Le prove eseguite sono state:

- **Flessione a tre punti**: realizzata secondo la norma europea armonizzata UNI EN 1015-11<sup>28</sup> su provini parallelepipedi di dimensione 4\*4\*16 cm. Il fine è quello di determinare il comportamento del materiale una volta soggetto a flessione, i dati così ottenuti possono essere anche utilizzati per calcolare la tensione massima teorica a trazione sul bordo teso del provino. La prova viene eseguita considerato il provino come incernierato alle estremità e con un carico concentrato in mezzeria. La prova così eseguita porterebbe in un provino rotto correttamente ad avere una rottura a flessione in mezzeria.

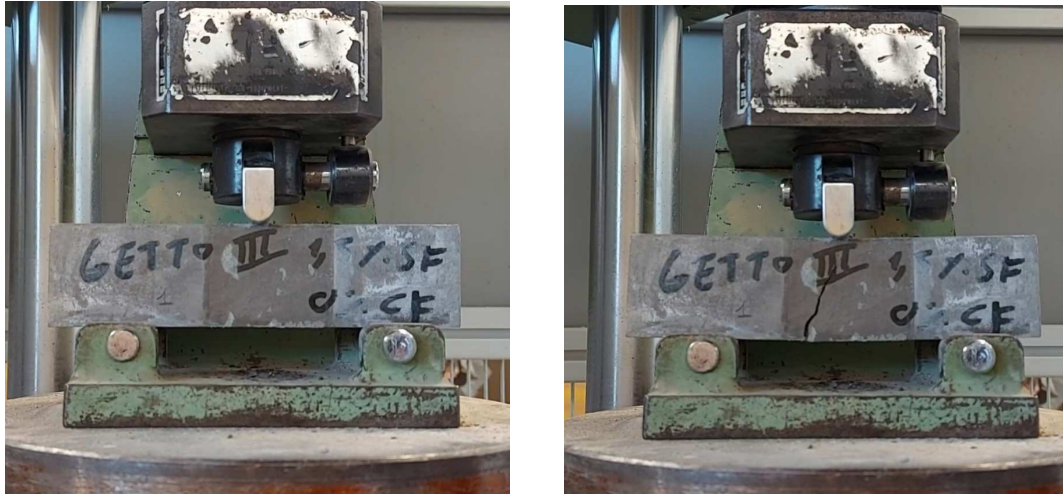


Immagine 21 – Fasi della prova, prima (sx) e dopo (dx) la rottura del provino, da notare il set up.

La strumentazione utilizzata per questa prova è una pressa idraulica con cella di carico collegata a un terminale e in grado di regolare la velocità di esecuzione della prova, in possesso del SIMAU dell'UNIVPM. Si è anche predisposto un set up particolare alla pressa in modo da poter realizzare lo schema statico ipotizzato. Preventivamente a questa prova tutti i provini testati sono stati pesati in modo da verificare la presenza di anomalie (bolle d'aria...) o altre difformità che potessero alterare i risultati forniti. La pesa è avvenuta con una bilancia elettronica con una precisione del centesimo di grammo, sicuramente in grado quindi di rilevare piccole difformità tra i provini.



Immagine 22 – Pressa utilizzata nel corso della prova a flessione e a compressione

- Compressione: svolta appena dopo quella a flessione sui medesimi provini 4\*4\*16, con la stessa attrezzatura e secondo la stessa normativa<sup>28</sup>. L'unica differenza sta nel set up, infatti ora il provino dovendo essere schiacciato pone il bisogno di averne uno apposito in grado di caricarlo in maniera omogenea su una superficie di 40\*40 mm. La prova si svolge sulle estremità dei provini precedentemente rotti a flessione, questo è possibile considerando che le estremità non si danneggiano nella prova precedente e che la prova interessa un

cubo di materiale di lato 40 mm. Continuano a valere le prescrizioni in materia di metodologia di rottura già valide per le altre prove a compressione, infatti finita la prova si dovrà ottenere la classica forma a clessidra.



*Immagine 23 – Esempio di due estremità di un provino 4\*4\*16 già rotto a flessione rotte a compressione, da notare la forma a clessidra indice di una rottura corretta.*

- **Trazione diretta:** per la determinazione della resistenza a trazione si è deciso di utilizzare una prova che portasse a rottura il provino con uno stato di tensione monoassiale, come previsto dal Model Code 2010<sup>2</sup>. Per il metodo di prova si è fatto riferimento alla letteratura scientifica, infatti in essa si possono trovare molte indicazioni<sup>29</sup>, anche a livello internazionale<sup>30</sup>, a prove eseguite sugli UHPC con presse idrauliche fornite di celle di carico su provini dalla forma “a osso di cane”. Questi provini sono utilizzati per via della loro capacità d’indurre la rottura nella loro zona più esile, essendo poi noti sia la sezione che il carico è possibile risalire alla tensione di rottura e alle deformazioni. Come ulteriore assicurazione che la rottura avvenga proprio in quella zona, le altre parti più sollecitate del provino sono state rinforzate con degli FRP a base di fibra di vetro.

I provini a “osso di cane” sono stati sottoposti a prova di trazione diretta utilizzando la macchina Zwick/Roell Z050 del Laboratorio di Progettazione Meccanica e Costruzione di Macchine del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell’Università Politecnica delle Marche di Ancona. Per quanto riguarda il setup di prova, il provino è stato collegato alla macchina di prova dalle estremità tramite un piccolo telaio in acciaio realizzato appositamente, grazie al quale il provino risulta afferrato su quattro punti come mostrato nell’immagine 24. Così facendo, si è cercato d’indirizzare l’innesco del processo di fessurazione sulla parte centrale del provino, dove è stato più facile monitorare e registrare il processo di formazione e sviluppo delle fessure.

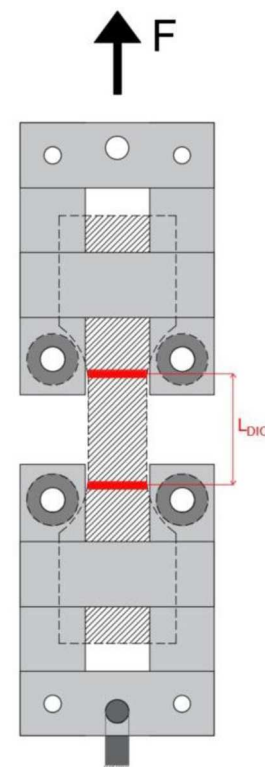
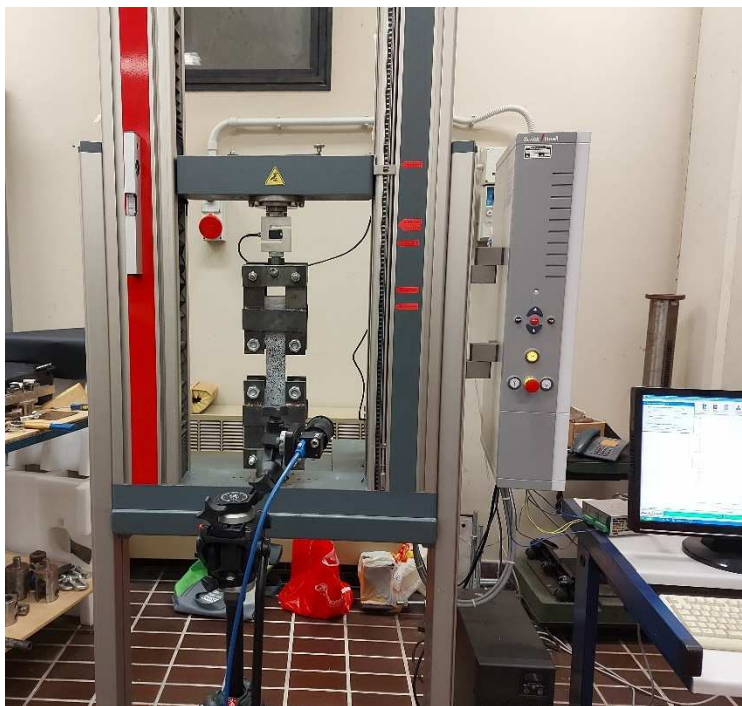


Immagine 24 – Macchina utilizzata per la prova e set up di prova, da notare come viene afferrato il provino “a osso di cane”

Le deformazioni nel corso della prova sono state misurate anche con la tecnologia del Digital Image Correlation (DIC), tecnica di misura senza contatto basata sull'utilizzo di telecamere e software in grado di determinare spostamenti e deformazioni. Il suo funzionamento si basa sull'elaborazione d'immagini digitali acquisite ritraendo l'oggetto da esaminare nelle diverse condizioni di sollecitazione. I punti di forza della DIC risiedono, oltre che nella relativa semplicità dell'acquisizione dei dati, nella sua capacità di fornire una misurazione particolarmente densa e nella possibilità di analizzare campi di spostamenti/deformazioni anche ingenti se comparati con i tradizionali metodi di misura.

Una volta posizionate le videocamere, ogni provino è stato installato attentamente secondo il setup di prova. Prima di ogni prova, è stata applicata una leggera pretensione e il provino è stato spostato manualmente con cura per cercare il miglior allineamento del provino con l'asse della traversa mobile. La prova è stata eseguita in controllo di spostamento a un valore costante pari a 1.5 mm/min. Durante il test sono state misurate la forza applicata, mediante apposito trasduttore, e lo spostamento della traversa mobile.

- **Lavorabilità:** la lavorabilità delle miscele UHPC è stata determinata con l'utilizzo della tavola a scosse, secondo le indicazioni contenute nella UNI EN 1015-3<sup>31</sup>. In questa prova il campione di miscela appena realizzato, ancora allo stato fluido, viene messo al di sopra di un piano all'interno di un recipiente tronco-conico che ha il solo compito di dargli una forma ben precisa. All'inizio della prova il recipiente viene rimosso, rendendo l'impasto libero di spandersi, e la tavola viene azionata. Inizieranno quindi 15 cicli di scosse durante

il quale la miscela continuerà a spandersi, finiti i quali si procederà alla misura dello spandimento (diametro) finale lungo le due direzioni principali ortogonali tra di loro.

Questa prova è molto semplice, economica e facilmente replicabile, fornisce risultati sia riguardo la lavorabilità delle miscele, che del loro comportamento nei confronti del bleeding o della segregazione degli inerti. Lo spandimento finale per essere accettato oltre a non presentare i fenomeni appena detti dovrà essere uniforme lungo tutte le direzioni.



*Immagine 25 – Tavola a scosse utilizzata nel corso della sperimentazione per la determinazione della lavorabilità, da notare il recipiente tronco-conico.*

- Compressione dei cilindri in calcestruzzo rinforzati: questa prova doveva essere svolta andando a rompere a compressione monoassiale il cilindro in calcestruzzo rinforzato. Il carico sarebbe stato dato solamente al calcestruzzo centrale di bassa qualità, e non al rinforzo, tramite un disco in UHPC appositamente realizzato, caratterizzato da rigidità e resistenza un ordine di grandezza maggiore di quella del sistema. Purtroppo non è stato possibile realizzare questa prova per via della necessaria attrezzatura di prova, in particolare è mancato il nuovo sistema di DIC che si voleva utilizzare per raccogliere informazioni più precise. Non si tratta di un annullamento della prova, ma soltanto di un suo posticipo in futuro, dato che si aspetta l'arrivo di questo sistema nei prossimi mesi. La scelta di caricare solamente la parte centrale è stata fatta per testare la situazione reale dove un incremento di carico sarebbe andato a scaricarsi solo in parte sul rinforzo.



### 3.3 – Realizzazione cilindri da rinforzare

Nel corso della sperimentazione si sono realizzati anche dei cilindri di calcestruzzo di bassa qualità che poi si sono andati a rinforzare con le miscele in UHPC LC<sup>3</sup> per valutare la fattibilità dell'utilizzo di queste miscele per il rinforzo strutturale di pilastri. Le loro dimensioni sono state decise in base a quanto già fatto per studi analoghi in letteratura<sup>25, 26</sup> e in base alle limitazioni imposte dei macchinari di prova a disposizione. In particolare, osservando la letteratura si è deciso di avere un rapporto massimo tra la lunghezza e il diametro di 1:2 per i cilindri rinforzati.

Una volta effettuato il mix design della miscela e pesati i materiali si è provveduto a realizzare il getto con l'ausilio di una betoniera a bicchiere per l'impasto. La vibratura poi è stata realizzata con una sonda a immersione per il calcestruzzo dei cilindri e con una tavola vibrante per quello dei provini cubici, entrambe della durata di pochi secondi.

Il getto dei cilindri di calcestruzzo è avvenuto all'interno di tubi di PVC della lunghezza di 50 cm con un taglio in senso longitudinale in modo da permettere una facile estrazione del getto una volta indurito. A facilitare lo scassero vi è stato anche l'utilizzo su tutte le superfici a contatto con il getto di un olio disarmante. Queste accortezze hanno permesso una rimozione dei casseri agevole con rotture degli spigoli praticamente nulle, cosa comunque impossibile da evitare per la bassa resistenza del conglomerato anche dopo una settimana di stagionatura. I tubi di PVC per permettere il getto sono stati siliconati in verticale su di una tavola di legno per getti, questa accortezza ha permesso l'esecuzione regolare del getto senza che sia insorto il fenomeno dell'uscita di acqua e pasta cementizia dal cassero.



*Immagine 26 – Getto ultimato dei cilindri*

Al fine di ottenere cilindri con la giusta lunghezza di 40 cm anziché di 50 cm e con le facce complanari si è deciso di procedere al loro taglio una volta che la stagionatura lo avesse permesso.

Il taglio è stato effettuato utilizzando una sega circolare con lama diamantata raffreddata ad acqua utilizzando tutte le accortezze per non rovinare gli spigoli di questi cilindri.

Ultima operazione eseguita su questi cilindri è stata la rimozione dello strato polveroso superficiale che avrebbe reso più difficoltosa l'aderenza con il rinforzo in UHPC. Questo strato è composto da pasta cementizia che per le sue pessime caratteristiche ha un aspetto polveroso e risulta facilmente rimovibile. Per la sua rimozione si è usata una smerigliatrice angolare con un disco abrasivo e ci si è limitati a uno spessore inferiore al millimetro. A seguito di questo trattamento gli inerti sono a vista, permettendo una migliore aderenza col rinforzo. Si è fatta questa operazione dato che anche nel caso d'interventi su pilastri reali da rinforzare si procederebbe alla rimozione dello strato superficiale degradato. A conferma ancora una volta della pessima qualità del calcestruzzo vi è l'elevato quantitativo di polvere sollevato nel corso di questa operazione. Cosa che invece non si ottenuta quando la stessa operazione è stata eseguita sul rinforzo in UHPC, dove praticamente non è stata quasi sollevata polvere



*Immagine 27 – Differenza tra la superficie dei cilindri in calcestruzzo prima (sx) e dopo (dx) la rimozione dello strato polveroso*

## 4 – Risultati e discussione

### 4.1 – Massa volumica

Si elencano in questo capitolo i risultati della pesatura dei provini parallelepipedi 4\*4\*16 cm eseguiti prima della prova a flessione come prova per verificare la presenza di anomalie tra i provini. Fatto utile per risalire alle cause di un rottura insolita nella prova a flessione e a compressione. I risultati sono riportati con la massa volumica ottenuta a partire dai pesi rilevati:

Miscela	Provino	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa volumica media [kg/m <sup>3</sup> ]
M-1.0 SF	A	2'002.34	2004.36
	B	2'007.89	
	C	2'002.85	
M-1.5 SF	A	2'142.42	2133.19
	B	2'156.52	
	C	2'100.63	
M-1.0 rCF	A	2'132.42	2132.06
	B	2'085.00	
	C	2'178.75	
M-1.0 SF 0.5 rCF	A	2'161.99	2162.32
	B	2'153.71	
	C	2'171.25	

Tabella 6 – Massa volumica dei provini da 4\*4\*16 cm

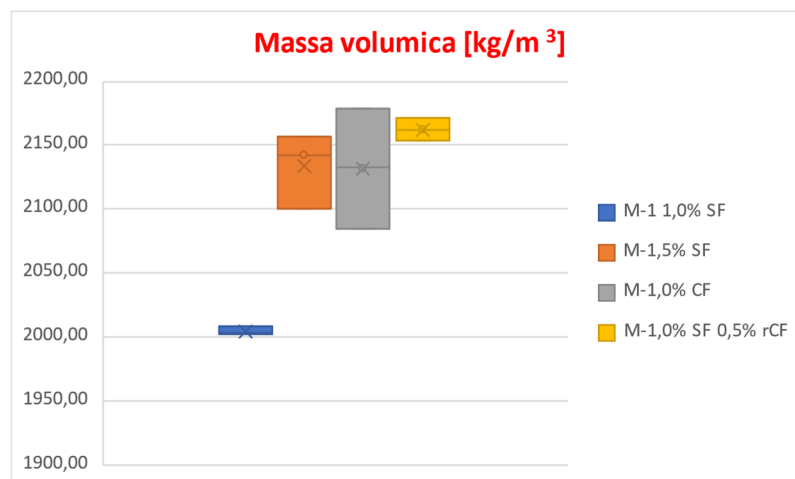


Immagine 28 – Grafico a scatole e baffi della massa volumica dei provini, da notare la minore massa volumica e la concentrazione dei risultati della miscela M-1.0 SF

Si può notare come nella M-1.0 SF il getto sia stato particolarmente ben eseguito, con tre campioni aventi una differenza di massa volumica praticamente inesistente, indice di una miscela molto lavorabile. Analogo discorso può essere fatto anche con la miscela ibrida con entrambi i tipi di fibre (M-1.0 SF 0.5 rCF) che è riuscita a concentrare i risultati in uno spazio di 20 kg/m<sup>3</sup>. Cosa che invece non si è avuta con la M-1.0 rCF, per la quale la massa volumica dei provini differisce anche di 100 kg/m<sup>3</sup>, con il provino meno denso unico a non rompersi di schianto durante la prova a flessione.

## 4.2 – Lavorabilità

Si elencano in questo capitolo i risultati della prova di lavorabilità eseguita secondo le indicazioni contenute nella norma UNI EN 1015-3<sup>31</sup>, ossia con il metodo della tavola a scosse. I risultati ottenuti sono:

Miscela	Diametro 1 [cm]	Diametro 2 [cm]	Diametro medio [cm]
M-1.0 SF	27.5	27.0	27.3
M-1.5 SF	26.0	26.0	26.0
M-1.0 rCF	14.0	13.5	13.8
M-1.0 SF 0.5 rCF	20.0	18.5	19.3

Tabella 7 – Risultati prova di lavorabilità secondo la UNI EN 1015-3<sup>31</sup>, ossia con il metodo della tavola a scosse

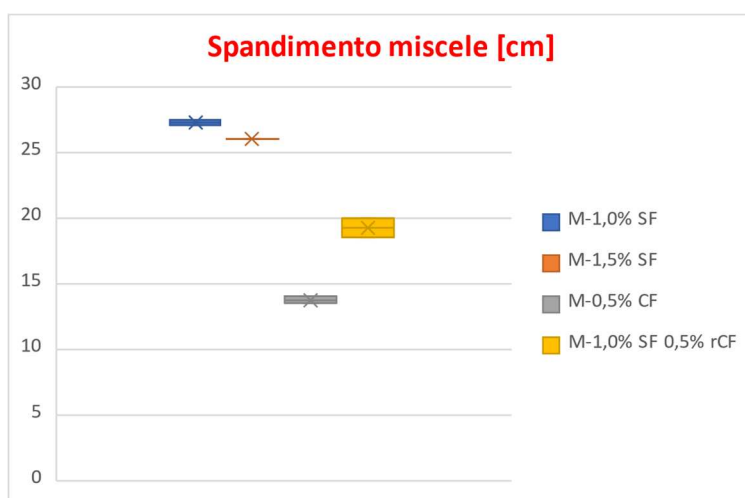


Immagine 29 - Risultati prova di lavorabilità secondo la UNI EN 1015-3<sup>31</sup> messi a confronto

Da questa prova si può notare prima di tutto che lo spandimento massimo e minimo per qualsiasi miscela differiscono tra di loro al massimo di meno di due centimetri. Considerando anche che tutte le miscele hanno avuto uno spandimento uniforme si può dire che i risultati di questa prova sono validi e le miscele sono state realizzate correttamente.

Andando poi a valutare i dati ottenuti si può notare che le miscele con fibra di acciaio (M-1.0 SF e M-1.5 SF) sono caratterizzate da un elevato spandimento, legato a una elevata lavorabilità. Al contrario invece la miscela realizzata solamente con la fibra di carbonio (M-1.0 rCF) presenta uno

spandimento molto ridotto, con una lavorabilità molto bassa, fatto già notato durante i getti. La miscela mista invece, realizzata con entrambe le tipologie di fibre (M-1.0 SF 0.5 rCF) presenta un comportamento intermedio tra le due tipologie precedenti. Ha quindi una perdita di lavorabilità rispetto alle miscele con fibre di acciaio, ma non così tanto marcata come la miscela con solamente la fibra di carbonio.

Da notare come questo dato giustifichino anche la massa volumica uniforme dei provini della miscela M-1.0 SF discussa nel capitolo precedente, che si è potuta ottenere per via della maggior lavorabilità. Oltre che l'ampia dispersione della massa volumica dei provini della miscela M-1.0 rCF, dovuta questa volta alla sua bassa lavorabilità.

### **4.3 – Prova a flessione**

Si elencano in questo capitolo i risultati ottenuti dalla prova a flessione a tre punti eseguita secondo la norma UNI EN 1015<sup>28</sup>. Tutti i grafici sono stati inseriti nella stessa scala per facilitare la comprensione del comportamento delle miscele, analoga cosa è stata fatta per le foto, tutte fatte a prova ultimata dallo stesso punto di presa. Per la misura della tenacità si è scelto il valore ultimo di 2.50 mm in modo da non considerare l'ultimo tratto delle curve la cui lunghezza può variare in base a quando è stata interrotta la prova.

I risultati sono:

#### 4.3.1 – Risultati a prova flessione M-1.0 SF

Provino	Forza massima [kN]	Deflessione alla forza massima [mm]	Resistenza a flessione [MPa]	Tenacità alla forza massima [kNmm]	Tenacità a 2.50 mm [kNmm]
A	3.32	1.26	7.78	2.16	6.46
B	4.83	0.89	11.32	2.34	9.04
C	3.68	0.60	8.64	1.02	4.75
<i>Media</i>	<i>3.94</i>	<i>0.92</i>	<i>9.25</i>	<i>1.84</i>	<i>6.75</i>
<i>CoV</i>	<i>0.20</i>	<i>0.36</i>	<i>0.20</i>	<i>0.39</i>	<i>0.32</i>

Tabella 8 – Risultati prova a flessione miscela M-1.0 SF

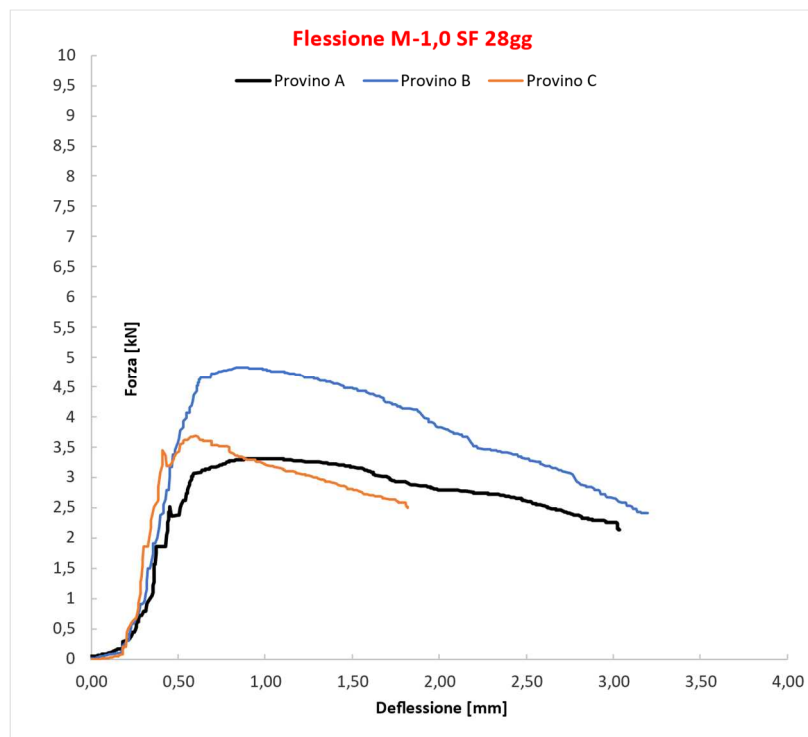
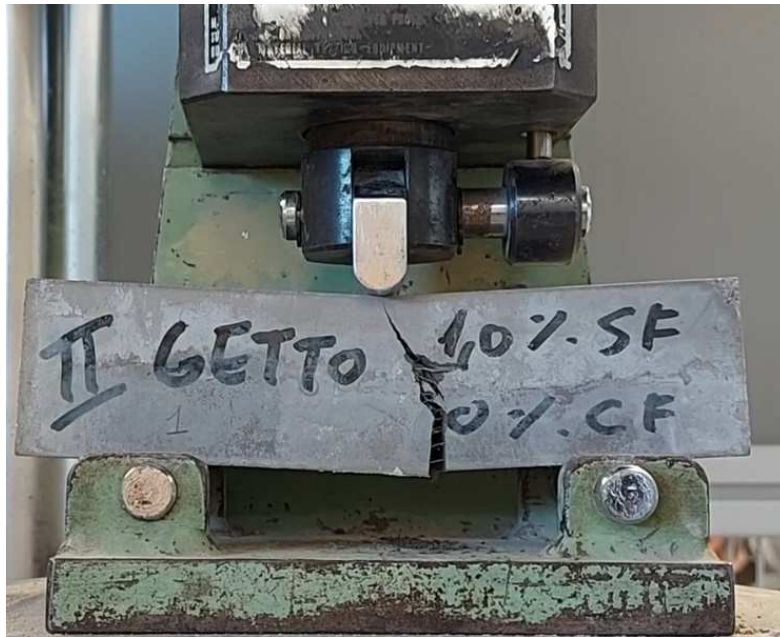


Immagine 30 – Curva forza-deflessione miscela M-1.0 SF



*Immagine 31 – Un provino di della miscela M-1.0 SF a prova ultimata*

#### 4.3.2 – Risultati a prova flessione M-1.5 SF

Provino	Forza massima [kN]	Deflessione alla forza massima [mm]	Resistenza a flessione [MPa]	Tenacità alla forza massima [kNmm]	Tenacità a 2.50 mm [kNmm]
A	6.31	0.69	14.80	2.20	11.38
B	7.22	0.91	16.91	4.01	11.63
C	8.59	0.92	20.13	4.40	15.00
<i>Media</i>	<i>7.37</i>	<i>0.84</i>	<i>17.28</i>	<i>3.53</i>	<i>12.67</i>
<i>CoV</i>	<i>0.16</i>	<i>0.15</i>	<i>0.16</i>	<i>0.33</i>	<i>0.16</i>

Tabella 9 - Risultati prova a flessione miscela M-1.5 SF

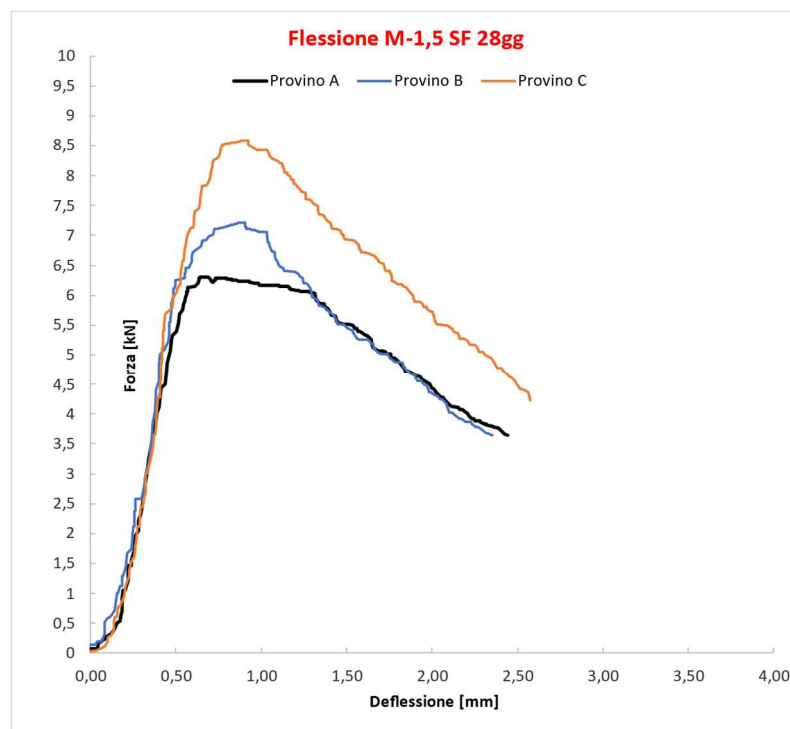


Immagine 32 – Curva forza-deflessione miscela M-1.5 SF





*Immagine 33 – Un provino di della miscela M-1.5 SF a prova ultimata*

### 4.3.3 – Risultati a prova flessione M-1.0 rCF

Provino	Forza massima [kN]	Deflessione alla forza massima [mm]	Resistenza a flessione [MPa]	Tenacità alla forza massima [kNmm]	Tenacità a 2.50 mm [kNmm]
A	7.51	0.69	17.59	1.64	1.78
B	6.54	0.51	15.33	1.11	2.44
C	5.14	0.60	12.04	0.78	0.99
<i>Media</i>	<i>6.39</i>	<i>0.60</i>	<i>14.99</i>	<i>1.18</i>	<i>1.74</i>
<i>CoV</i>	<i>0.19</i>	<i>0.15</i>	<i>0.19</i>	<i>1.74</i>	<i>0.42</i>

Tabella 10 – Risultati prova a flessione miscela M-1.0 rCF

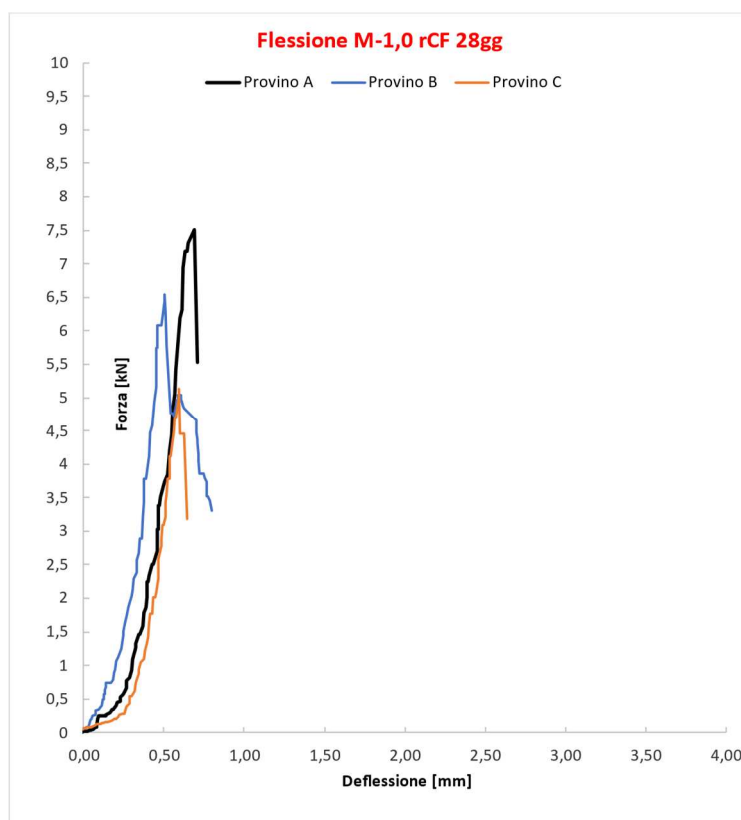


Immagine 34 - Curva forza-deflessione miscela M-1.0 rCF



*Immagine 35 – Un provino di della miscela M-1.0 rCF a prova ultimata*

#### 4.3.4 – Risultati prova a flessione M-1.0 SF 0.5 rCF

Provino	Forza massima [kN]	Deflessione alla forza massima [mm]	Resistenza a flessione [MPa]	Tenacità alla forza massima [kNmm]	Tenacità a 2.50 mm [kNmm]
A	4.98	0.58	11.67	0.76	8.59
B	5.41	0.61	12.68	0.92	8.90
C	4.54	0.56	10.65	0.74	7.57
<i>Media</i>	<i>4.98</i>	<i>0.58</i>	<i>11.66</i>	<i>0.81</i>	<i>8.35</i>
<i>CoV</i>	<i>0.09</i>	<i>0.04</i>	<i>0.09</i>	<i>0.12</i>	<i>0.08</i>

Tabella 11 – Risultati prova a flessione miscela M-1.0 SF 0.5 rCF

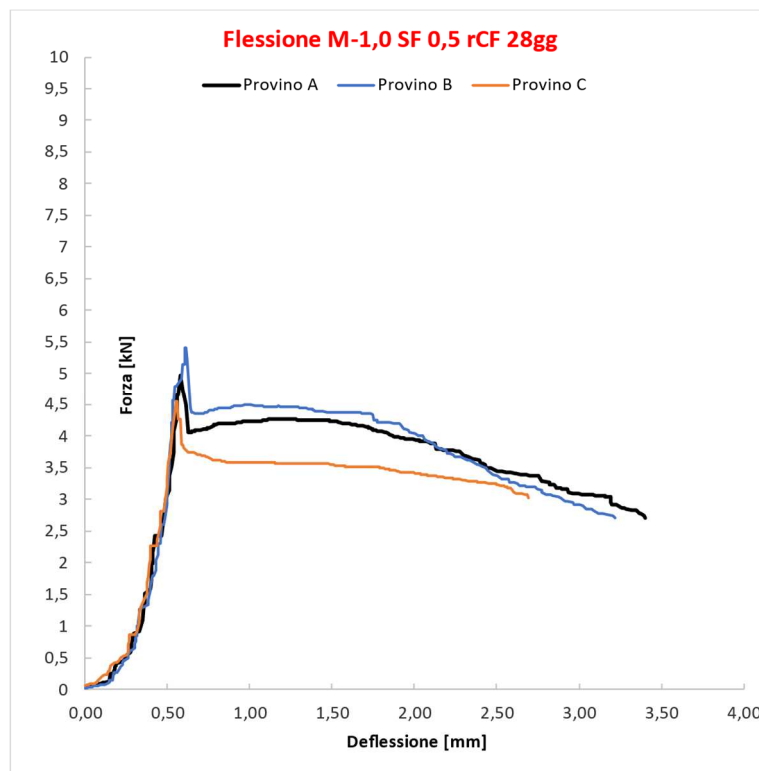


Immagine 36 – Curva forza-deflessione miscela M-1.0 SF 0.5 rCF



*Immagine 37 – Un provino di della miscela M-1.0 SF 0.5 rCF a prova ultimata*

#### 4.3.5 – Analisi risultati della prova a flessione

Miscela	Forza massima media [kN]	Deflessione media alla forza massima [mm]	Resistenza a flessione media [MPa]	Tenacità media alla forza massima [kNmm]	Tenacità media a 2.50 mm [kNmm]
M-1.0 SF	3.94	0.92	9.25	1.84	6.75
M-1.5 SF	7.37	0.84	17.28	3.53	12.67
M-1.0 rCF	6.39	0.60	14.99	1.18	1.74
M-1.0 SF 0.5 rCF	4.98	0.58	11.66	0.81	8.35

Tabella 12 – Risultati medi delle prove a flessione

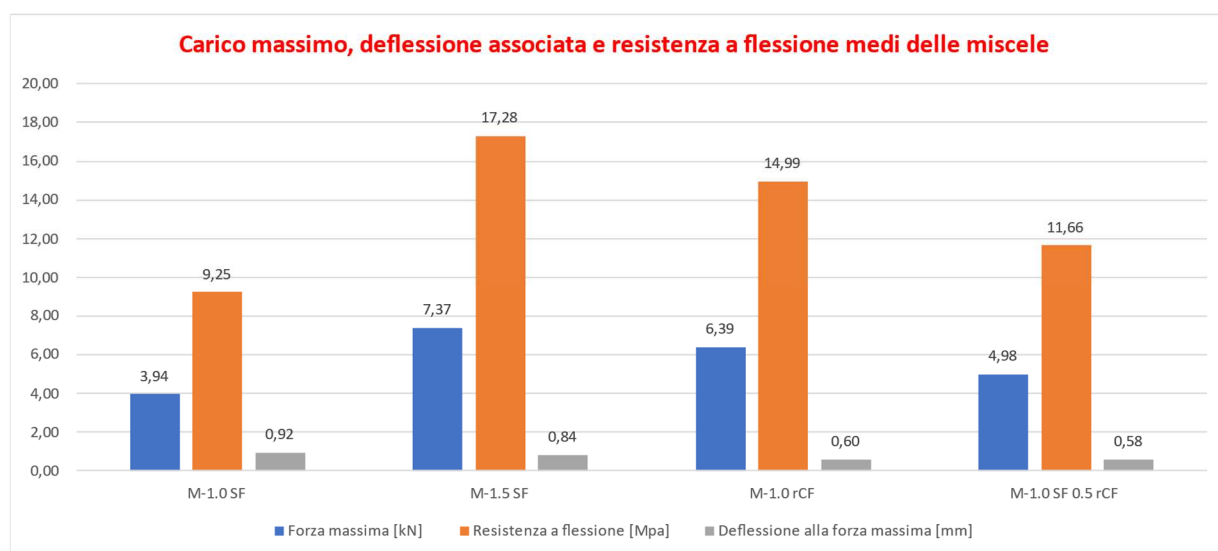


Immagine 38 – Confronto dei valori medi del carico massimo, resistenza a flessione e deflessione alla forza massima per le varie miscele.

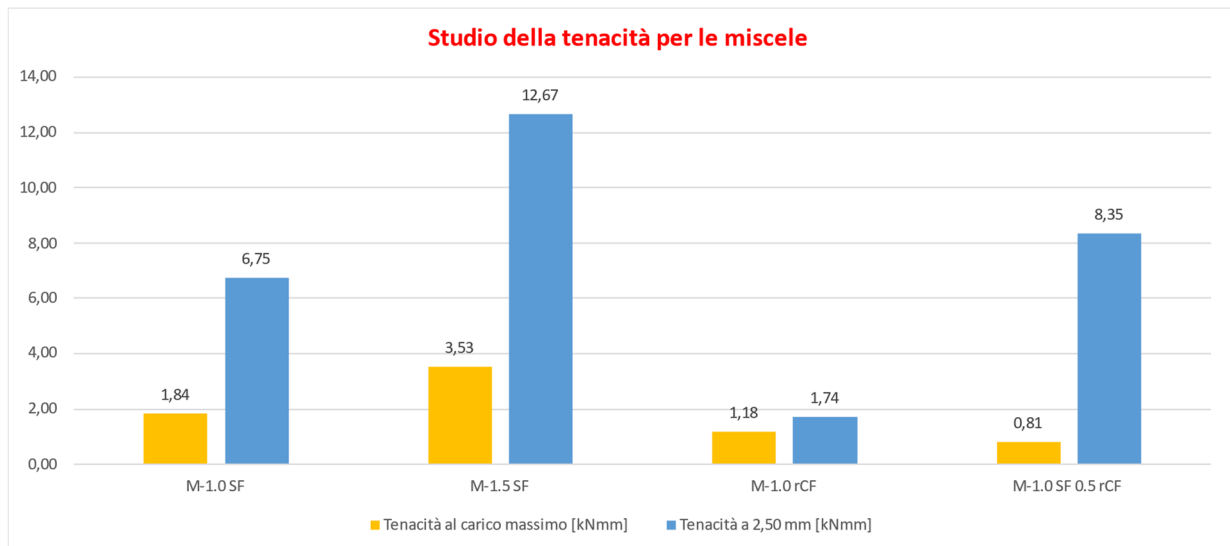


Immagine 39 – Confronto dei valori medi della tenacità, sia per il carico massimo che per il limite di 2.50 mm

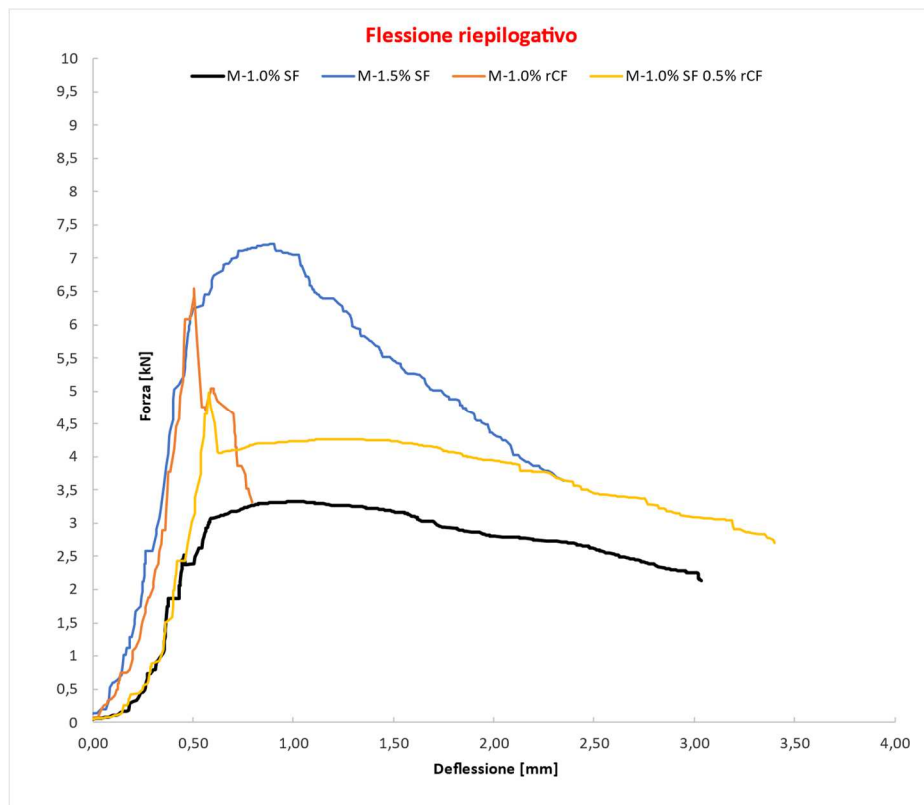


Immagine 40 – Grafici forza-deflessione riepilogativi del comportamento delle miscele testate a flessione

In base ai risultati della prova a flessione, esposti in questo capitolo (4.3) si possono fare le seguenti considerazioni:

- La miscela realizzata con l'1.5% di fibre d'acciaio (M-1.5 SF) appare essere la migliore sotto ogni punto di vista, infatti presenta i risultati maggiori in termini di tenacità e resistenza.

Notando il grafico forza-deflessione si può notare anche come il provino realizzato con questa miscela abbia una rigidità superiore alle altre miscele.

Rispetto alla miscela M-1.0 SF ha un tratto plastico meno marcato, fatto normale a causa della maggiore aggiunta di fibre. Ma nonostante questo ha una tenacità al limite dei 2.50 mm maggiore, riesce quindi ad assorbire una quantità maggiore di energia prima di arrivare a rottura, fatto auspicabile per l'utilizzo in ambito edile.

Altro fatto apprezzabile delle miscele con solo fibre d'acciaio è quello che dopo l'inesco della frattura ha un tratto plastico degradante che inizia gradualmente senza nessun brusco cedimento, cosa che invece si è avuta con la miscela M-1.0 SF 0.5 rCF.

- L'utilizzo di sole fibre di carbonio riciclate, testato con la miscela M-1.0 rCF non ha dato buoni risultati con questa prova, la cosa più apparente è la sua fragilità con un campo plastico inesistente. Nonostante abbia una resistenza più alta delle altre miscele (eccetto M-1.5 SF) ha valori di tenacità praticamente nulli se confrontati.
- Confrontando le miscele M-1.0 SF e M-1.0 SF 0.5 rCF si può notare come l'aggiunta delle fibre di carbonio riciclate abbia provocato un aumento della resistenza. Ne consegue osservando la tenacità che la miscela M-1.0 SF ha un comportamento elastico migliore, con una maggiore energia dissipata. Mentre la M-1.0 SF 0.5 rCF ha un comportamento plastico migliore con una maggiore energia dissipata se si considera anche questa parte. Presenta infatti una duttilità maggiore rispetto alla miscela con solo fibre di acciaio, con la rottura che avviene con una deflessione maggiore e senza perdite eccessive di resistenza.

#### **4.4 – Prova a compressione**

Si elencano in questo capitolo i risultati ottenuti dalla prova compressione monoassiale eseguita secondo la norma UNI EN 1015-11<sup>28</sup>. Per facilitare la comprensione del comportamento delle miscele tutti i grafici sono stati inseriti nella stessa scala.

I risultati sono:



#### 4.4.1 – Risultati prova a compressione M-1.0 SF

Provino	Lato	Carico massimo [kN]	Spostamento al carico massimo [mm]	Resistenza a compressione [MPa]
A	sx	145.74	1.71	91.08
	dx	133.44	1.60	83.40
B	sx	148.22	1.51	92.64
	dx	139.94	1.48	87.46
C	sx	131.94	1.32	82.47
	dx	134.07	1.49	83.80
<i>Media</i>		<i>138.89</i>	<i>1.52</i>	<i>86.81</i>
<i>CoV</i>		<i>0.05</i>	<i>0.09</i>	<i>0.05</i>

Tabella 13 – Risultati prova a compressione miscela M-1.0 SF

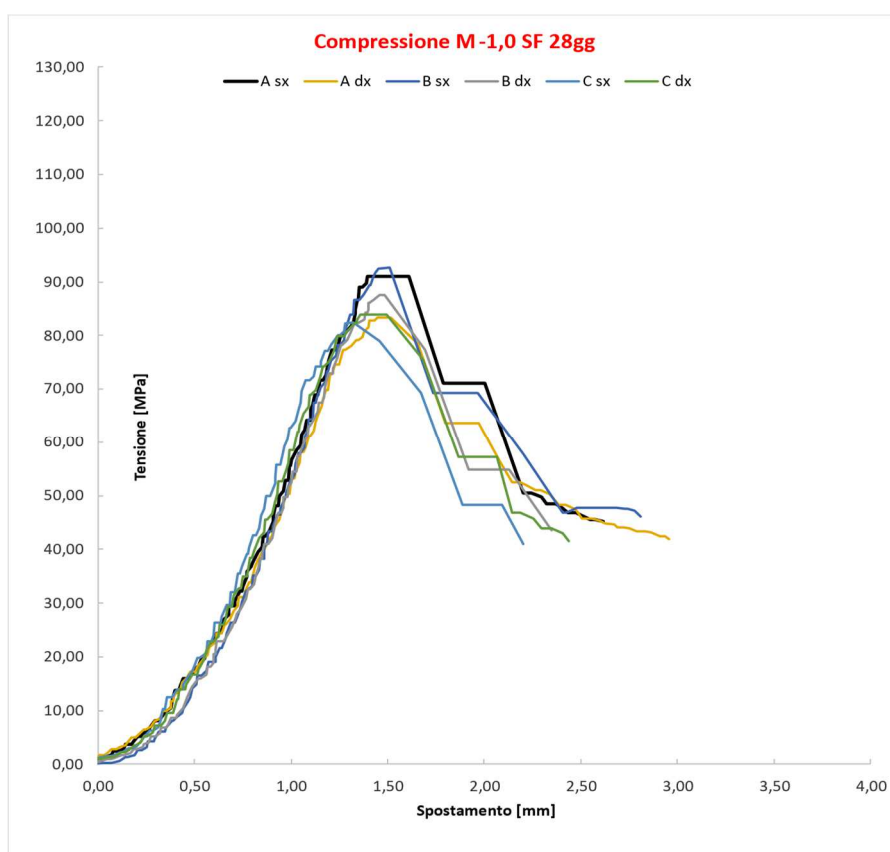


Immagine 41 – Curva tensione-spostamento della prova a compressione miscela M-1.0 SF

#### 4.4.2 – Risultati prova a compressione M-1.5 SF

Provino	Lato	Carico massimo [kN]	Spostamento al carico massimo [mm]	Resistenza a compressione [MPa]
A	sx	177.99	1.61	111.25
	dx	165.72	1.62	103.57
B	sx	176.54	1.53	110.34
	dx	168.33	1.58	105.21
C	sx	177.39	1.67	110.87
	dx	174.53	1.99	109.08
<i>Media</i>		<i>173.42</i>	<i>1.67</i>	<i>108.39</i>
<i>CoV</i>		<i>0.03</i>	<i>0.10</i>	<i>0.03</i>

Tabella 14 – Risultati prova a compressione miscela M-1.5 SF

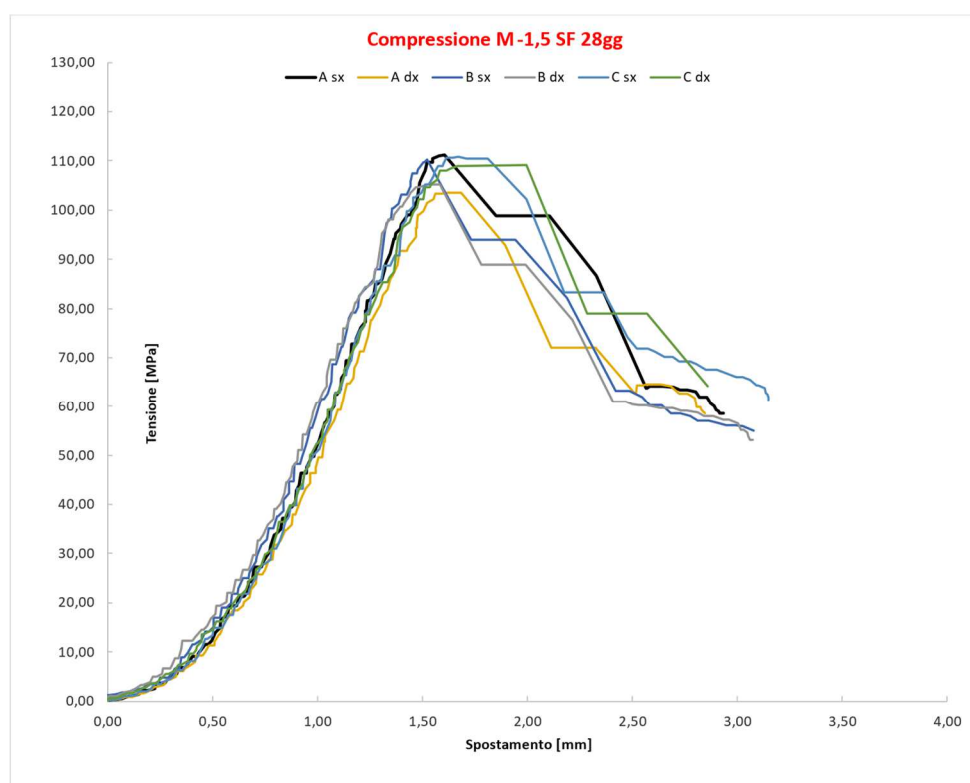


Immagine 42 – Curva tensione-spostamento della prova a compressione miscela M-1.5 SF

#### 4.4.3 – Risultati prova a compressione M-1.0 rCF

Provino	Lato	Carico massimo [kN]	Spostamento al carico massimo [mm]	Resistenza a compressione [MPa]
A	sx	163.27	1.56	102.04
	dx	186.31	1.61	116.44
B	sx	141.00	1.78	88.12
	dx	162.96	1.31	101.85
C	sx	160.33	1.60	100.21
	dx	170.19	1.37	106.37
<i>Media</i>		<i>164.01</i>	<i>1.54</i>	<i>102.50</i>
<i>CoV</i>		<i>0.09</i>	<i>0.11</i>	<i>0.09</i>

Tabella 15 – Risultati prova a compressione miscela M-1.0 rCF

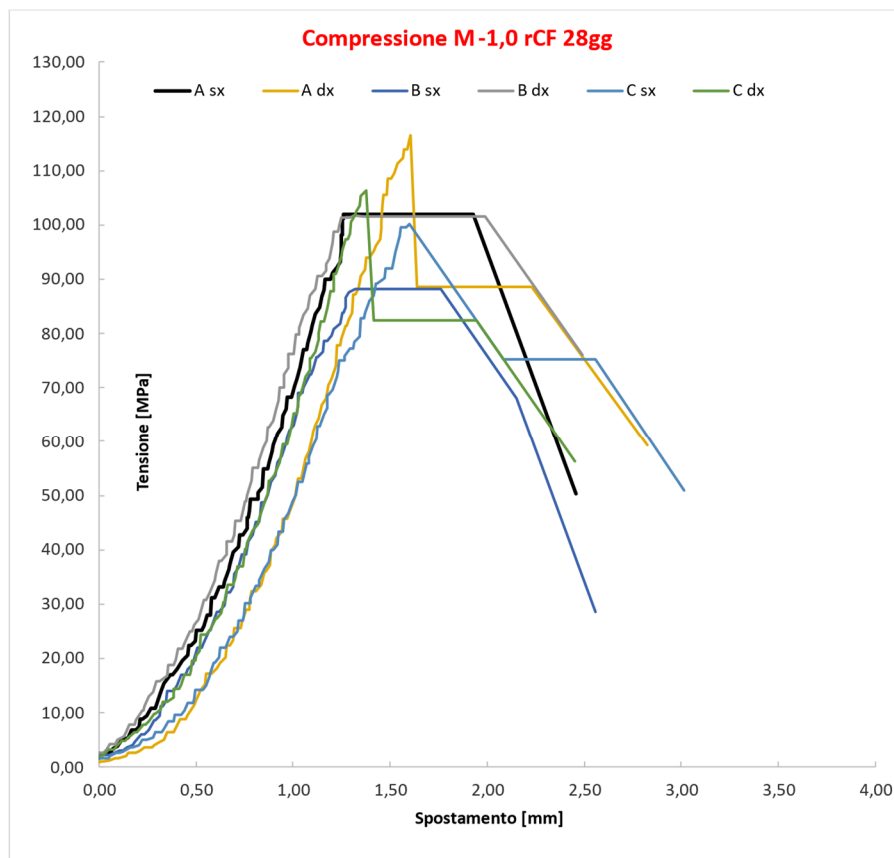


Immagine 43 – Curva tensione-spostamento della prova a compressione miscela M-1.0 rCF

#### 4.4.4 – Risultati prova a compressione M-1.0 SF 0.5 rCF

Provino	Lato	Carico massimo [kN]	Spostamento al carico massimo [mm]	Resistenza a compressione [MPa]
A	sx	168.77	1.46	105.48
	dx	173.48	1.69	108.27
B	sx	174.22	1.66	108.89
	dx	154.75	1.35	96.72
C	sx	168.64	1.62	105.40
	dx	165.93	1.69	103.71
<i>Media</i>		<i>167.59</i>	<i>1.58</i>	<i>104.74</i>
<i>CoV</i>		<i>0.04</i>	<i>0.09</i>	<i>0.04</i>

Tabella 16 – Risultati prova a compressione miscela M-1.0 SF 0.5 rCF

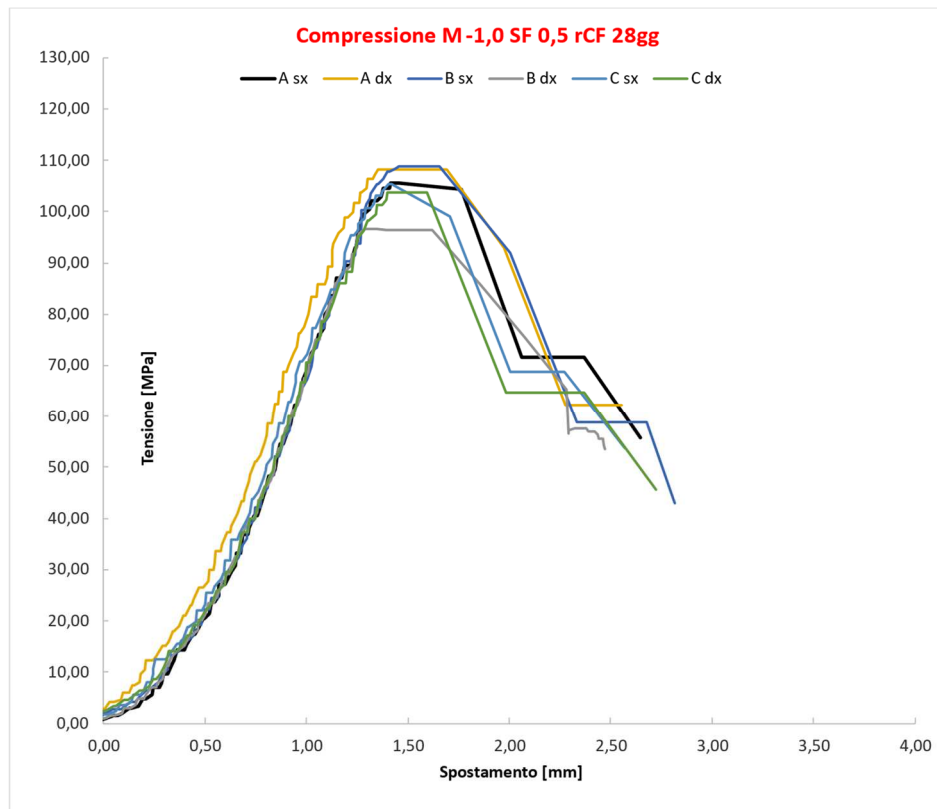


Immagine 44 – Curva tensione-spostamento della prova a compressione miscela M-1.0 SF 0.5 rCF

#### 4.4.5 – Analisi risultati della prova a compressione

Miscela	Carico massimo [kN]	Spostamento al carico massimo [mm]	Resistenza a compressione [MPa]
M-1.0 SF	138.89	1.52	86.81
M-1.5 SF	173.42	1.67	108.39
M-1.0 rCF	164.01	1.54	102.50
M-1.0 SF 0.5 rCF	167.59	1.58	104.74

Tabella 17 – Risultati medi delle prove a compressione

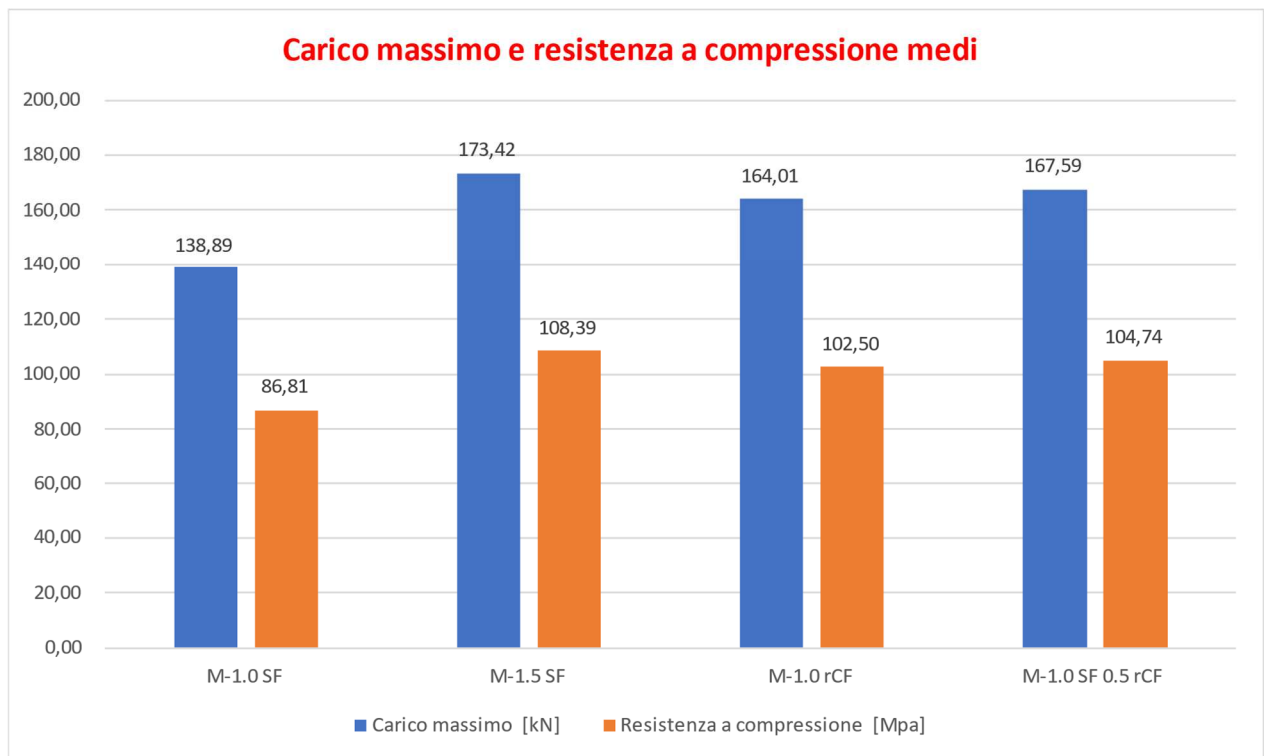


Immagine 45 – Valori medi del carico massimo e della resistenza compressione per le miscele testate

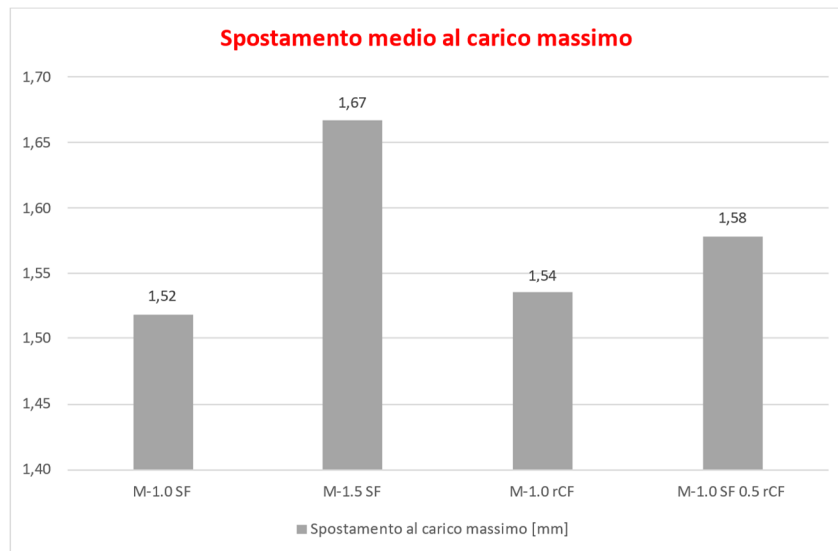


Immagine 46 – Spostamenti medi associati al carico massimo per le miscele testate

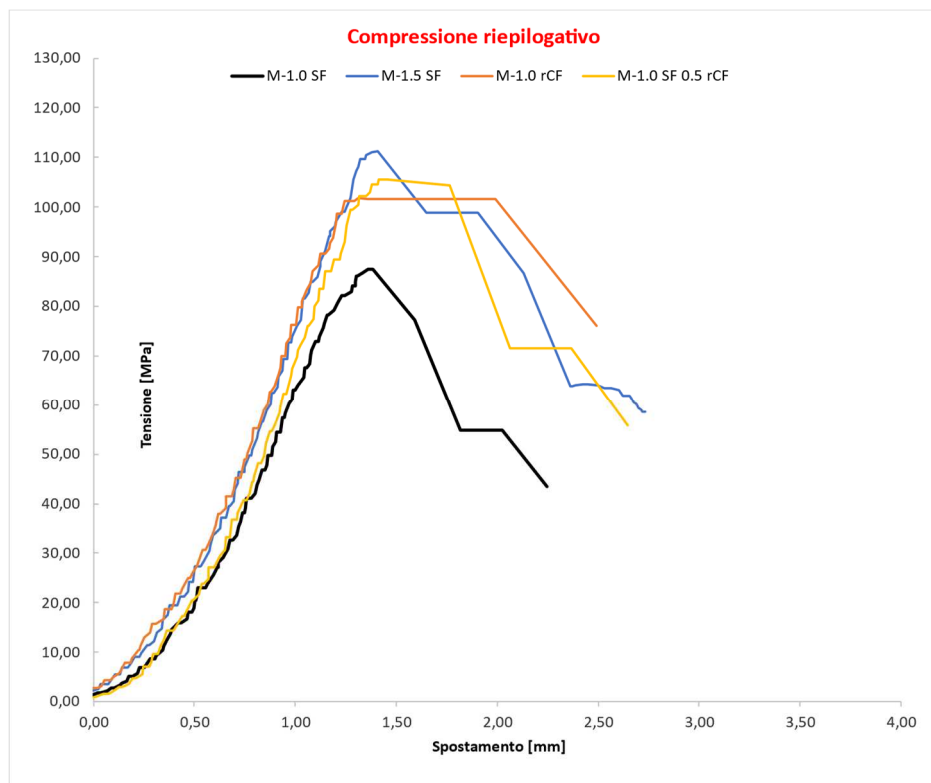


Immagine 47 – Grafici riepilogativi del comportamento delle miscele testate a compressione

In base ai risultati della prova a compressione, esposti in questo capitolo (4.4) si possono fare le seguenti considerazioni:

- La miscela con l'1.5% di fibre d'acciaio (M-1.5 SF) è la migliore per quanto riguarda la resistenza a compressione. Oltre a questo il suo comportamento duttile degradante le

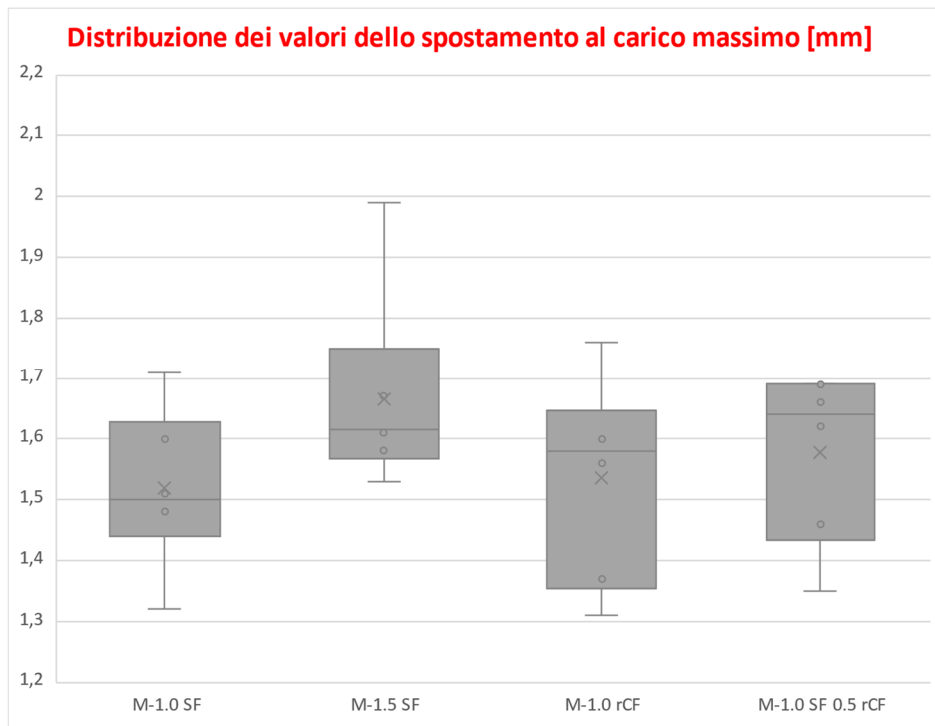
assicura anche una dissipazione ampia di energia prima di arrivare a rottura, che quindi non avviene di schianto.

Anche le altre miscele però sono riuscite a ottenere valori di resistenza a compressione molto alti (> 100 MPa) con una differenza di valori di 4 MPa. Questo discorso non è valido solamente per la miscela M-1.0 SF che è stata in grado di resistere 86.81 MPa, quindi 20 MPa circa in meno delle altre.

- L'utilizzo di sole fibre di carbonio riciclate, testato con la miscela M-1.0 rCF, sebbene capace di una resistenza a compressione alta (102.50 MPa), ha prodotto una miscela estremamente fragile. Infatti con tutte le altre miscele testate le fibre hanno assicurato una rottura non di schianto, con un tratto plastico degradante piuttosto marcato, dimostrando quindi di essere in grado di ricucire le fratture del provino. Cosa che invece non si è avuta nella M-1.0 rCF, che una volta arrivata alla resistenza massima si rompeva di schianto con proiezione di frammenti di provino, che di conseguenza a prova ultimata era praticamente disintegrato.
- Confrontando le miscele M-1.0 SF e M-1.0 SF 0.5 rCF si può notare come l'aggiunta delle fibre di carbonio riciclate abbia provocato un aumento delle prestazioni della miscela che si è rotta con una resistenza maggiore. Da notare il tratto plastico delle due miscele che presenta un andamento molto simile, solamente sfalsato, e il piccolo "pianerottolo" del grafico della miscela M-1.0 SF 0.5 rCF una volta arrivata alla sua sollecitazione massima .

Si può quindi ipotizzare che l'aumento della resistenza a compressione nella miscela M-1.0 SF 0.5 rCF sia da imputare all'aggiunta di fibra di carbonio, che una volta arrivata alla sollecitazione massima che è in grado di reggere si rompe di schianto. Una volta che questo accade rimane solamente la fibra d'acciaio a ricucire le fessure nel provino, esattamente come avviene nel caso della M-1.0 SF.

- Lo spostamento associato al carico massimo nelle miscele testate è paragonabile tra tutte le miscele, al netto di pochi valori anomali. Questo è ben visibile andando a studiare la distribuzione dei dati, effettuata con la tecnica della "scatola e baffi". Facendo così si può notare la sovrapposizione della maggior parte dei quartili e l'allungamento dei "box" causati da valori anomali.



*Immagine 48 – Distribuzione dei valori dello spostamento per le miscele nella prova a compressione*

#### **4.5 – Prova di trazione diretta**

Si elencano in questo capitolo i risultati della prova di trazione diretta eseguita secondo le indicazioni reperite in letteratura<sup>2, 29, 30</sup> sui provini “a osso di cane”. Per facilitare la comprensione dei risultati delle prove sulle miscele tutti i grafici sono stati inseriti nella stessa scala.

I risultati sono:



#### 4.5.1 – Risultati prova a trazione diretta M-1.0 SF

Provino	Tensione massima [MPa]	Deformazione alla tensione massima [%]
A	2.92	4.50
B	2.86	3.09
C	3.90	3.64
<i>Media</i>	<i>3.23</i>	<i>3.74</i>
<i>CoV</i>	<i>0.18</i>	<i>0.19</i>

Tabella 18 -Risultati prova a trazione diretta miscela M-1.0 SF

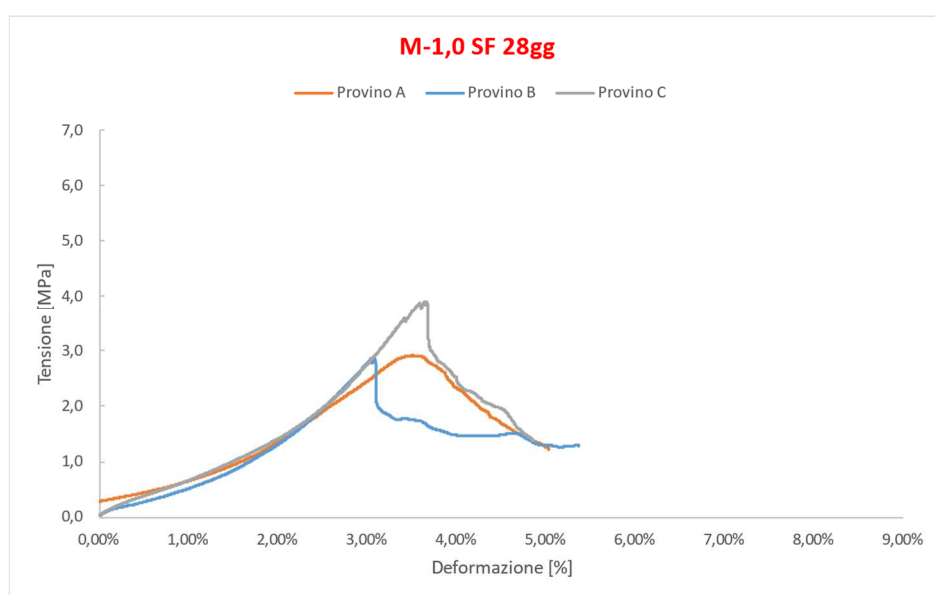


Immagine 49 – Curva sforzo-deformazione della prova a trazione diretta della miscela M-1.0 SF



Immagine 50 – Provini della miscela M-1.0 SF a prova ultimata

#### 4.5.2 – Risultati prova a trazione diretta M-1.5 SF

Provino	Tensione massima [MPa]	Deformazione alla tensione massima [%]
A	5.82	5.19
B	5.72	6.05
C	6.85	4.63
<i>Media</i>	<i>6.13</i>	<i>5.29</i>
<i>CoV</i>	<i>0.10</i>	<i>0.14</i>

Tabella 19 – Risultati prova a trazione diretta miscela M-1.5 SF

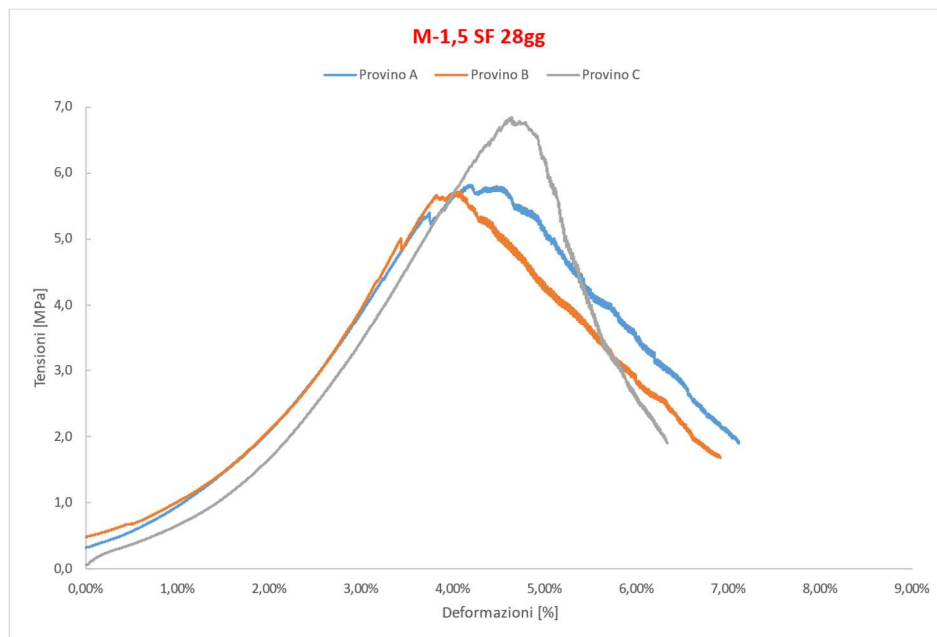


Immagine 51 – Curva sforzo deformazione della prova a trazione diretta della miscela M-1.5 SF, da notare l'ampio campo plastico degradante



Immagine 52 – Provini della miscela M-1.5 SF a prova ultimata

#### 4.5.3 – Risultati prova a trazione diretta M-1.0 rCF

Provino	Tensione massima [MPa]	Deformazione alla tensione massima [%]
A	5.40	4.51
B	3.57	4.36
<i>Media</i>	<i>4.48</i>	<i>4.44</i>
<i>CoV</i>	<i>0.29</i>	<i>0.02</i>

Tabella 20 – Risultati prova a trazione diretta miscela M-1.0 rCF

Per questa miscela sono stati utilizzati solamente due provini a causa della poca miscela realizzata, insufficiente per la realizzazione di un terzo provino.

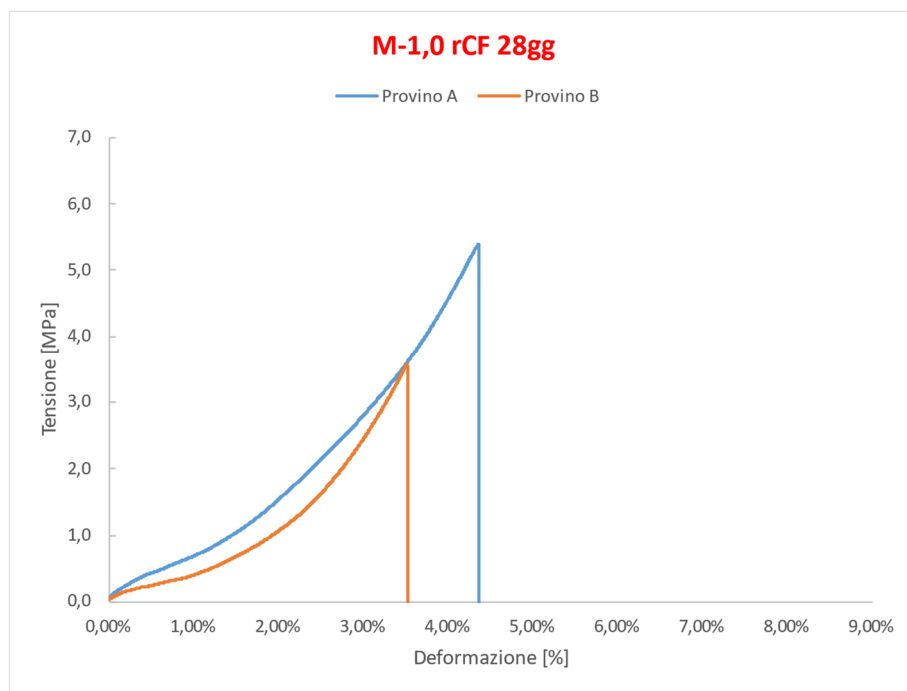
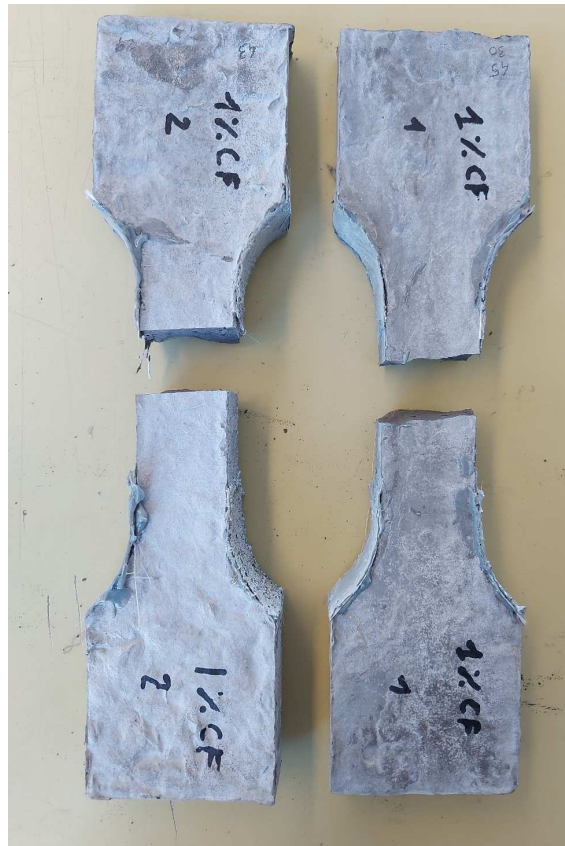
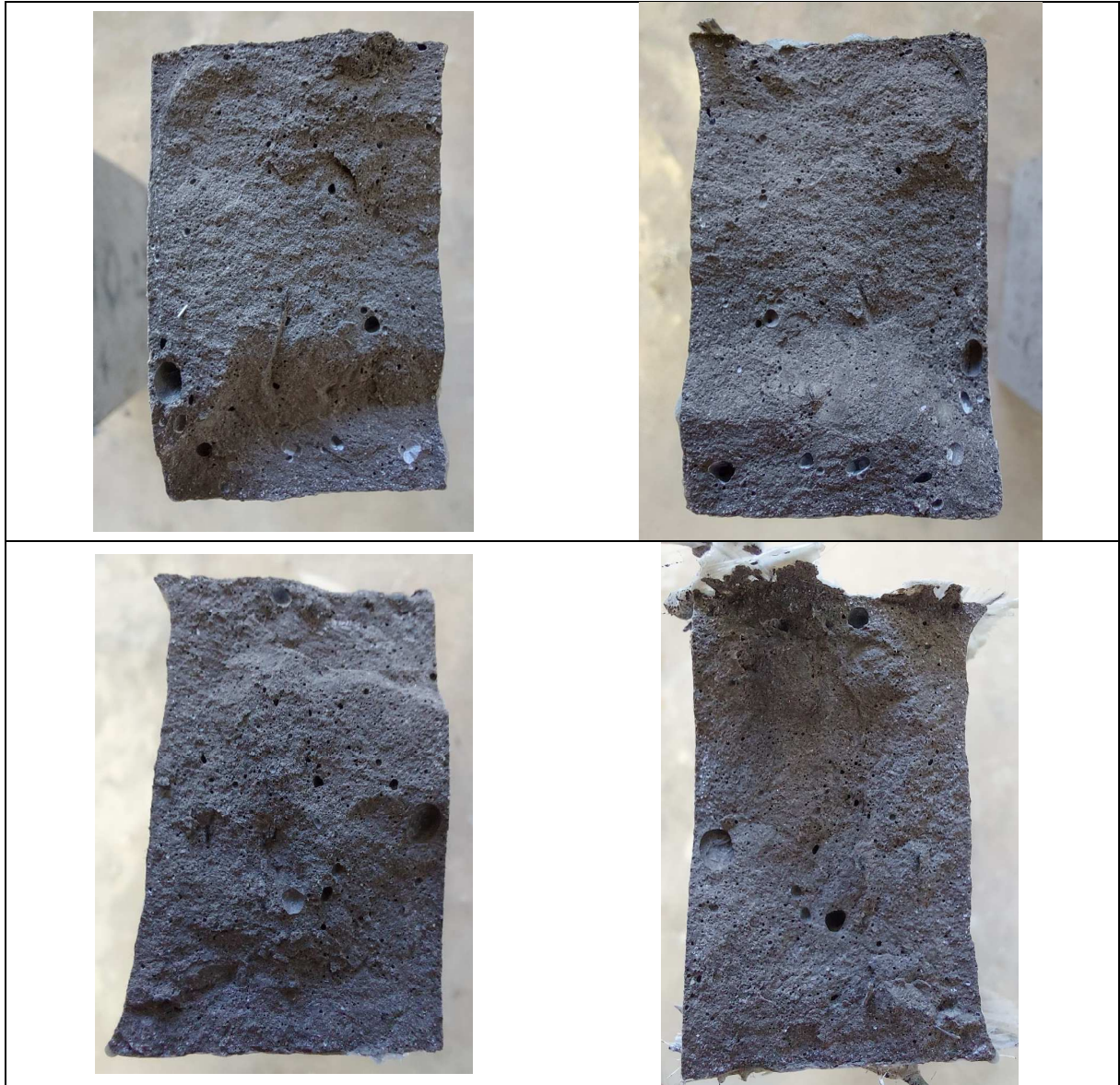


Immagine 53 – Curva sforzo deformazione della prova a trazione diretta della miscela M-1.0 rCF, da notare la rottura fragile senza alcun campo plastico



*Immagine 54 – Provini della miscela M-1.0 rCF a prova ultimata, da notare la rottura netta con la separazione delle due metà*

Cosa particolare che si è notata in questo tipo di miscela, oltre alla rottura fragile, è l'elevata differenza di resistenza tra i due provini testati. Osservando la sezione di rottura dei due provi si è notato come a causa della bassa lavorabilità dell'impasto siano presenti bolle d'aria del diametro di circa 1 mm. In particolare nel provino che ha dato la resistenza minore (provino B) queste bolle erano in quantità maggiore, con una di diametro di circa 3 mm che attraversava la due facce della sezione di fessura. Potrebbe essere proprio questa bolla il punto di debolezza da dove si è innescata la rottura del provino. Si rimanda comunque ad analisi più approfondite al microscopio per lo studio di questi difetti e anche del comportamento e distribuzione delle fibre di carbonio.



*Tabella 21 – Le due estremità dei provini rotti, sopra il provino A e sotto il B. Da notare le bolle d’aria intrappolate, specialmente nel provino B dove è riconoscibile anche la bolla da 3 mm circa che attraversa la sezione di rottura.*

#### 4.5.4 – Risultati prova a trazione diretta M-1.0 SF 0.5 rCF

Provino	Tensione massima [MPa]	Deformazione alla tensione massima [%]
A	5.05	5.05
B	6.23	5.05
C	6.40	5.02
<i>Media</i>	<i>5.89</i>	<i>5.04</i>
<i>CoV</i>	<i>0.13</i>	<i>0.00</i>

Tabella 22 – Risultati prova a trazione miscela M-1.0 SF 0.5 rCF

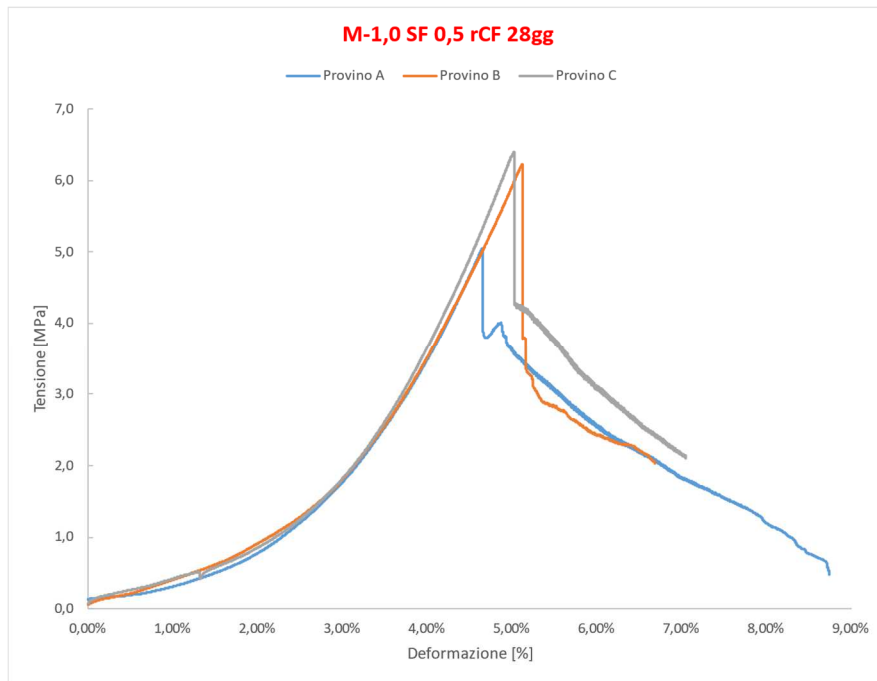


Immagine 55 – Curva sforzo deformazione della prova a trazione della miscela M-1.0 SF 0.5 rCF





Immagine 56 – Provini della miscela M-1.0 SF 0.5 rCF a prova ultimata

#### 4.5.5 – Analisi risultati della prova a trazione diretta

Miscela	Tensione massima [MPa]	Deformazione alla tensione massima [%]
M-1.0 SF	3.23	3.74
M-1.5 SF	6.13	5.29
M-1.0 rCF	4.48	4.44
M-1.0 SF 0.5 rCF	5.89	5.04

Tabella 23 – Risultati medi della prova a trazione diretta

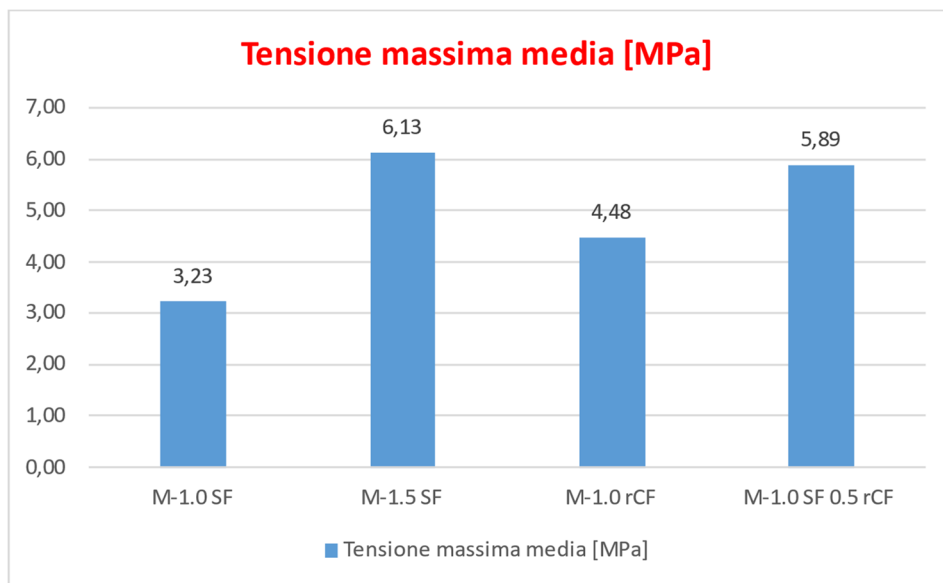


Immagine 57 – Tensione massima media di rottura delle varie miscele testate con la prova di trazione diretta

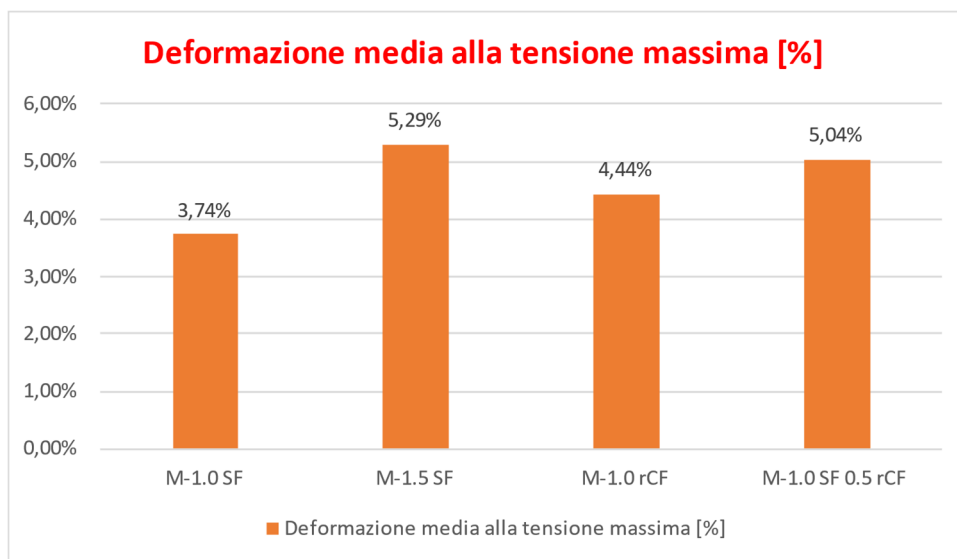


Immagine 58 - Deformazione associata alla tensione massima media delle varie miscele testate con la prova di trazione diretta

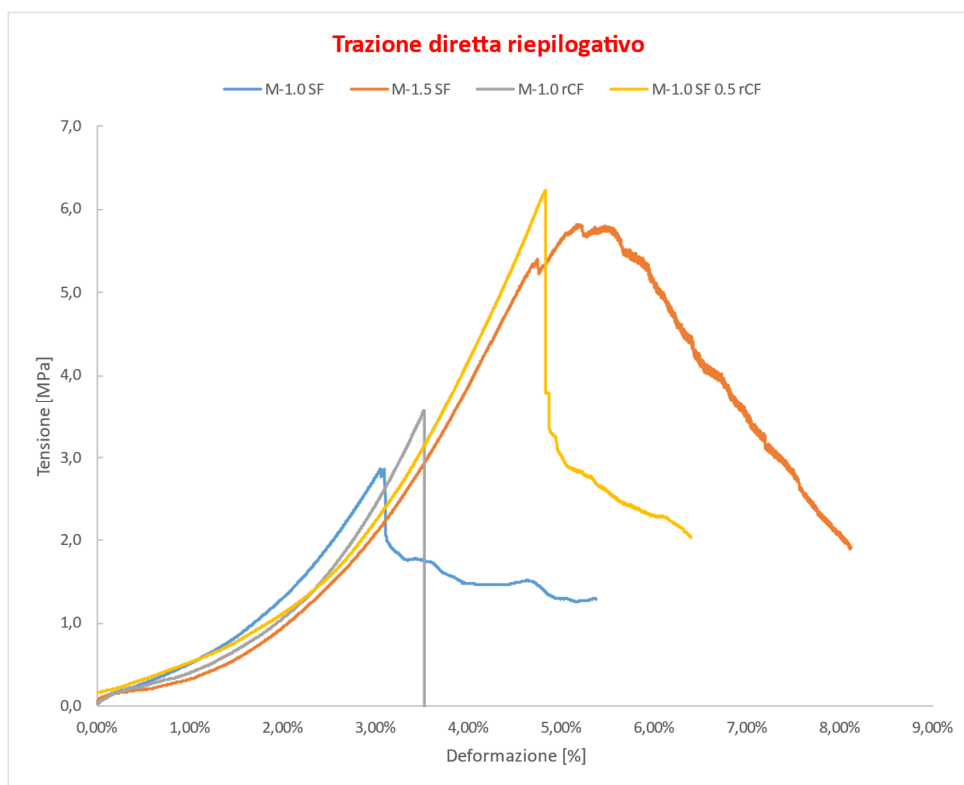


Immagine 59 – Grafici riepilogativi del comportamento delle miscele testate a trazione diretta

In base ai risultati della prova a trazione diretta, esposti in questo capitolo (4.5) si possono fare le seguenti considerazioni:

- La miscela con l'1.5% di fibre d'acciaio (M-1.5 SF) è la miscela che nel corso di questa prova ha dato i risultati migliori, anche se confrontabili in termini di resistenza massima alla M-1.0 SF 0.5 rCF. A differenza di quest'ultima però la miscela con la sola fibra d'acciaio è stata capace di sviluppare un campo plastico degradante di maggiore estensione, privo di qualsiasi rottura fragile. Cosa che invece si nota nella M-1.0 SF 0.5 rCF, dove a seguito del picco di resistenza si ha una perdita improvvisa di resistenza dovuta probabilmente alla perdita dell'effetto dato dalla fibra di carbonio, per rottura o sfilamento.

Per quanto riguarda le resistenze medie di queste due miscele esse hanno valori pressoché simili, anche se quello della M-1.5 SF si è dimostrato leggermente più alto. In termini di deformazione entrambe le miscele (M-1.5 SF e M-1.0 SF 0.5rCF) hanno dato i risultati migliori, sia in termini di deformazioni associate alla tensione massima che a quella ultima.

- La miscela M-1.0 rCF ha dato pessimi risultati ottenendo valori di resistenza alla trazione e deformazione non soddisfacenti se paragonati alle altre miscele. Il dato peggiore però è quello della rottura, di tipo fragile con il completo distacco delle due metà del provino a seguito del raggiungimento della tensione massima. Altro aspetto preoccupante è la

differenza in termini di tensione resistente massima tra i due provini (1.83 MPa), valore molto elevato se paragonato alla sua resistenza media, corrispondente al 40%.

- Parlando delle miscele M-1.0 SF e M-1.0 SF 0.5 rCF è netto il miglioramento del comportamento con l'aggiunta della fibra di carbonio. Infatti sono quasi raddoppiate sia la tensione massima resistente, che il valore associato della deformazione.
- In questa prova è stato ben visibile il comportamento fragile della fibra di carbonio, che ha provocato tratti di perdita di resistenza in tutte le miscele in cui è stata impiegata (M-1.0 rCF e M-1.0 SF 0.5 rCF). Questo può essere associato alla rottura delle fibre presenti nel getto, specialmente nel caso della M-1.0 rCF dove si ha il netto distacco delle due metà del provino.

## 4.6 – Correlazioni sperimentali

Nella letteratura tecnica e anche nella normativa si possono trovare correlazioni empiriche che permettono di stimare la resistenza a trazione del calcestruzzo partendo da altre prestazioni meccaniche. Quel che si vuole fare ora è una breve indagine per analizzare come le miscele testate si confrontano a queste correlazioni. Si sono scelte in particolare due tipi di correlazioni:

- Da DM 17/1/2018<sup>1</sup>, capitolo 11.2.10.2. equazione 11.2.3b (classe > C50/60) che prevede di partire dalla resistenza media a compressione cilindrica. Fatto che rende necessario il suo calcolo a partire dalla resistenza cubica media a compressione secondo le indicazioni relative all'equazione 11.2.1.

### 11.2.10.1 RESISTENZA A COMPRESSIONE

In sede di progetto strutturale si farà riferimento alla resistenza caratteristica a compressione su cubi  $R_{ck}$  così come definita nel § 11.2.1

Dalla resistenza cubica si passerà a quella cilindrica da utilizzare nelle verifiche mediante l'espressione:

$$f_{ck} = 0,83 \cdot R_{ck} \quad [11.2.1]$$

Sempre in sede di previsioni progettuali, è possibile passare dal valore caratteristico al valor medio della resistenza cilindrica mediante l'espressione

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad [11.2.2]$$

### 11.2.10.2 RESISTENZA A TRAZIONE

La resistenza a trazione del calcestruzzo può essere determinata a mezzo di diretta sperimentazione, condotta su provini appositamente confezionati, secondo la norma UNI EN 12390-2:2009, per mezzo delle prove di seguito indicate:

- prove di trazione diretta;
- prove di trazione indiretta: (secondo UNI EN 12390-6:2010 o metodo dimostrato equivalente);
- prove di trazione per flessione: (secondo UNI EN 12390-5:2009 o metodo dimostrato equivalente).

In sede di progettazione si può assumere come resistenza media a trazione semplice (assiale) del calcestruzzo il valore (in N/mm<sup>2</sup>):

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{per classi} \leq C50/60 \quad [11.2.3a]$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln [1 + f_{cm}/10] \quad \text{per classi} > C50/60 \quad [11.2.3b]$$

valori che dovranno essere ridotti del 10% in caso di utilizzo di aggregati grossi di riciclo nei limiti previsti dalla Tab. 11.2.III.

I valori caratteristici corrispondenti ai frattili 5% e 95% sono assunti, rispettivamente, pari a  $0,7 f_{ctm}$  ed  $1,3 f_{ctm}$ .

*Immagine 60 - Formule da DM 17/01/2018 capitolo 11.2.10 utilizzate per la correlazione*

I risultati ottenuti sono:

Miscela	Resistenza media a compressione [MPa]	Resistenza a trazione da correlazione [MPa]	Resistenza a trazione media [MPa]	Differenza [%]
M-1.0 SF	86.81	4.46	3.23	38.14
M-1.5 SF	108.39	4.88	6.13	-20.38
M-1.0 rCF	102.50	4.77	4.48	6.57
M-1.0 SF 0.5 rCF	104.74	4.82	5.89	-18.24

Tabella 24 – Risultati correlazione empirica per il calcolo della resistenza a trazione secondo quanto previsto dal DM 17/1/2018 capitolo 11.

Come evidenziato dall'ultima colonna della precedente tabella questa correlazione ha prodotto risultati accettabili solamente nel caso della M-1.0 rCF. In tutti gli altri casi si ha un errore talmente grande da renderla inutile (M-1.0 SF) o adatta solamente a valutazioni iniziali molto speditive (M-1.5 SF e M-1.0 SF 0.5 rCF). Da notare anche che l'errore prodotto varia di segno, rendendo ancora più difficile l'interpretazione e la correzione di un eventuale risultato.

- Da Model Code 2010<sup>2</sup> della FIB, capitolo 5.1.5.1. equazione 5.1-8, in questo caso si parte dalla resistenza a flessione media, considerando l'altezza del provino (40 mm).

In order to estimate the mean axial tensile strength  $f_{ctm}$  from the mean flexural tensile strength  $f_{ct,fl}$  Eq. (5.1-8) can be used:

$$f_{ctm} = A_{fl} \cdot f_{ct,fl} \quad (5.1-8)$$

where:

$f_{ct,fl}$  is the mean flexural tensile strength

$$A_{fl} = \frac{\alpha_{fl} \cdot h_b^{0.7}}{1 + \alpha_{fl} \cdot h_b^{0.7}}$$

$h_b$  is beam depth [mm]

$$\alpha_{fl} = 0.06$$

Immagine 61 – Formule da Model Code 2010 capitolo 5.1.5.1 equazione 5.1-8 utilizzate per la correlazione

I risultati ottenuti sono:

Miscela	Resistenza media a flessione [MPa]	Resistenza a trazione da correlazione [MPa]	Resistenza a trazione media [MPa]	Differenza [%]
M-1.0 SF	9.25	4.09	3.23	26.71
M-1.5 SF	17.28	7.65	6.13	24.73
M-1.0 rCF	14.99	6.63	4.48	48.05
M-1.0 SF 0.5 rCF	11.66	5.16	5.89	-12.41

Tabella 25 – Risultati correlazione empirica per il calcolo della resistenza a trazione secondo quanto previsto dal Model Code 2010 capitolo 5

Anche in questo caso si conferma il grande errore di stima per tutte le miscele oggetto della sperimentazione, solamente la M-1.0 SF 0.5 rCF ha avuto un errore “accettabile” prossimo al 10%. L’utilizzo di questa correlazione per tutte le altre miscele sarebbe possibile solamente quando si debbono fare valutazioni speditive che non richiedono molta precisione.

Dopo aver visto i risultati delle correlazioni proposte dai testi del DM 17/1/2018<sup>1</sup> e dal Model Code 2010<sup>2</sup> si può dire che le loro correlazioni non sono adatte alle miscele testate nel corso di questa ricerca. Raramente si è riusciti a ottenere una precisione al di sotto del 10%, rendendo quindi il loro utilizzo poco sicuro, specialmente quando si richiede una stima precisa.

## 5 – Conclusioni

Alla luce di quanto discusso nelle pagine precedenti si può dire che con l'utilizzo degli UHPC LC<sup>3</sup> in edilizia si potrebbero ottenere vantaggi non trascurabili. Ha dimostrato infatti di essere un materiale compatibile con le problematiche ambientali che la nostra epoca ci pone, ma che non per questo sacrifica altre caratteristiche cruciali nell'ambito edilizio come prestazioni meccaniche o facilità di messa in opera. In particolare, dalla sperimentazione eseguita, tenuti in considerazione tutti i fattori si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Tra tutte le miscele impiegate la migliore è risultata essere la "M-1.5 SF" realizzata solamente con l'aggiunta dell'1.5% di fibra d'acciaio. In tutte le prove eseguite ha dato prova di essere capace di prestazioni meccaniche di rilievo, senza però sacrificare la lavorabilità. Aspetto positivo di questa miscela è quello per cui in ogni prova ha avuto sempre un comportamento duttile con un ampio tratto plastico degradante, privo di qualsiasi segno di rottura fragile, anche parziale.

Sono poche le altre miscele, che in alcuni ambiti solamente, hanno dimostrato di comportarsi bene come la "M-1.5 SF". Si tratta della "M-1.0 SF", leggermente migliore dal punto di vista della lavorabilità, e della "M-1.0 SF 0.5 rCF", che ha prestazioni paragonabili a compressione e a trazione. Queste miscele però a differenza della "M-1.5 SF" non sono state in grado di avere il suo comportamento plastico o le sue prestazioni, rendendola quindi preferibile.

- L'aggiunta delle fibre di carbonio riciclate negli UHPC LC<sup>3</sup> si è dimostrato possibile, anche se con il tipo di fibre utilizzate si è dimostrato problematico. Le miscele che contenevano fibre di carbonio riciclate (M-1.0 rCF e M-1.0 SF 0.5 rCF) infatti hanno dato problemi di lavorabilità e di rottura fragile, senza portare a vantaggi tangibili in fatto di prestazioni meccaniche rispetto all'utilizzo della fibra d'acciaio. La rottura fragile si è notata in tutte le prove con le miscele contenenti fibra di carbonio riciclata, con la differenza che nella miscela "M-1.0 SF 0.5 rCF" si evitava la rottura di schianto per via dell'effetto dato dalla fibra d'acciaio. Cosa che invece si è avuta in ogni prova eseguita con la "M-1.0 rCF", che ha mostrato un comportamento fragile in ogni occasione senza portare a resistenze o rigidità maggiori rispetto alle altre miscele.

La bassa lavorabilità poi ha portato ad altre problematiche, infatti si è notata la difficoltà di utilizzo di questa miscela in applicazioni tipiche dell'edilizia, come il getto in una cassaforma. Senza contare poi la difficoltà di realizzare elementi resistenti che non contengano al loro interno bolle d'aria, anche di dimensione considerevoli. Quest'ultimo aspetto è molto importante per garantire la resistenza di un UHPC dove la presenza di difetti anche piccoli deve essere evitata a ogni costo. Un'ultima considerazione sulla lavorabilità riguarda il fatto che una miscela di questo tipo non potrebbe essere utilizzata nelle più recenti applicazioni ancora in fase di sperimentazione, dove gli UHPC vengono

spruzzati<sup>32</sup> per la realizzazione di un rinforzo, in maniera analoga al normale calcestruzzo proiettato. Con riferimento alla lavorabilità allo stato fresco va aggiunto, però, che la tipologia di fibre utilizzate (lunghe, dry e fornite compattate) non era la scelta ottimale per favorire un'ottima fluidità dell'impasto allo stato fresco.

L'unico effetto positivo dato dall'aggiunta di fibre di carbonio riciclate può essere notato confrontando le miscele "M-1.0 SF 0.5 rCF" e "M-1.0 SF", miscele analoghe che si differenziano solo per l'aggiunta dello 0.5% di fibra di carbonio nella prima. La "M-1.0 SF 0.5 rCF" è risultata migliore in termini di comportamento meccanico rispetto alla "M-1.0 SF", con l'aumento di prestazioni imputabile all'aggiunta di fibra di carbonio riciclata. Questa fornisce alla miscela la capacità di resistere maggiormente alle sollecitazioni, mentre la fibra d'acciaio permette di compensare la fragilità della fibra di carbonio riciclata e di avere un comportamento post-fessurativo sufficientemente duttile. Va precisato, però, che si tratta di aumenti di prestazione modesti rispetto alla miscela "M-1.5 SF", che si differenzia dalla "M-1.0 SF" per l'aggiunta dello 0.5% di fibre d'acciaio anziché di carbonio. A maggior ragione risulta preferibile l'impiego della fibra d'acciaio, considerando la difficoltà ulteriore in fase di realizzazione della miscela, data dall'aggiunta di una fibra difficilmente compatibile con la matrice cementizia come la fibra di carbonio riciclata. La fibra d'acciaio in confronto è molto più compatibile in termini di aderenza chimica all'interfaccia e già ampiamente disponibile in commercio per essere utilizzata come rinforzo della matrice cementizia.



## 6 – Sviluppi futuri

Nel corso della sperimentazione che si è eseguita quasi mai si sono notati risultati promettenti con l'utilizzo di fibre di carbonio riciclate. Ma si è dimostrato che questo tipo di rinforzo può essere utilizzato in una matrice cementizia, permettendo di utilizzare un materiale altamente resistente che altrimenti diventerebbe un rifiuto. La sperimentazione in questo campo non dovrebbe essere interrotta ma portata avanti fino a trovare una possibile soluzione ottimale. Un interessante sviluppo futuro potrebbe essere quello di effettuare un'altra sperimentazione come questa ma utilizzando un diverso tipo di fibre di carbonio, anche riciclate. Queste fibre devono essere in grado di legare in maniera efficace con la matrice cementizia, sarebbe auspicabile che siano corte con un rapporto d'aspetto tale da permettere un loro ottimale utilizzo. Altro accorgimento utilizzabile può essere quello di effettuare trattamenti in grado di migliorare l'interfaccia fibre-matrice cementizia.

L'utilizzo di UHPC LC<sup>3</sup> si è dimostrato utile in ambito edilizio, si dovrebbe quindi procedere con la ricerca in questo ambito, permettendo di capire al pieno le sue caratteristiche e potenzialità di utilizzo. Aspetto interessante da andare a indagare è quello riguardo la possibilità di aumento delle sue prestazioni meccaniche, alte ma non tanto quanto quelle di un UHPC classico. In questo senso la sperimentazione potrebbe continuare utilizzando fibre d'acciaio, dato i risultati promettenti che si sono ottenuti, magari in quantitativi maggiori o di tipo differente. Facendo in questo modo si potrebbero ottenere miscele con un campo plastico di tipo incrudente, preferibile rispetto a quello degradante che si è avuto con le miscele testate.

Altro discorso interessante è quello che vede lo studio di nuove miscele UHPC LC<sup>3</sup> capaci di essere utilizzate anche spruzzate. In questo modo si permetterebbe d'intervenire su opere danneggiate in maniera più semplice e rapida rispetto alla tecnica del getto in cassaforma. Permetterebbe poi l'utilizzo di una miscela altamente prestante e a basso impatto ambientale anche in altri ambiti, come quello del consolidamento dei versanti in frana, scavi o gallerie.

## 7 – Bibliografia e sitologia

### 7.1 – Bibliografia

1. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Norme tecniche per le costruzioni. DM 17/1/2018. *Gazz. Uff. della Repubb. Ital.* (2018).
2. Fédération internationale du béton. *Model Code 2010*. (2010).
3. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. *Gazz. Uff. della Repubb. Ital.* (2019).
4. UNI EN. 11039-1 - Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio - Definizioni, classificazione e designazione. (2003).
5. Consiglio superiore lavori pubblici. Linea guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete). (2019).
6. UNI EN. 14651. (2007).
7. Fédération internationale du béton. FIB-24 - Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings. (2003).
8. D.J., C. Cement Replacement Materials. (1986).
9. Kulkarni, A. & Shafei, B. Ultra-high performance concrete building wall panels engineered to resist windborne debris impact. *J. Build. Eng.* (2021).
10. Xiao, R., Song, C., Sun, B., Guo, R. & Chen, H. Design and experimental study of a replaceable steel-UHPC composite bridge deck. *Structures* (2022).
11. M. Schmidt, E. Fehling, C. G. *Ultra High Performance Concrete (UHPC). International Symposium on Ultra High Performance Concrete* (2004).
12. Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S. & Maity, S. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cem. Concr. Res.* (2018).
13. Wang, L. *et al.* On the use of limestone calcined clay cement (LC3) in high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC). *Cem. Concr. Res.* (2021).
14. UNI EN. 197-1 - Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni.
15. Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F. & Scrivener, K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cem. Concr. Res.* (2012).
16. Klye A. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. *Cem. Concr. Compos.* (2008).
17. Park J.J. Influence of the ingredients on the compressive strength of UHPC as a fundamental study to optimize the mixing proportion. (2008).
18. UNI EN. 12620 - Aggregati per calcestruzzo. 12620 (2013).

19. UNI EN. 8520-1 - Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 1: Designazione e criteri di conformità. (2022).
20. UNI EN. 8520-2 - Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 2: Requisiti. (2022).
21. UNI EN. 8520-22 - Metodologia di valutazione della potenziale reattività alcali-silice degli aggregati. (2020).
22. UNI EN. 1008 - Acqua per calcestruzzi. (2003).
23. Corinaldesi, V. & Nardinocchi, A. Influence of type of fibers on the properties of high performance cement-based composites. *Constr. Build. Mater.* (2016).
24. Gao, H. & Xia, Y. Research on the dispersion of carbon fiber and recycled carbon fiber in cement-based materials: a review. *Front. Mater.* (2023).
25. Shan, B., Lai, D. De, Xiao, Y. & Luo, X. B. Experimental research on concrete-filled RPC tubes under axial compression load. *Eng. Struct.* (2018).
26. Chen, X., Zhuge, Y., Nassir Al-Gemeel, A. & Xiong, Z. Compressive behaviour of concrete column confined with basalt textile reinforced ECC. *Eng. Struct.* (2021).
27. UNI EN. 12390-3 - Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini. (2019).
28. UNI EN. 1015-11 - Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita. (2019).
29. Wille, K., El-Tawil, S. & Naaman, A. E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cem. Concr. Compos.* (2014).
30. Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC ). *Concr. Eng. Ser.* (2008).
31. UNI EN. 1015-3 - Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse). (2007).
32. Eeman Al-Ameen, Ana Blanco & Sergio Cavalaro. Durability, permeability, and mechanical performance of sprayed UHPC, as an attribute of fibre content and geometric stability. *Constr. Build. Mater. J.* (2023).

## 7.2 – Sitografia

Qui sotto si troveranno elencate tutte le fonti reperite su internet utilizzate per la scrittura di questa tesi di laurea, l'ultimo accesso esse è stato effettuato nel mese di Novembre 2023. Le fonti sono:

<b>Sito</b>	<b>Descrizione</b>
<a href="https://www.youtube.com/watch?v=fCBagPdLlVE">https://www.youtube.com/watch?v=fCBagPdLlVE</a>	Intervento della professoressa Karen Scrivener alla conferenza "UHPC LC <sup>3</sup> day" – Capitolo 2.1 – UHPC LC <sup>3</sup> .
<a href="https://www.sh-minerals.de/en/products/fillers/saxodol/">https://www.sh-minerals.de/en/products/fillers/saxodol/</a>	Informazione riguardo il filler calcareo utilizzato nell'impasto dell'UHPC – Capitolo 2.1 – UHPC LC <sup>3</sup> .