



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Edile

Valutazione del comportamento meccanico di calcestruzzi ad elevate prestazioni rinforzati con fibre di carbonio riciclate e di acciaio

Evaluation of the mechanical behavior of high performance concretes reinforced with recycled carbon fibers and steel fibers

Relatore:

Prof. Ing. Jacopo Donnini

Tesi di Laurea di:

Manuel Cingolani

A.A. 2022 / 2023

INDICE

Introduzione	1
1- Cenni sugli HPC.....	2
1.1- Stato dell'arte	2
1.2- HPC LC ³	2
1.2- Riferimenti normativi	3
2- Materiali impiegati	5
2.1- Composizione del calcestruzzo dei pilastri.....	5
2.2- Composizione HPC LC ³	6
2.3- Fibre.....	8
3- Realizzazione dei cilindri e delle miscele HPC.....	10
3.1- Pilastri in calcestruzzo	10
3.2- Miscele HPC.....	11
3.3- Incamiciatura dei pilastri	13
4- Svolgimento delle prove.....	15
4.1- Prova a flessione a tre punti dei provini	15
4.2- Prova a compressione dei provini	15
4.3- Prova a compressione dei pilastri rinforzati	16
5- Risultati ottenuti e analisi.....	18
5.1- Risultati delle prove a flessione dei provini.....	20
5.1.1- M-1.0 SF.....	20
5.1.2- M-1.5 SF.....	21
5.1.3- M-1.0 rCF	22
5.1.4- M-1.0 SF 0.5 rCF.....	23
5.1.5- Riepilogo e commento.....	24
5.2- Risultati delle prove a compressione dei provini	27
5.2.1- M-1.0 SF.....	27
5.2.2- M-1.5 SF.....	28
5.2.3- M-1.0 rCF	29
5.2.4- M-1.0 SF 0.5 rCF.....	30
5.2.5- Riepilogo e commento.....	31
5.3- Risultati delle prove a compressione dei pilastri rinforzati e commento.....	34
6- Conclusioni	37
7- Bibliografia e sitografia.....	38
7.1- Bibliografia.....	38
7.2- Sitografia.....	38

Introduzione

In questa tesi si va a presentare l'attività di ricerca e sperimentazione svolta in merito alla realizzazione di calcestruzzi rinforzati con fibre di carbonio riciclate e acciaio ottonate, destinati poi all'incamiciatura di pilastri in calcestruzzo.

Quest'ultima è una tecnica utilizzata soprattutto per andare a rinforzare e migliorare le prestazioni meccaniche di pilastri in calcestruzzo fessurati ad esempio a causa di eventi sismici, andando ad eseguire un nuovo getto con High Performance Concrete (HPC) esternamente ai pilastri stessi.

Lo scopo delle prove eseguite quindi è quello di andare ad analizzare il comportamento meccanico dell'HPC rinforzato con fibre di carbonio riciclate e/o acciaio ottonate, anche con l'obiettivo di valutare la possibilità di riciclo di materiali di scarto, che altrimenti risulterebbero di difficile smaltimento con il rischio di essere dispersi nell'ambiente.

Al fine poi di testare le proprietà degli HPC utilizzati per il rinforzo dei pilastri, questi sono stati caratterizzati a flessione e a compressione.

Nei capitoli successivi inoltre verrà trattato quanto segue:

- Presentazione generale degli HPC e dettagli su quello utilizzato durante la sperimentazione, nonché riferimenti alla normativa attualmente in vigore.
- Descrizione dei materiali utilizzati durante la sperimentazione per la realizzazione dei cilindri e dei provini.
- Fasi di realizzazione delle varie miscele di HPC, dei provini, dei cilindri in calcestruzzo e del rinforzo in HPC di questi ultimi.
- Descrizione dei test svolti sui provini e sui cilindri (sia rinforzati che non), dei macchinari e apparecchiature utilizzati.
- Analisi dei risultati ottenuti durante le prove e confronto tra le differenti miscele utilizzate.
- Riflessioni su possibili progressi della ricerca in merito all'argomento trattato.

1- Cenni sugli HPC

1.1- Stato dell'arte

Gli HPC, acronimo che sta per *High Performance Concretes*, sono calcestruzzi ad elevate prestazioni sempre più in uso negli ultimi anni che offrono una resistenza meccanica decisamente superiore a quella di un calcestruzzo di ordinaria composizione.

In particolare le differenti miscele prodotte per le prove svolte in laboratorio prendono il nome di HPFRC (*High Performance Fiber Reinforced Concretes*), ossia calcestruzzi ad alte prestazioni fibrorinforzati caratterizzati dunque dalla presenza di una percentuale in peso di fibre di diversa natura.

Questa tipologia di calcestruzzi garantisce inoltre un comportamento duttile in campo plastico e consente di evitare l'utilizzo di armature metalliche grazie:

- Al basso rapporto acqua/cemento favorito dall'uso di particolari additivi superfluidificanti.
- Alla notevole resistenza a compressione (che può superare i 100 MPa contro i 20 MPa di un calcestruzzo ordinario) e a trazione (che può superare i 6 MPa).
- All'aggiunta di fibre metalliche e/o di carbonio.
- All'elevata densità della miscela dato l'uso di componenti molto fini.

Gli HPFRC d'altro canto sono generalmente costosi, inoltre risultano particolarmente impattanti a livello ambientale poiché costituiti da un alto contenuto di cemento, che provoca anche lo sviluppo di un elevato calore di idratazione.

1.2- HPC LC³

Le miscele di HPC realizzate ed utilizzate durante la ricerca svolta in laboratorio prendono il nome di HPC LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*): sono calcestruzzi particolari sviluppati per ovviare alle problematiche esposte in precedenza.

Sono caratterizzati infatti dalla presenza di:

- Clinker di Portland: è presente per circa il 50% del totale e durante l'idratazione rilascia idrossido di calcio che contribuisce all'indurimento della pozzolana.
- Argilla calcinata (Calcined Clay): utile a ridurre notevolmente il quantitativo di clinker necessario alla miscela (circa la metà in meno rispetto ad un HPC classico) e di conseguenza ridurre il quantitativo di anidride carbonica prodotta, data la temperatura di cottura decisamente inferiore a quella del clinker.

- Calcare (Limestone): in minor quantità che consente in determinati casi di restituire altri prodotti di idratazione.
- Gesso (Gypsum): utilizzato anch'esso in piccole quantità e che ha la funzione di regolatore di presa.

1.2- Riferimenti normativi

I calcestruzzi ad alte prestazioni “compaiono” in normativa per la prima volta nel DM 9/01/1996, che distingue appunto quelli ad alte prestazioni (indicati con la sigla A.P. e caratterizzati da una R_{ck} compresa tra i 55 N/mm² e i 75 N/mm²) da quelli ad alta resistenza (indicati con A.R. e caratterizzati invece da una R_{ck} superiore ai 75 N/mm²).

Tuttavia la normativa italiana, né nelle NTC emanate nel 1996 e né in quelle del 2018, fa riferimento ad HPC o UHPC.

Nelle sopracitate NTC2018 (DM 17/01/2018) vengono invece presentati i cosiddetti FRC (calcestruzzi fibrorinforzati), che sono classificati come materiali da costruzione per uso strutturale.

Il capitolo 11.2.12 in particolare riporta quanto segue:

“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.”

La normativa successivamente precisa, attraverso la circolare n.7 del 21/01/2019 emanata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, che per impieghi strutturali deve essere garantito un dosaggio minimo di fibre all'interno del calcestruzzo, non inferiore allo 0,3% in volume.

Sempre in riferimento alle fibre che compongono gli FRC è stata emanata un'ulteriore circolare, *“Linea guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica e il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)”*, che espone indicazioni circa: le caratteristiche del composito e relative componenti, le procedure di qualificazione e controllo della produzione, le procedure di accettazione in cantiere.

La Linea guida pubblicata dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, riporta inoltre il comportamento a trazione di un calcestruzzo fibrorinforzato, nonché le prove per la qualificazione di quest'ultimo (nello specifico la prova a flessione su tre punti).

Concede infine l'utilizzo in cantiere di miscele preparate nello stabilimento del fabbricante e fornite come prodotto pronto per l'impiego o prodotto premiscelato al quale va aggiunta l'acqua in cantiere. Per quanto riguarda invece l'incamiciatura dei pilastri la normativa non fa riferimento a questa specifica tecnica ma, attraverso il capitolo 8.7 del DM 17/01/2018, solamente ad interventi su strutture esistenti ponendo particolare attenzione alla duttilità. In particolare:

“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.”

Inoltre nella sopracitata circolare del 21/01/2019, si fa riferimento a tecniche utilizzabili per interventi su strutture esistenti ma non vengono escluse metodologie innovative progettate per casi specifici. Ad esempio per quanto riguarda l'incamiciatura dei pilastri si fa riferimento solo a quella in C.A., che ha l'obiettivo di aumentare la capacità portante, la resistenza a flessione e/o a taglio, e la capacità deformativa; in tal modo la struttura dell'edificio risulterà più duttile e stabile, andando a colmare le differenze di resistenza e rigidezza che possono verificarsi tra travi e pilastri.

L'introduzione e l'impiego di HPC-UHPC sono relativamente recenti soprattutto nel nostro Paese, pertanto in Italia ancora non ci sono norme specifiche a riguardo, lasciando quindi spazio alle attività di ricerca e sviluppo di nuovi materiali.

Tuttavia in Paesi come Francia e Giappone sono già state emanate da diverso tempo delle norme e dei documenti tecnici inerenti ai calcestruzzi ad elevate prestazioni.

Per quanto riguarda la Francia, ad esempio, già nel 2002 fu pubblicato dalla AFGC (*Association Française de Génie Civil*) un documento tecnico-scientifico denominato *“Bétons fibrés à ultra-hautes performances”* che esponeva informazioni dettagliate circa le caratteristiche meccaniche, la produzione, il trasporto e la messa in opera degli UHPFRC.

In Giappone invece, nel Marzo 2008, la *Japan Society of Civil Engineers* presentò le *“Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)”* una sorta di linea guida contenente informazioni circa le proprietà dei materiali utilizzati per questi calcestruzzi, analisi strutturali, metodi per le verifiche di resistenza e calcestruzzi proiettati.

2- Materiali impiegati

2.1- Composizione del calcestruzzo dei pilastri

Uno degli obiettivi della ricerca svolta in laboratorio, come anticipato in precedenza, è stato quello di valutare il comportamento meccanico delle diverse miscele di HPC utilizzate come rinforzo (attraverso incamiciatura) di 6 pilastri in calcestruzzo di ordinaria composizione.

A tal proposito, per ricreare una condizione più simile alla realtà riscontrabile nelle vecchie strutture costruite intorno agli anni '60, questi 6 cilindri sono stati realizzati con un calcestruzzo di modesta qualità, ossia:

- Bassa resistenza meccanica a compressione: inferiore ai 15 N/mm².
- Classe di consistenza S4: fluida, adottata in strutture mediamente armate.

Nel caso in questione il calcestruzzo utilizzato ha una composizione del tipo:

Materiale	Quantità [kg/m³]
CEM II/B 32.5R	355
Acqua (a/c = 0.62)	220
Pietrisco	985
Sabbia	330

Tabella 1 - Composizione del calcestruzzo dei cilindri da rinforzare.

Poiché non sono stati utilizzati additivi si è proceduto aggiungendo acqua quando necessario (con i rischi di segregazione e bleeding che ciò comporta), come spesso accadeva in passato.

Inoltre gli inerti sono stati impiegati senza l'utilizzo di curve granulometriche, ma semplicemente distinti in inerte grosso (pietrisco), presente per il 75% in peso, e inerte fine (sabbia), presente per il 25% in peso.

2.2- Composizione HPC LC³

Di seguito viene mostrata una tabella contenente i materiali componenti e le relative quantità:

Materiale	Quantità [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	360

Tabella 2 - Componenti HPC LC³ e relative quantità.

Si presentano ora maggiori dettagli inerenti ai materiali sopracitati:

- **Cemento CEM I 52.5 R-SR3/NA:** questo cemento è composto esclusivamente da clinker unito a gesso e, come da normativa, l'utilizzo di questo consente di raggiungere valori finali di resistenza a compressione di 52.5 N/mm². Come già esplicitato in precedenza è stato possibile ridurre il quantitativo utilizzato per queste prove di circa il 50% (dato l'impiego di argilla calcinata, gesso e calcare presentati successivamente), contribuendo ad un risparmio in termini economici e ad un ridotto impatto ambientale (meno CO₂ prodotta).
- **Calcare (Limestone):** denominato "Saxodol" dal produttore, è un materiale capace di reagire con l'argilla calcinata fornendo ulteriori prodotti di idratazione e utile a sostituire una buona percentuale di clinker (circa il 15%). È un materiale ampiamente disponibile in natura e capace di riempire i vuoti della matrice cementizia, andando ad aumentare dunque la qualità del calcestruzzo in termini di prestazioni meccaniche. Le dimensioni dei granuli ruotano intorno ad un valore medio di 20 µm.



Figura 1 - Calcare utilizzato.

- **Argilla calcinata (Calcined Clay):** è un materiale ad attività pozzolanica utilizzato con lo scopo di sostituire una buona percentuale di clinker (circa il 30%), consentendo di ridurre notevolmente il calore d'idratazione e formazione di CO₂, a spese però di una ridotta resistenza a compressione finale. L'argilla calcinata inoltre è ampiamente disponibile in natura ed utilizzata nell'industria, e rappresenta un ottimo sostituto di altri elementi pozzolanici meno facilmente reperibili.



Figura 2 - Argilla calcinata utilizzata.

- **Gesso (Calcium Sulphate):** materiale utilizzato in sostituzione di una piccola percentuale di clinker (intorno al 5%), che funge da regolatore (ritardante) di presa attraverso la reazione con i prodotti di idratazione del clinker.



Figura 3 - Gesso utilizzato.

- **Sabbia di quarzo (Quartz sand):** aggregato molto fine presente per circa il 25% in peso rispetto al totale. Generalmente l'utilizzo di determinati inerti va a contribuire poi alla resistenza a compressione dell'HPC, nel caso in questione perciò si è adottato un aggregato di tipo calcareo poiché caratterizzato da una resistenza simile a quella del cemento utilizzato, al fine di evitare qualsiasi genere di difformità.

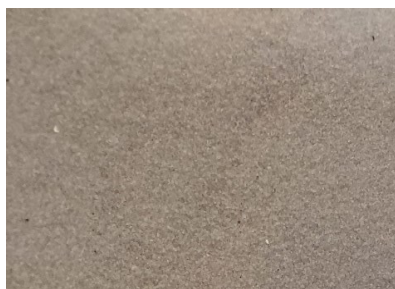


Figura 4 - Sabbia di quarzo utilizzata.

- **Superfluidificante (Water reducer):** sono utilizzati per ottenere una lavorabilità desiderata del getto andando a ridurre però il rapporto acqua/cemento del calcestruzzo. Nel caso in questione in particolare, poiché gli aggregati utilizzati sono molto fini e hanno elevata superficie specifica, il getto richiederebbe una notevole quantità di acqua di impasto, che è possibile appunto ridurre attraverso l'utilizzo di tali additivi. La quantità di superfluidificante da utilizzare è risultata poi variabile nel corso dello svolgimento delle prove.
- **Additivo modificatore di viscosità (VMA):** utilizzato principalmente in calcestruzzi composti da un'elevata percentuale di inerti fini, come in questo caso. Lo scopo di questo additivo è quello di migliorare la coesione della matrice cementizia, evitando fenomeni di bleeding e di segregazione.



Figura 5 - Additivo modificatore di viscosità (VMA) utilizzato.

2.3- Fibre

Generalmente l'aggiunta di fibre nelle miscele di calcestruzzo contribuisce a migliorarne le prestazioni meccaniche in termini di contenimento delle fessurazioni e resistenza a trazione.

Le fibre riciclate utilizzate per la realizzazione delle diverse miscele HPC di questa ricerca sono di due tipologie, in acciaio e in carbonio:

- **Fibre in acciaio (SF, Steel Fibers):** maggiormente utilizzate per la realizzazione di FRC e HPC, quelle impiegate in questa sperimentazione hanno una lunghezza di 1,3 cm e un diametro di 0,20 mm. Di seguito viene mostrata una fotografia delle fibre in acciaio utilizzate:



Figura 6 - Fibre in acciaio utilizzate per le miscele.

- **Fibre di carbonio riciclate (rCF, Recycled Carbon Fibers):** fibre ancora oggetto di studi e di ricerca, quelle utilizzate sono state fornite dall'Università di Dresda. Sono materiali di scarto di difficile smaltimento e l'obiettivo è proprio quello di trovare loro un nuovo impiego. L'unione di queste fibre con la malta cementizia non è però ottimale poiché non vi è una reazione chimica tra le due componenti bensì puramente fisica (di attrito da aderenza), tendono inoltre a trattenere l'acqua di impasto e a rilasciarla successivamente. Di seguito viene mostrata una fotografia delle fibre di carbonio utilizzate:



Figura 7 - Fibre di carbonio riciclate utilizzate per la sperimentazione.

3- Realizzazione dei cilindri e delle miscele HPC

3.1- Pilastrini in calcestruzzo

I componenti elencati precedentemente, destinati alla realizzazione di diversi pilastrini in calcestruzzo, sono stati dunque miscelati all'interno di una betoniera, gettati in seguito all'interno di tubi in PVC precedentemente tagliati delle dimensioni di 14x50cm, e vibrati per alcuni secondi con una sonda a immersione per favorirne una corretta compattazione.

Al completamento del getto i provini sono stati lasciati maturare per una settimana all'interno dei loro casseri e successivamente all'aria.

I cilindri, al termine dei 28 giorni di maturazione, sono stati poi tagliati per questioni pratiche inerenti ai macchinari, e si è potuto verificare da ciò come complessivamente gli inerti siano risultati uniformemente distribuiti all'interno del pilastro, a confermare la buona riuscita del getto.

Di seguito vengono mostrate alcune fotografie di quanto appena affermato:



Figura 8 - Maturazione del getto nei casseri in PVC.



Figura 9 - Aspetto dei provini dopo lo scassero.

Per verificare che il calcestruzzo realizzato fosse di qualità modesta, in aggiunta ai cilindri appena descritti, sono stati realizzati una serie di provini cubici di dimensioni 10x10x10 cm e si è proceduto con l'esecuzione di prove a compressione come da normativa (UNI EN 12390-3:2019), ottenendo come resistenza media a compressione il valore di 17.7 N/mm².

A comprovare la corretta realizzazione del getto vi è anche il modo in cui questi provini si sono rotti, ossia con la classica forma a clessidra mostrata in figura:



Figura 10 - Provini rotti dopo la prova a compressione.

3.2- Miscele HPC

Le quattro miscele in HPC sono state realizzate, attraverso i materiali elencati nei capitoli 2.2 e 2.3, seguendo il medesimo criterio per ognuna di esse.

Si è proceduto dunque andando a pesare tutti i materiali presentati in una bilancia di precisione, dopodiché i componenti secchi (perciò ancor prima di aggiungere acqua) sono stati miscelati attraverso un mixer ricavando così un composto omogeneo e uniforme.

L'acqua e il superfluidificante (precedentemente uniti) sono stati aggiunti progressivamente solo in seguito al miscelamento dei composti secchi, fino all'ottenimento di un impasto regolare.

A seconda della miscela desiderata poi si è proceduto con l'unione graduale di fibre metalliche e/o di carbonio alla matrice cementizia, cercando di evitare quanto possibile la formazione di grumi e disomogeneità generali.

Per quanto riguarda però le fibre di carbonio, queste, prima di procedere con l'unione all'impasto, sono state separate accuratamente mediante aria compressa, andando a prevenire la formazione di grumi e permettere così una corretta fase di mescolamento.

Una volta terminata la fase di realizzazione dell'impasto, prima di eseguire il getto, si è andati ad analizzarne la lavorabilità, e dunque lo spandimento, attraverso una tavola vibrante.

Di seguito vengono presentate le composizioni delle quattro miscele così ottenute:

Materiale	Quantità [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 di acciaio	75 (1%)	75 (1%)	75 (1%)	112,5 (1,5%)	-	75 (1%)
Fibre di carbonio	-	-	-	-	18 (1%)	9 (0.5%)

Tabella 3 - Componenti delle varie miscele in HPC e relative quantità.

Si elencano ora alcuni dettagli inerenti alle miscele realizzate:

- Prova 1:** è una miscela di prova che al termine della realizzazione è risultata troppo fluida e le fibre in acciaio tendevano a depositarsi sul fondo del secchio, con conseguente disomogeneità del getto e rottura anomala da parte dei provini (alcuni ancor prima di essere testati, come mostrato nella fotografia sottostante). Questa prova è stata utile per andare a correggere il quantitativo di acqua e superfluidificante che ha portato ad una miscela di questo tipo.



Figura 11 - Provino a "osso di cane" rotti prima dello scasso.

- Prova 2:** per questa miscela di prova è stato ridotto quantitativo di superfluidificante e di acqua. La miscela così realizzata è risultata però troppo compatta. Tuttavia è stato eseguito un tentativo di aggiunta di acqua in un secondo momento che, anche se ha restituito buoni risultati dal punto di vista della fluidità, non è considerabile corretto poiché la miscela aveva già iniziato il processo di idratazione.

- **M-1.0 SF:** per questa sono state fatte un paio di correzioni rispetto alla seconda miscela di prova: è stata aggiunta una piccola quantità di superfluidificante e l'acqua è stata inserita totalmente ad inizio procedura. Ciò ha portato ad una miscela più corretta dal punto di vista della fluidità e dell'omogeneità delle fibre all'interno del getto.
- **M-1.5 SF:** per questa si è adottato un quantitativo maggiore di fibre metalliche e minor quantitativo di acqua rispetto alla precedente. La miscela è risultata leggermente meno fluida ma ha restituito comunque una corretta omogeneità delle fibre all'interno.
- **M-1.0 rCF:** per questa miscela, considerato l'uso delle fibre di carbonio anziché di acciaio, si è provveduto a ripristinare i valori iniziali di acqua e superfluidificante, come previsto dalle linee guida fornite. La miscela ha restituito vari grumi al termine della procedura, nonostante le fibre siano state precedentemente separate mediante aria compressa, con conseguente perdita di fluidità.
- **M-1.0 SF 0.5 rCF:** questa miscela ha restituito una fluidità ridotta rispetto alla M-1.5 SF e una compattabilità migliore rispetto alla M-1.0 rCF. La miscela ottenuta è risultata conforme a quanto previsto, nonostante la procedura di vibrazione è stata più complessa delle precedenti.

Per quanto riguarda la lavorabilità delle miscele, questa è stata analizzata attraverso una tavola a scosse, come da normativa UNI EN 1015-3:2007 (Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse)), sopra la quale il composto cementizio è inserito all'interno di un tronco di cono e poi lasciato spandere liberamente. Al termine poi di 15 colpi viene misurato il diametro di spandimento, a cui corrisponde poi un certo livello di lavorabilità.

3.3- Incamiciatura dei pilastri

Terminata la fase di miscelamento della matrice cementizia descritta in precedenza, prima di proseguire con l'incamiciatura dei pilastri si è andati a rimuovere lo strato di polvere cementizia formatasi sulla superficie di questi ultimi. Dopodiché si è proceduto eseguendo il getto (poi opportunamente vibrato) delle varie miscele negli appositi casseri all'interno di ognuno dei quali, ovviamente, è presente il cilindro in calcestruzzo da rinforzare. In particolare i casseri sono dei tubi in PVC precedentemente tagliati, siliconati alla base su di una tavola in legno e poi "immobilizzati" per evitare spostamenti durante la fase di getto.

Di seguito viene mostrata una fotografia di quanto appena descritto:



Figura 12 - Setup del getto destinato all'incamiciatura dei pilastri in calcestruzzo.

Segue poi l'ultima fase che è quella di maturazione, in cui i provini sono stati lasciati inizialmente coperti evitando il contatto con l'aria, successivamente scasserati e inseriti (per 28 giorni) all'interno di vasche piene d'acqua al fine di permettere una corretta idratazione del getto. Al termine dei 28 giorni i provini sono stati estratti e lasciati asciugare all'aria prima di procedere con i test.

4- Svolgimento delle prove

Le prove a compressione e a flessione sono state svolte innanzitutto su provini di dimensioni 4x4x16cm, secondo la normativa europea vigente UNI EN 1015-11:2019 (Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita), a completa maturazione, ossia dopo almeno 28 giorni dal getto.

Prima di eseguire i test in questione, i provini sono stati precedentemente pesati per valutare anticipatamente la presenza di difformità tra questi. Seguono dettagli in merito a quanto detto.

4.1- Prova a flessione a tre punti dei provini

Per quanto riguarda la prova a flessione, questa è stata eseguita attraverso l'uso di una pressa idraulica presente nel laboratorio del dipartimento SIMAU.

Si è andati dunque, tramite il macchinario, ad applicare un carico concentrato centralmente ai provini appoggiati alle estremità, nella figura sottostante viene mostrata la pressa idraulica utilizzata, il setup della prova e la rottura di un provino di esempio realizzato con miscela M-1.0 SF:



Figura 13 - Pressa idraulica del dipartimento SIMAU.



Figura 14 - Setup della prova a flessione a tre punti, rottura di un provino M-1.0 SF.

4.2- Prova a compressione dei provini

La prova a compressione invece è stata eseguita attraverso la medesima pressa idraulica ma con differente setup.

Infatti, anche se i provini utilizzati per questa prova sono gli stessi precedentemente rotti a flessione, le due metà "intatte" ricavate per ognuno di essi sono state però caricate su una superficie di dimensioni 4x4 cm, simulando così una prova a compressione su cubetti di 4 cm per lato.

Come detto, per questo test i provini non sono più appoggiati su due estremità, bensì sono riposti su una delle superfici proseguendo con la compressione di questi, ottenendo come risultato la classica rottura a clessidra di ogni cubetto, come mostrato nella fotografia sottostante:



Figura 15 - Rottura a clessidra di un cubetto ottenuto da un provino realizzato con miscela M-1.0 rCF rotto precedentemente con la prova a flessione.

4.3- Prova a compressione dei pilastri rinforzati

Le prove a compressione dei pilastri rinforzati con le varie miscele HPC presentate, invece, sono state svolte attraverso l'utilizzo di una seconda pressa presente in laboratorio e di un sistema DIC (*Digital Image Correlation*), che ha consentito per l'appunto di registrare e monitorare spostamenti e deformazioni dei cilindri rinforzati.

Prima di eseguire la prova è stato perciò necessario predisporre accuratamente i cilindri ad un particolare processo di verniciatura, che consente alle telecamere di individuare e riconoscere i vari punti sulla superficie del pilastro e i loro relativi spostamenti nel corso della compressione.

È stato scelto inoltre di applicare la compressione direttamente sul cilindro centrale anziché sul pilastro compreso di rinforzo, al fine di valutare il comportamento dell'incamiciatura.

Di seguito viene mostrato il setup della prova con il posizionamento delle 8 telecamere ed uno dei pilastri verniciati come appena descritto:



Figura 16 - Setup della prova a compressione dei pilastri rinforzati: pressa (al centro) e le 8 telecamere collegate a due PC e posizionate a diverse angolature, in modo tale da riprendere quasi tutta la superficie dei pilastri.



Figura 17 - Particolare della verniciatura "a macchie" della superficie di uno dei pilastri rinforzati, utile al sistema DIC per il riconoscimento di punti.

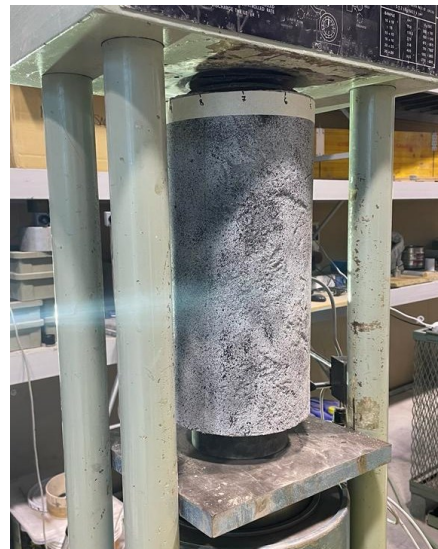


Figura 18 - Uno dei pilastri da testare, posizionato al centro della pressa, al di sopra e al di sotto del quale vi sono degli elementi volti a comprimere esclusivamente il cilindro interno.

5- Risultati ottenuti e analisi

Come detto in precedenza, prima di eseguire il getto è stata eseguita la prova di lavorabilità mediante tavola a scosse per ciascuna delle miscele.

Segue ora la tabella contenente i risultati ottenuti da questa prova:

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 4 - Risultati della prova di lavorabilità con il metodo della tavola a scosse.

Come si può evincere dalla tabella, i risultati variano molto da miscela a miscela (soprattutto tra quelle contenenti fibre di carbonio e quelle invece prive di esse), tuttavia lo spandimento risulta uniforme (i diametri differiscono di pochi mm) ad indicare la corretta realizzazione delle varie miscele. Si nota inoltre come le miscele che includono fibre di acciaio all'interno siano caratterizzate da elevata lavorabilità (quindi elevato spandimento), al contrario della miscela M-1.0 rCF contenente esclusivamente fibre di carbonio riciclate.

Come accennato in precedenza, i provini realizzati (3 per ogni miscela di HPC), prima di essere testati, sono stati pesati accuratamente attraverso una bilancia di precisione al fine di individuare anticipatamente difformità tra essi (es. presenza di bolle d'aria).

Di seguito viene mostrata una tabella contenente le masse volumiche dei vari provini, ottenute attraverso il peso di questi ultimi:

Miscela	Provino	Massa volumica [kg/m ³]	Massa volumica media [kg/m ³]
M-1.0 SF	A	2.002	2.004
	B	2.007	
	C	2.002	
M-1.5 SF	A	2.142	2.133
	B	2.156	
	C	2.100	
M-1.0 rCF	A	2.132	2.132
	B	2.085	
	C	2.178	
M-1.0 SF 0.5 rCF	A	2.161	2.162
	B	2.153	
	C	2.171	

Tabella 5 - Massa volumica dei provini di dimensioni 4x4x16 cm.

Dalla tabella è possibile osservare come la miscela M-1.0 SF abbia restituito risultati pressoché identici tra loro, ciò ad indicare ancora una volta la corretta realizzazione del getto.

Anche la miscela M-1.0 SF 0.5 rCF ha restituito provini aventi simile massa volumica, non si può dire invece lo stesso per i provini realizzati con le altre due miscele.

Seguono ora i risultati ottenuti durante le prove a flessione e a compressione dei vari provini e dei cilindri rinforzati.

5.1- Risultati delle prove a flessione dei provini

Vengono mostrate di seguito delle curve forza-deflessione e delle tabelle contenenti i risultati ottenuti dalle prove a flessione dei provini realizzati con le quattro miscele presentate in precedenza.

5.1.1- 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>

Tabella 6 - Risultati prova a flessione dei provini realizzati con la miscela M-1.0 SF.

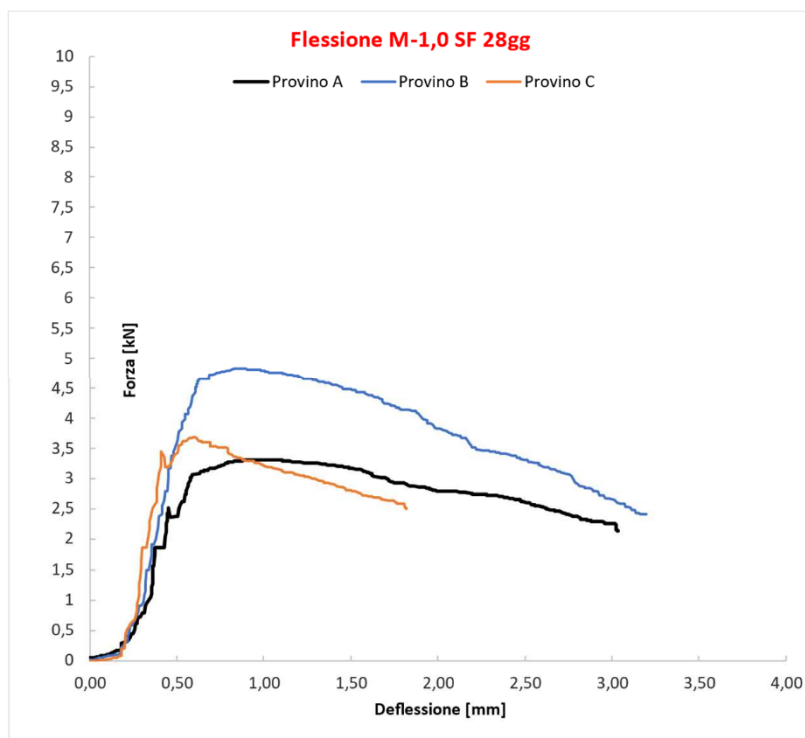


Figura 19 - Curva forza-deflessione dei provini realizzati con la miscela M-1.0 SF.

5.1.2- 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>

Tabella 7 - Risultati prova a flessione dei provini realizzati con la miscela M-1.5 SF.

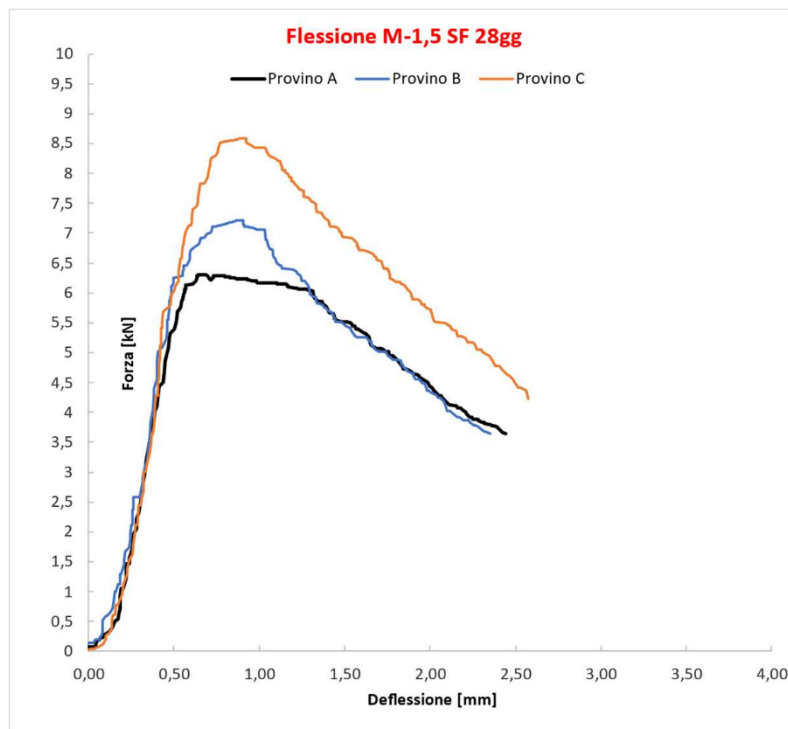


Figura 20 - Curva forza-deflessione dei provini realizzati con la miscela M-1.5 SF.

5.1.3- 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>

Tabella 8 - Risultati prova a flessione dei provini realizzati con la miscela M-1.0 rCF.

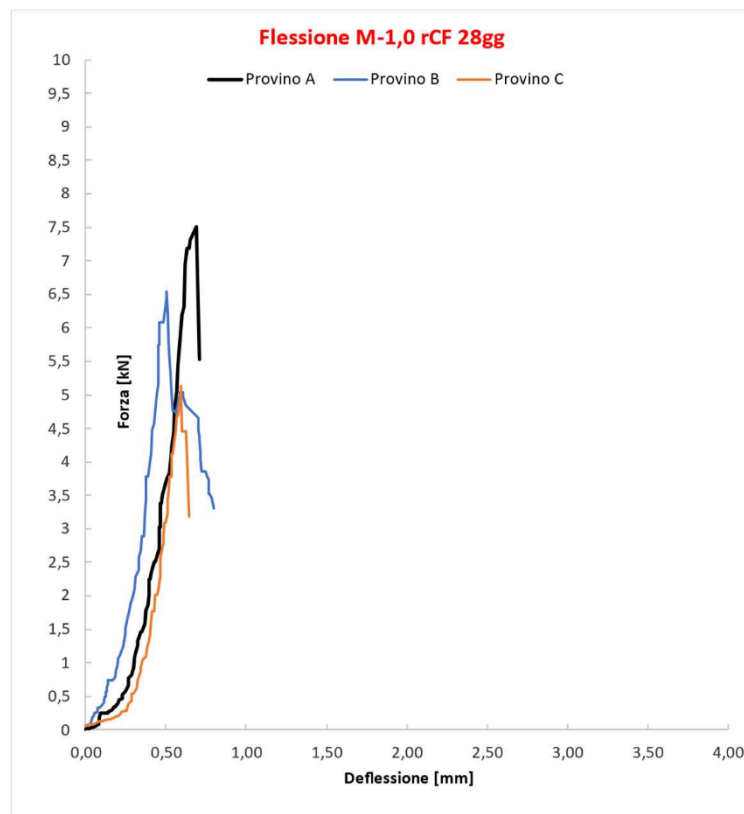


Figura 21 - Curva forza-deflessione dei provini realizzati con la miscela M-1.0 rCF-

5.1.4- 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>

Tabella 9 - Risultati prova a flessione eseguita sui provini realizzati con la miscela M-1.0 SF 0.5 rCF.

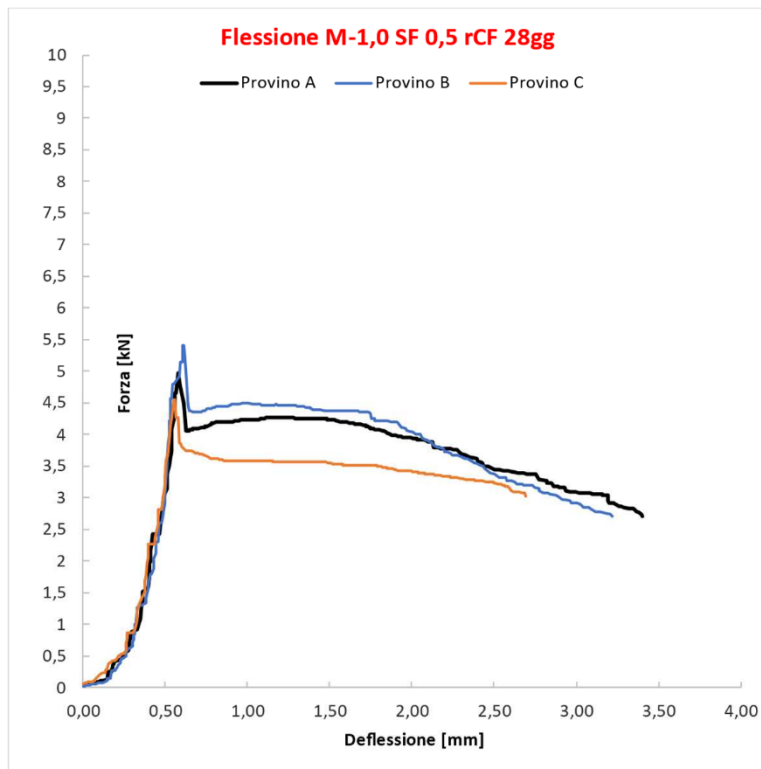


Figura 22 - Curva forza-deflessione dei provini realizzati con la miscela M-1.0 SF 0.5 rCF.

5.1.5- Riepilogo e commento

Viene ora mostrata una tabella contenente i valori medi dei risultati ottenuti e dei grafici riepilogativi di quanto visto finora, così da poter fare confronti e le dovute osservazioni:

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 10 - Risultati medi delle prove a flessione eseguite sui vari provini.

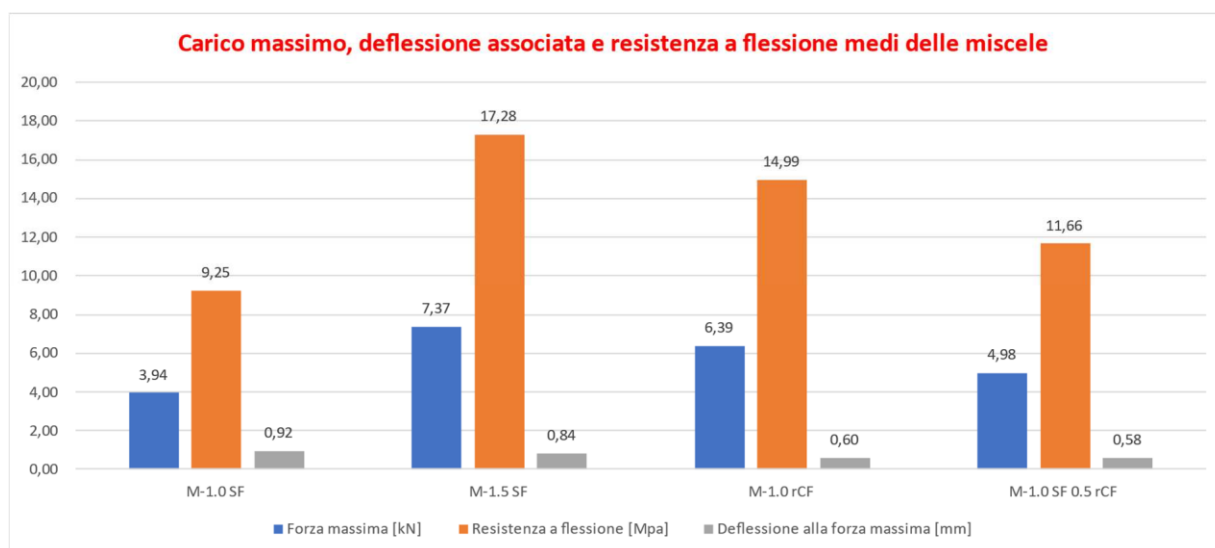


Figura 23 - Confronto tra i valori medi del carico massimo, della resistenza a flessione e della deflessione alla forza massima per le varie miscele.

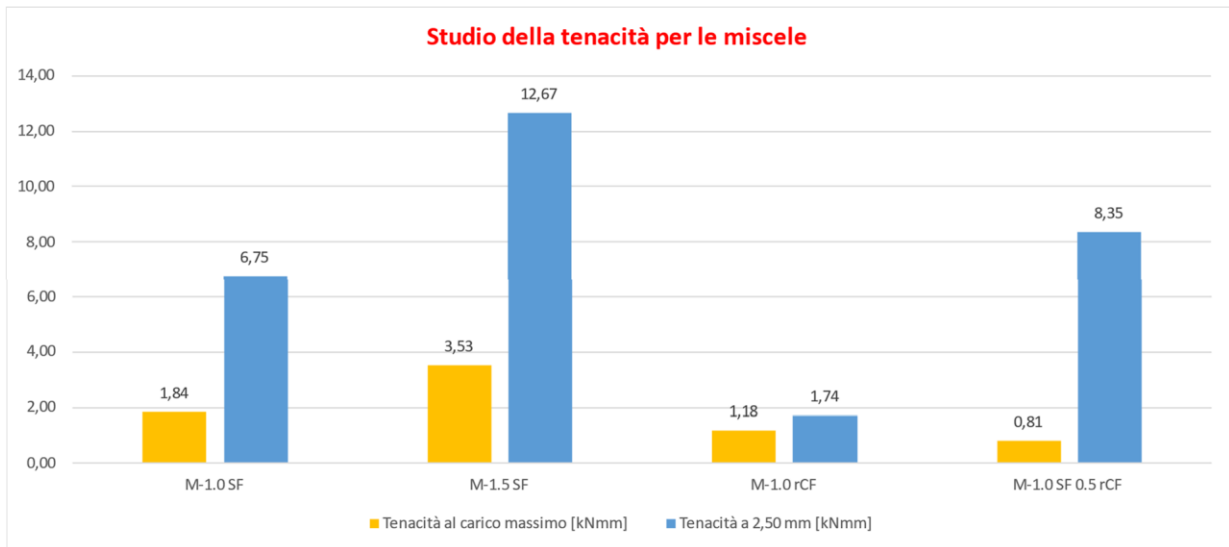


Figura 24 - Confronto tra i valori medi della tenacità al carico massimo e della tenacità a 2,50 mm.

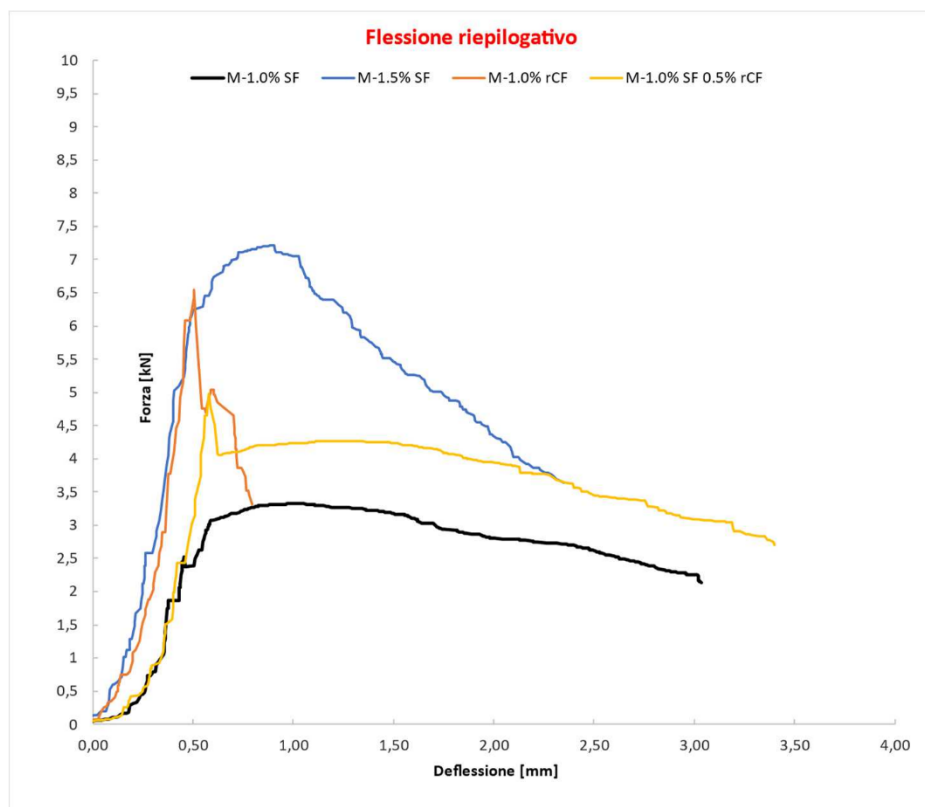


Figura 25 - Grafico forza-deflessione riepilogativo del comportamento a flessione dei provini testati.

Osservando dunque i grafici e i valori ottenuti è facilmente intuibile come la miscela M-1.5 SF abbia garantito prestazioni migliori in termini di resistenza a flessione e tenacità, con un ottimo comportamento in fase elastica.

Infatti il maggior quantitativo di fibre di acciaio all'interno dell'impasto ha consentito ai provini di assorbire maggior energia prima di raggiungere la tensione di snervamento, e di resistere poi alla propagazione delle fessure tramite crack-bridging.

La miscela M-1.0 SF, anche se composta in maniera simile alla M-1.5 SF e nonostante il buon comportamento in fase plastica, non ha restituito però risultati altrettanto ottimi in termini di resistenza e deflessione alla forza massima, a causa del minor quantitativo di fibre all'interno.

L'aggiunta di fibre di carbonio riciclate invece ha portato ad un comportamento plastico molto differente da quello delle miscele composte da fibre d'acciaio: si può notare infatti dai grafici come vi sia una rapida perdita in termini di resistenza una volta raggiunto il valore di picco.

La miscela M-1.0 rCF in particolare, ha registrato elevati valori di resistenza a flessione, ma non ha avuto tuttavia un buon comportamento in campo plastico, restituendo infatti una rottura fragile e bassissima tenacità.

La presenza di fibre di acciaio e di fibre di carbonio nella miscela M-1.0 SF 0.5 rCF, invece, ha restituito dei risultati intermedi a quelli appena visti, ossia: buona resistenza a flessione, elevata tenacità e dunque ottimo comportamento in fase plastica (grande capacità deformative prima di arrivare a rottura).

5.2- Risultati delle prove a compressione dei provini

Vengono mostrati di seguito invece i grafici tensione-spostamento e le tabelle contenenti i risultati ottenuti dalle prove a compressione monoassiale dei provini realizzati con le quattro miscele precedentemente descritte.

5.2.1- 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>

Tabella 11 - Risultati della prova a compressione eseguita sui provini realizzati con la miscela M-1.0 SF.

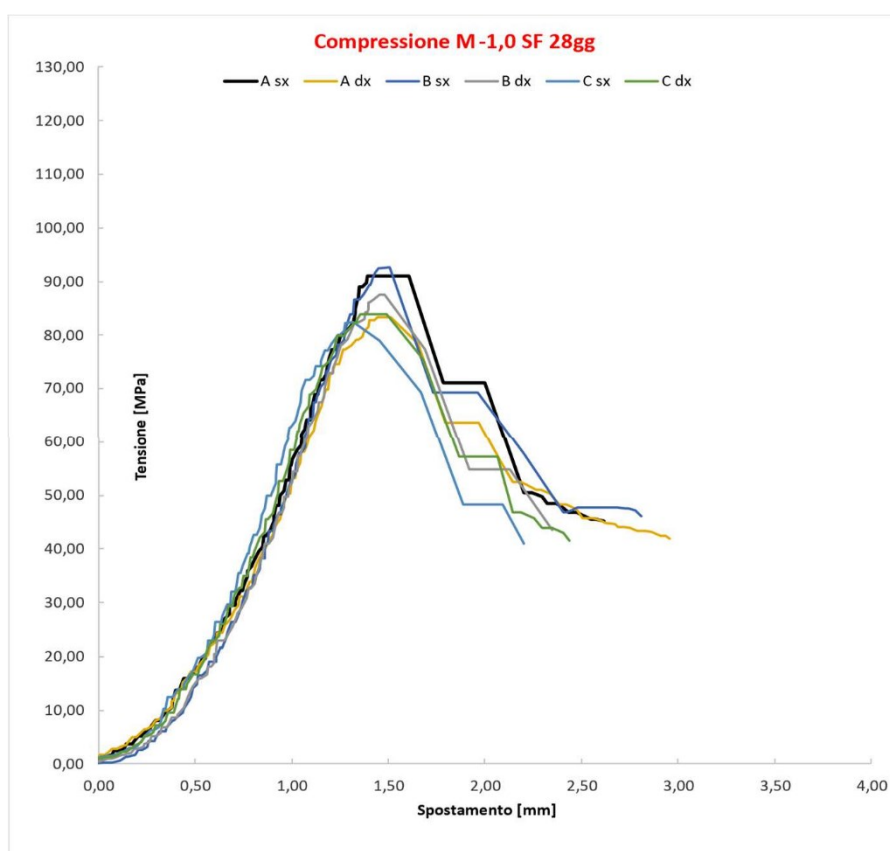


Figura 26 - Curva tensione-spostamento dei provini realizzati con la miscela M-1.0 SF.

5.2.2- 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
Media		173.42	1.67	108.39

Tabella 12 - Risultati della prova a compressione eseguita sui provini realizzati con la miscela M-1.5 SF.

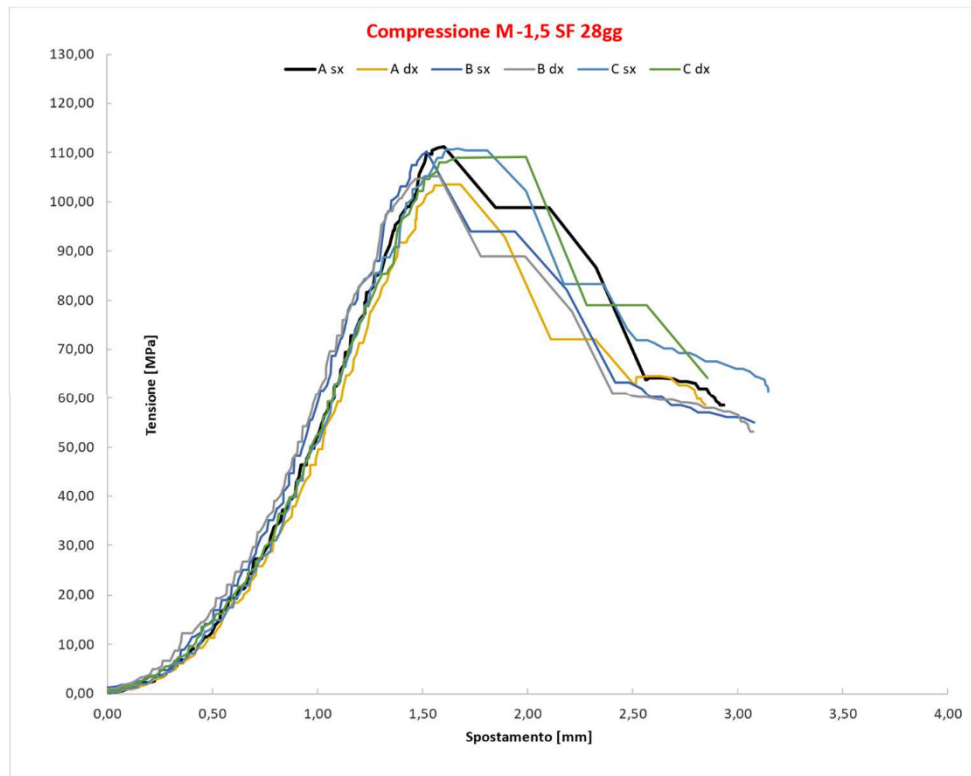


Figura 27 - Curva tensione-spostamento dei provini realizzati con la miscela M-1.5 SF.

5.2.3- 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
Media		164.01	1.54	102.50

Tabella 13 - Risultati della prova a compressione eseguita sui provini realizzati con la miscela M-1.0 rCF.

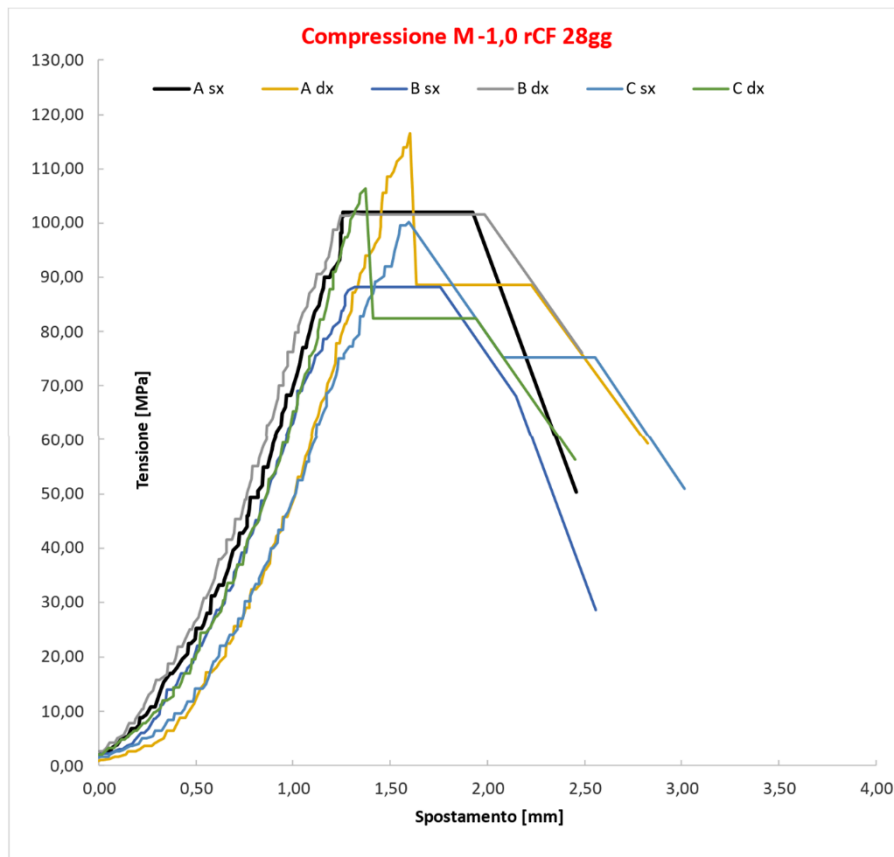


Figura 28 - Curva tensione-spostamento dei provini realizzati con la miscela M-1.0 rCF.

5.2.4- 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>

Tabella 14 - Risultati della prova a compressione eseguita sui provini realizzati con la miscela M-1.0 SF 0.5 rCF.

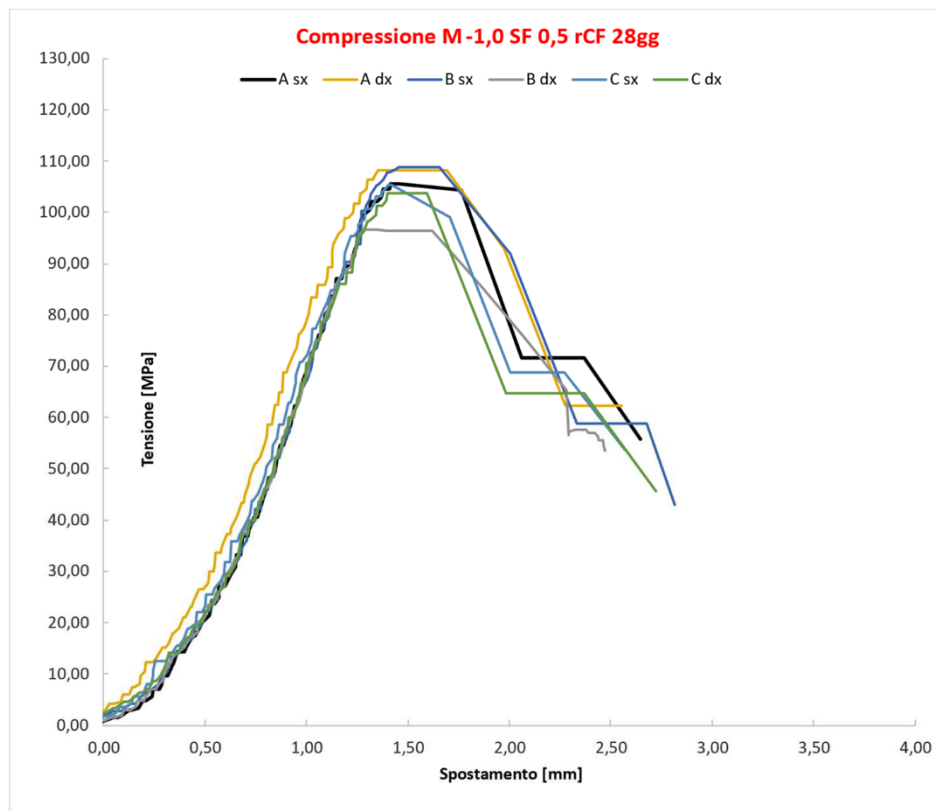


Figura 29 - Curva tensione-spostamento dei provini realizzati con la miscela M-1.0 SF 0.5 rCF.

5.2.5- Riepilogo e commento

Viene ora mostrata una tabella contenente i valori medi dei risultati ottenuti e dei grafici riepilogativi di quanto visto finora, al fine di poter fare confronti e le dovute osservazioni:

Miscela	Carico massimo medio [kN]	Spostamento medio al carico massimo [mm]	Resistenza a compressione media [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 15 - Risultati medi delle prove a compressione eseguite sui vari provini.

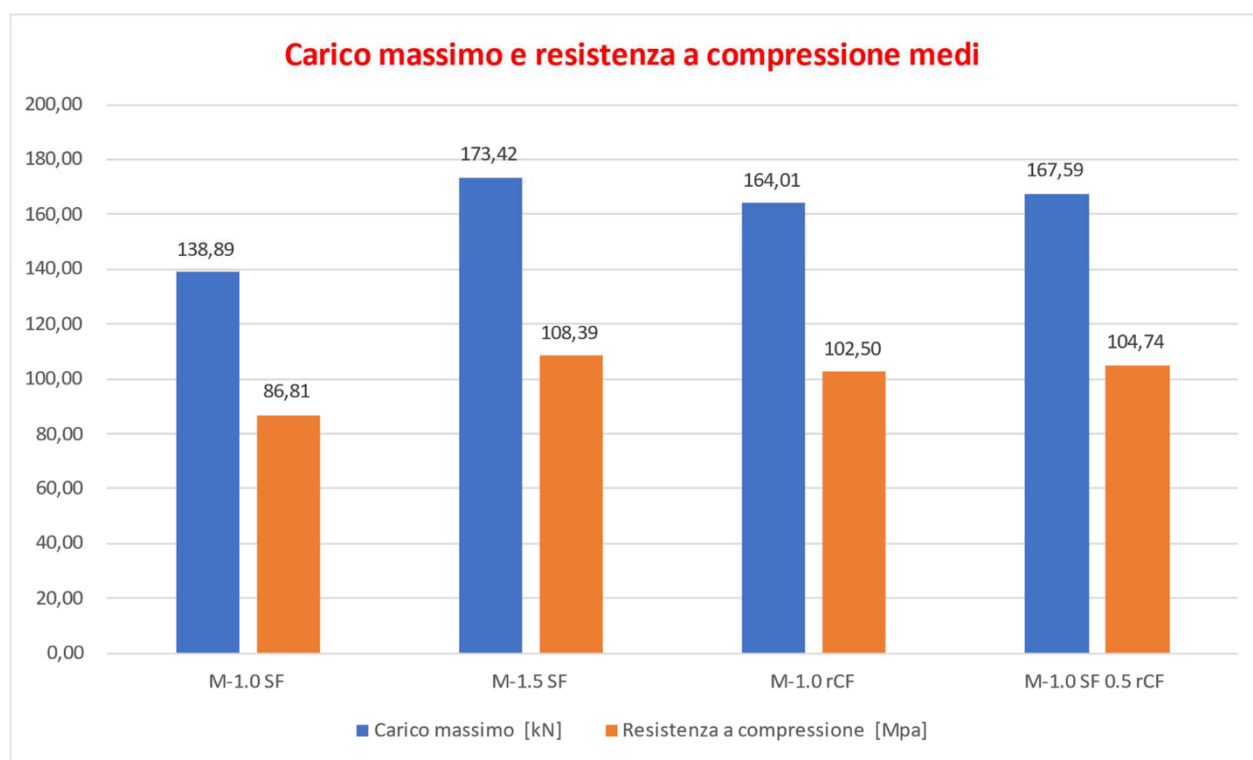


Figura 30 - Confronto tra i valori medi del carico massimo e della resistenza a compressione per le varie miscele.

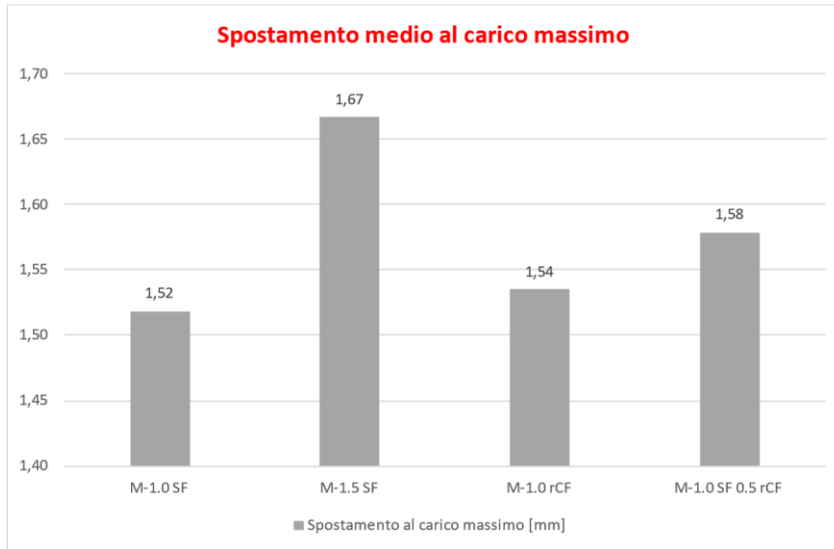


Figura 31 - Confronto tra gli spostamenti medi al carico massimo per le varie miscele.

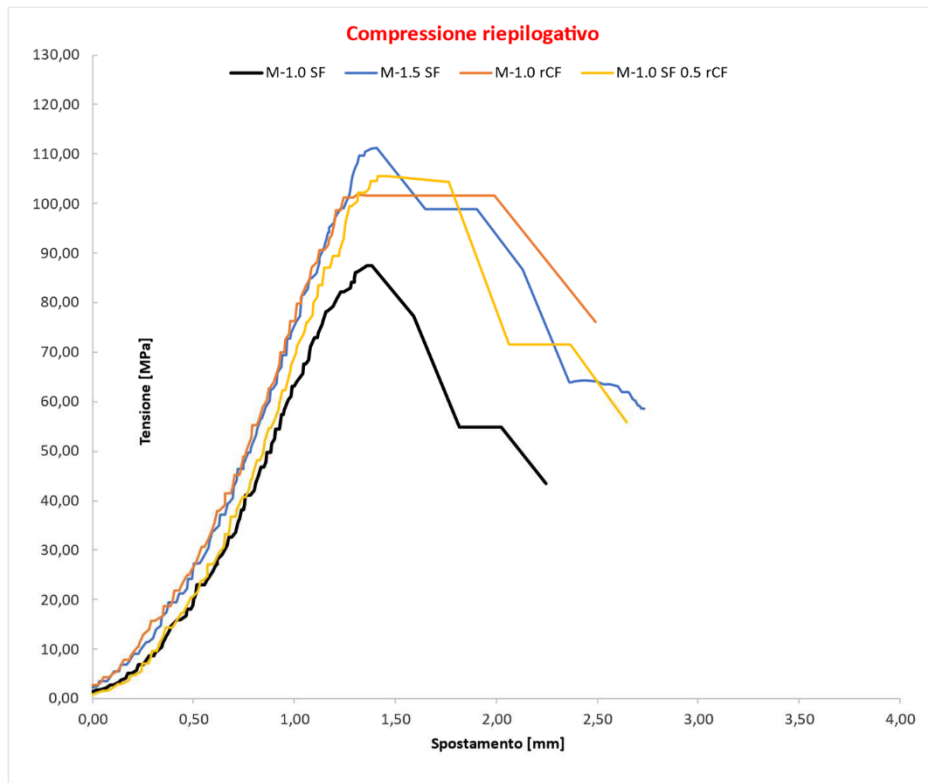


Figura 32 - Grafico tensione-spostamento riepilogativo del comportamento a compressione dei provini testati.

Osservando ora i grafici e le tabelle ottenuti è possibile intuire come la miscela migliore in termini di resistenza a compressione sia la M-1.5 SF, che ha garantito un picco di resistenza media tra i provini di circa 110 MPa. La modalità di rottura inoltre, come dimostrato anche dall'andamento della fase plastica, non è stata immediata ma progressiva, il materiale ha infatti mostrato ottime capacità deformative prima di rompersi.

Nel complesso comunque si può dire che i risultati ottenuti sono stati buoni: quasi tutte le miscele con cui sono stati realizzati i provini hanno garantito il raggiungimento di una resistenza a compressione superiore ai 100 MPa, tuttavia l'unica miscela appunto che ha restituito dei risultati inferiori è stata la M-1.0 SF (meno di 90 MPa).

Un altro fattore importante, come già accennato, è la differente modalità di rottura tra i provini composti da fibre di carbonio e i provini composti da sole fibre di acciaio.

Infatti, la presenza di fibre metalliche ha garantito ai provini di resistere al propagarsi delle fessure, evitando così una rottura di tipo fragile, come invece accaduto per i provini realizzati con miscela M-1.0 rCF (seguono delle fotografie a dimostrazione di quanto appena detto).

A proposito di ciò si può notare dalle curve il simile andamento particolare dei provini realizzati con miscela M-1.0 SF 0.5 rCF e con miscela M-1.0 SF: esso dimostra come, nonostante l'aggiunta di fibre di carbonio comporti un notevole aumento di resistenza a compressione, il provino (della miscela M-1.0 SF 0.5 rCF) una volta raggiunta la massima resistenza a compressione si rompe e perde improvvisamente (a causa della presenza delle rCF che non hanno la capacità di cucire le fessure formatesi) una buona percentuale di plasticità, riacquisita poi all'attivazione delle fibre di acciaio.



Figura 33 - Provini realizzati con miscela M-1.0 SF rotti a compressione.



Figura 34 - Provini realizzati con miscela M-1.5 SF rotti a compressione.



Figura 35 - Provini realizzati con miscela M-1.0 rCF rotti a compressione.



Figura 36 - Provini realizzati con miscela M-1.0 SF 0.5 rCF rotti a compressione.

5.3- Risultati delle prove a compressione dei pilastri rinforzati e commento

Per questa ricerca sono stati rinforzati complessivamente sei pilastri con le tre principali miscele HPC realizzate: M-1.5 SF, M-1.0 rCF ed M-1.0 SF 0.5 rCF.

Ogni miscela è stata utilizzata quindi per rinforzare due cilindri, eseguendo dunque la stessa prova a compressione su un maggior numero di campioni al fine di ottenere risultati più completi.

Prima di procedere però con la compressione dei pilastri rinforzati sono stati testati anche dei cilindri in calcestruzzo privi di incamiciatura, così da poter fare un confronto rapido tra i valori ottenuti.

Viene ora mostrato il grafico ottenuto dalle prove a compressione eseguite, seguono poi diverse immagini delle rotture dei pilastri rinforzati a seguito dei test.

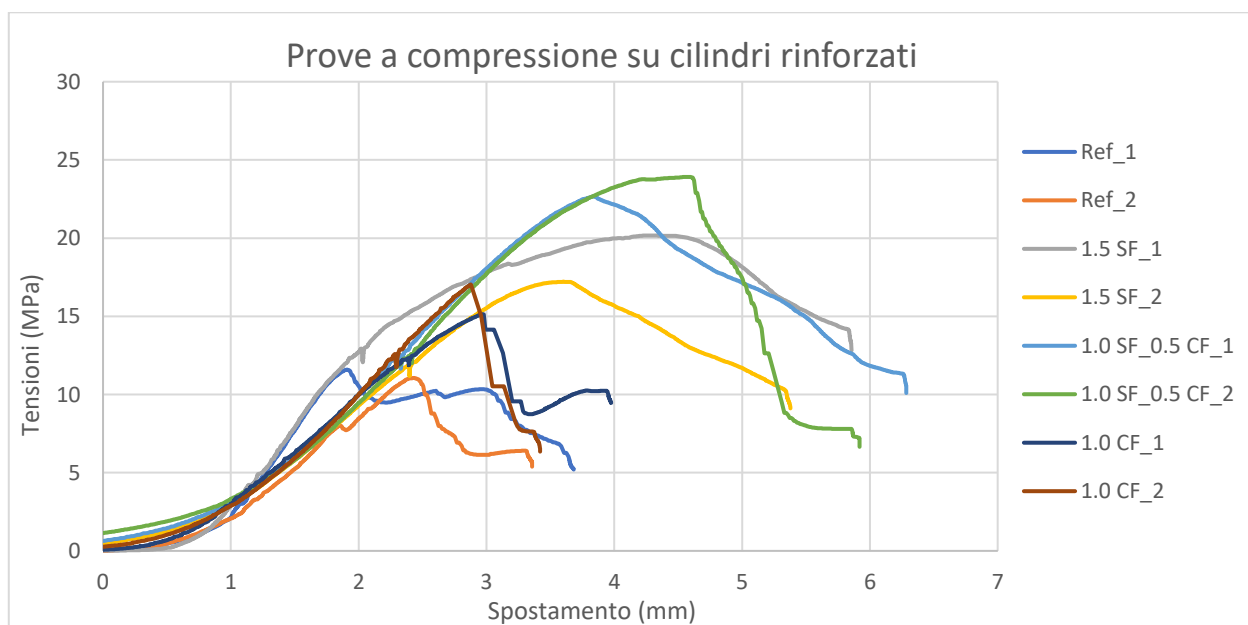


Figura 37 - Grafico tensione-spostamento riepilogativo del comportamento a compressione dei pilastri rinforzati testati.

Il grafico evidenzia dunque la differenza, in termini di resistenza a compressione, tra semplici pilastri in calcestruzzo (denominati Ref_1 e Ref_2) e i cilindri rinforzati dalle miscele HPC realizzate.

In questo caso è possibile affermare che la miscela M-1.0 SF 0.5 rCF sia stata quella che ha garantito un rinforzo più performante, raggiungendo infatti picchi di resistenza di poco inferiori ai 25 MPa (contro i circa 12 MPa dei due cilindri in calcestruzzo non rinforzati) e assumendo un comportamento degradante in fase plastica (1.0 SF_0.5 CF_1).

Da notare, ancora una volta, anche le buone prestazioni del rinforzo in M-1.5 SF, che ha permesso sia di registrare fino a 20 MPa di resistenza a compressione, sia di avere ottime capacità deformative prima di arrivare a rottura (evidenziabili dall'andamento in fase plastica delle due curve) grazie all'effetto di crack-bridging delle fibre metalliche.

Per quanto riguarda la miscela M-1.0 rCF, invece, in questa prova non ha restituito valori particolarmente elevati di resistenza (rispetto alle miscele contenenti anche fibre di acciaio), e anche in questo caso la rottura è stata di tipo fragile, come mostrato nelle varie immagini sottostanti.



Figura 38 - Pilastro rinforzato con M-1.0 rCF dopo la prova a compressione.



Figura 39 - Pilastro rinforzato con M-1.0 rCF dopo la prova a compressione.



Figura 40 - Pilastro rinforzato con M-1.0 SF 0.5 rCF dopo la prova a compressione.



Figura 41 - Pilastro rinforzato con M-1.0 SF 0.5 rCF dopo la prova a compressione.



Figura 42 - Pilastro rinforzato con M-1.5 SF dopo la prova a compressione.



Figura 43 - Pilastro rinforzato con M-1.5 SF dopo la prova a compressione.

6- Conclusioni

Nel corso della sperimentazione e tramite le prove svolte è stato possibile valutare il comportamento di calcestruzzi ad alte prestazioni (HPC) rinforzati con fibre di carbonio riciclate e/o con fibre di acciaio.

È risultato chiaro infatti come l'aggiunta di fibre di carbonio riciclate, a causa della loro scarsa compatibilità a livello chimico-fisico con il calcestruzzo, abbia provocato: una riduzione della lavorabilità (e quindi una difficoltosa fase di miscelazione della matrice) e una rottura di tipo fragile a compressione e a flessione.

Nonostante quanto detto però occorre riconoscere un incremento di resistenza non indifferente, come registrato nelle prove a compressione dei pilastri rinforzati: +107% circa con miscela M-1.0 SF 0.5 rCF e +47% circa con miscela M-1.0 rCF.

L'utilizzo di determinate percentuali in peso di fibre di acciaio ha infatti garantito un buon comportamento in fase plastica (rispetto alle miscele realizzate con fibre di carbonio riciclate, caratterizzate invece da una fase plastica totalmente assente), nonché ottimi risultati in termini di resistenza a compressione e a flessione.

Tali fibre metalliche hanno inoltre restituito alla matrice cementizia un'ottima lavorabilità e sono state riscontrate minori difficoltà in fase di miscelazione.

Da quanto si è osservato infine, l'utilizzo combinato di fibre di acciaio e di carbonio ha prodotto risultati interessanti: da un lato le fibre di carbonio hanno consentito di incrementare la resistenza a flessione e compressione, dall'altro le fibre di acciaio hanno evitato una rottura di tipo fragile andando a cucire le fessure, garantendo un'elevata capacità deformativa della matrice.

In generale dunque, i risultati ottenuti dalle prove di compressione sui pilastri rinforzati suggeriscono che l'utilizzo di fibre di carbonio riciclate (quando si parla di interventi di rinforzo strutturale) non è da escludere, e porta sicuramente dei vantaggi a livello prestazionale.

Risulta perciò necessario proseguire con le sperimentazioni in questo ambito e perfezionare la ricerca andando ad attenuare quanto possibile le problematiche riscontrate, ad esempio:

- Utilizzando fibre di carbonio con rapporto d'aspetto (d/l) ottimizzato, in modo da garantire una migliore compatibilità con la matrice cementizia.
- Ottimizzando il dosaggio di fibre sia di acciaio che di carbonio all'interno della miscela.
- Sperimentando possibili trattamenti superficiali alle fibre di carbonio che permettano di migliorare la compatibilità con la matrice cementizia.

7- Bibliografia e sitografia

7.1- Bibliografia

“A comparison between the use of FRP, FRCM and HPM for concrete confinement”.
J. Donnini, S. Spagnuolo, V. Corinaldesi. Elsevier Ltd. (2018)

“Model Code 2010”. Fédération Internationale du Béton. (2010)

“Bétons fibrés à ultra-hautes performances”. Association Française de Génie Civil. (2002)

“Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)”.
Japan Society of Civil Engineers. (2008)

“Experimental and analytical investigation of UHPC confined concrete behavior”.
V. Sagar Ronanki, S. Aaleti. Elsevier Ltd. (2022)

“Advanced Study of Columns Confined by Ultra-High-Performance-Concrete and Ultra-High-Performance-Fiber-Reinforced-Concrete Confinements”.
M. I. Retno Susilorini, Y. Kusumawardaningsih. MDPI. (2023)

“Compressive Behavior of FRP Grid-Reinforced UHPC Tubular Columns”.
J. Zeng, T. Long. MDPI. (2021)

“Research on the dispersion of carbon fiber and recycled carbon fiber in cement-based materials: a review”. H. Gao, Y. Xia. (2023)

“Axial and flexural behaviour of circular reinforced concrete columns strengthened with reactive powder concrete jacket and fiber reinforced polymer wrapping”.
M. N. S. Hadi, A. H. M. Algburi, M. Neaz Sheikh, A. T. Carrigan. (2018)

“Norme tecniche per le costruzioni DM 17 gennaio 2018”.
Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Gazzetta Ufficiale. (2018)

*“CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.
Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”.*
Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Gazzetta Ufficiale. (2019)

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

“Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse)”.
UNI EN 1015-3:2007. (2007)

“Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita”.

UNI EN 1015-11:2019. (2019)

“Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini”.

UNI EN 12390-3:2019. (2019)

“Aggregati per calcestruzzo”.

UNI EN 12620:2013. (2013)

“Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 1: Designazione e criteri di conformità”.

UNI EN 8520-1:2022. (2022)

“Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 2: Requisiti”.

UNI EN 8520-2:2022. (2022)

“Metodologia di valutazione della potenziale reattività alcali-silice degli aggregati”.

UNI EN 8520-22:2020. (2020)

“Acqua per calcestruzzi”.

UNI EN 1008:2003. (2003)

“Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio - Definizioni, classificazione e designazione”.

UNI EN 11039-1:2003. (2003)

7.2- Sitografia

<https://www.ingenio-web.it/articoli/calcestruzzi-ad-alte-prestazioni-approvata-la-versione-definitiva-del-cnr-dt-209-2013/>

https://www.laboratoriointec.it/normetecniche/2006/calcestruzzo_strutturale.pdf

https://sttan.it/norme/NTC2018/NTC2018_Circ_21_01_2019_n7-CS_LL_PP.pdf

<https://www.studiopetrillo.com/prontuario/calcestruzzo/manuale-concrete.pdf>

<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2018/02/20/42/so/8/sg/pdf>

<https://lc3.ch>

https://sttan.it/norme/NTC2018/NTC2018_Circ_21_01_2019_n7-CS_LL_PP.pdf

https://www.airesingegneria.it/site/assets/files/1241/lq_frc_208_2019.pdf