

INDIRIZZI PER LA PROGETTAZIONE SULL'INTERAZIONE TRA RETI IN GFRP E MALTE STRUTTURALI NEI SISTEMI DI RINFORZO CON INTONACO ARMATO CRM (COMPOSITE REINFORCED MORTAR)

2° PARTE

La ricerca, che **è stata pubblicata in due parti di cui questa è la seconda** (si rimanda alla [Prima Parte](#) dell'articolo pubblicato il 22.01.25) ha avuto il fine di individuare il comportamento allo sfilamento degli elementi costituenti le reti in GFRP (Glass Fiber Reinforced Mortar), distinti in "trama" e "ordito", contenuti all'interno di provini prismatici di malta, indagando i fenomeni di interazione in termini di adesione all'interfaccia malta-rete, per definire i parametri che governano tale legame. Questa seconda parte, sviluppata nell'ottica di una ottimizzazione dei materiali utilizzati nell'ambito della tecnica di rinforzo CRM (Composite Reinforced Mortar), contiene i risultati della ricerca eseguita sulla **malta strutturale Ecosan R150**, prodotta da CVR SpA, **additivata con fibre polipropilene**. **I risultati ottenuti dalle prove condotte, hanno evidenziato una proporzionalità diretta tra la resistenza allo sfilamento e la percentuale di fibre contenute all'interno della malta indagata, di classe M15.** In coerenza con quanto esposto nella prima parte della ricerca, anche in questo caso, i risultati hanno mostrato una perfetta omogeneità nelle resistenze a garanzia della qualità dei materiali testati e dell'attendibilità delle prove stesse. Inoltre, essendo cautelativi, potranno essere utilizzati come riferimento anche per le progettazioni.

Massimo Mariani ⁽¹⁾, Amedeo Ambrosini ⁽²⁾, Michele Menichetti ⁽²⁾

I paragrafi 1 e 2 che seguono sono contenuti anche nella [Prima Parte](#) dell'articolo pubblicato precedentemente.

1 INTRODUZIONE

Nell'ambito degli interventi di consolidamento strutturale degli edifici in muratura, diffuse sono le tecniche che prevedono l'impiego di sistemi compositi costituiti da intonaci rinforzati, armati con reti a base di fibre, che differiscono tra loro per la diversa natura e formato delle stesse e per il tipo e lo spessore della malta. In questo contesto, ha trovato largo impiego la tecnica dell'intonaco armato CRM (Composite Reinforced Mortar) che prevede l'applicazione sulla superficie muraria di uno strato di malta cementizia o a base calce e cemento, con contenuta al suo interno una rete preformata in materiale polimerico fibrorinforzato (FRP). Gli spessori di malta che caratterizzano tale sistema sono tipicamente variabili tra 3 e 5 cm e, a differenza di quanto accade con altre tecniche di rinforzo come quella FRCM (Fiber Reinforced Composite Mortar), l'adesione tra matrice e rete di armatura è affidata interamente all'interfaccia malta-rete e al suo comportamento fisico-meccanico, così come avviene nel caso dell'intonaco tradizionale armato con rete metallica e malte a base cementizia.

¹ Ricerche Applicate

² CVR SpA

A questo proposito, nonostante siano state condotte approfondite campagne di prova per la validazione sperimentale dell'efficacia della tecnica di rinforzo CRM (Composite Reinforced Mortar), indagini limitate sono state finora eseguite per investigare la natura dell'interazione esistente tra i materiali ad oggi più utilizzati: le reti in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) e le malte strutturali a base calce e cemento.

La ricerca condotta ha avuto l'obiettivo, attraverso un'estesa campagna di prove sperimentali, di indagare i fenomeni di interazione in termini di adesione all'interfaccia malta-rete per definire quali parametri governano tale legame. Trattandosi di sistemi compositi, in analogia con quanto avviene anche nel calcestruzzo armato tra barre in acciaio e calcestruzzo, l'attenzione è stata rivolta allo studio del legame tra i singoli elementi che costituiscono le reti in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), appartenenti ai sistemi Netfix CRM di CVR S.p.A., e le malte strutturali proposte in abbinamento ad essi.

È stato appositamente progettato e sviluppato un metodo di indagine, basato su prove di sfilamento di singole barre costituenti le maglie delle reti di armatura, “trame” e “orditi”, contenute nel getto di provini di malta, standardizzando metodi e tecniche esecutive, per garantire un'analisi ed un confronto critico dei risultati, rimanendo coerenti con gli stati di sollecitazione dei materiali quando in opera. I risultati ottenuti rappresentano il punto di partenza per una successiva fase della ricerca mirata all'ottimizzazione dell'efficacia dei materiali nell'ambito della tecnica CRM.

2 METODO DI INDAGINE E PROGRAMMA SPERIMENTALE

La ricerca si è configurata quale studio preliminare all'avvio di un processo sperimentale, basato su un "approccio a blocchi", caratterizzato da prove di complessità via via crescente, che ha avuto come obiettivo ultimo l'ottimizzazione dell'efficacia dei materiali nell'ambito della tecnica CRM (Composite Reinforced Mortar). **La fase preliminare, necessaria all'attivazione del processo, è stata finalizzata a confinare il campo di indagine per individuare le variabili in gioco e caratterizzare i parametri che maggiormente influenzano il funzionamento dei sistemi in esame e che potranno essere utili ai fini della progettazione.** Sono stati eseguiti **test di aderenza** che hanno interessato i singoli componenti delle reti da CRM, per ottenere una semplificazione del sistema reale (caratterizzato da un comportamento bidimensionale) e soddisfare requisiti di fattibilità legati alla necessità di realizzare un numero elevato di prove, al variare delle condizioni al contorno. **Il campione statistico dei risultati ottenuti, costituisce una base deterministica per sviluppi futuri della campagna sperimentale di CVR S.p.A.**

La campagna di prove è stata suddivisa in due fasi, i cui risultati sono riportati rispettivamente nei due articoli rinominati parti 1 e 2.

-fase 1, caratterizzazione del fenomeno di aderenza malta composito con l'utilizzo delle malte Ecosan R50, Ecosan R150, Intofort F, Intofort F300 e Spritz Beton.

- fase 2, ottimizzazione dell'aderenza malta-rete, indagando l'effetto dell'aggiunta alla malta Ecosan R150, di fibre polipropileniche in percentuali pari allo 0,30% e 0,60% in peso nella miscela.

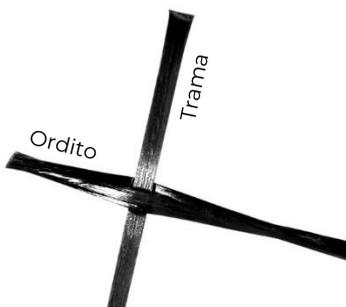
Il presente documento "Parte 2" della ricerca riporta i risultati ottenuti dalle prove eseguite nella *fase 2* mentre la [Parte 1](#), oggetto di un documento che è stato pubblicato in precedenza, è stata dedicata alla trattazione dei risultati ottenuti dalle prove effettuate nella *fase 1*.

2.1 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI TESTATI

Reti in GFRP

I campioni delle barre di armatura utilizzati nei test sono stati estratti dalla rete NETFIX CRM 490, rete preformata in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers) realizzata con fili in fibra di vetro ECR impregnati con resina termoindurente epossidica, appartenente al sistema NETFIX CRM 490 di CVR S.p.A.. La rete NETFIX CRM 490 ha una grammatura di 490 g/m² ed è prodotta in rotoli da 40 m² (altezza 2,00 m e lunghezza 20 m), con maglie quadrate di dimensione pari a 80x80 mm.

La tessitura della rete è costituita da due sistemi di barre disposte secondo direzioni ortogonali: barre pultruse prefabbricate con filo rettilineo denominate in seguito “trame” e barre con filo ritorto in corrispondenza dei nodi dette “orditi” (Figura 1).



(Figura 1) – Identificazione delle singole barre, “trama” e “ordito” costituenti le reti testate.

Le “trame” sono caratterizzate da un profilo superficiale liscio e regolare, mentre gli “orditi” hanno un profilo irregolare derivante dal processo di “tessitura” che prevede l'avvolgimento delle fibre attorno alle trame in corrispondenza dei nodi. Nell'ambito della campagna sperimentale, in luogo della diversa configurazione geometrica e con l'intento di indagare il diverso comportamento nelle due direzioni principali della tessitura, sono state eseguite prove di sfilamento distinte con campioni sia di “trama” che “ordito”, al variare delle restanti condizioni al contorno (tipologia di malta e lunghezza della barra annegata all'interno della malta).

Le malte

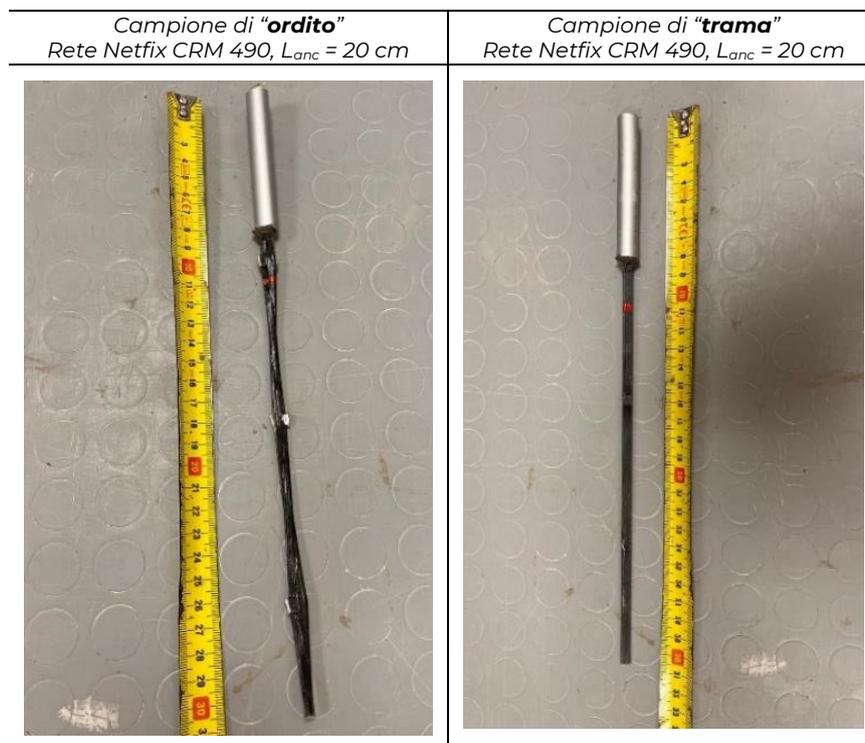
La realizzazione dei provini è stata eseguita utilizzando malte premiscelate cementizie o a base calce e cemento conformi alle norme UNI EN 998-2 o 1504-3 e selezionate tra quelle disponibili nella linea prodotti per il rinforzo delle strutture in muratura di CVR S.p.A..

La caratterizzazione meccanica delle malte è stata eseguita contestualmente alla realizzazione dei provini per le prove di sfilamento, prelevando il materiale da testare secondo le procedure previste dalla norma UNI EN 998-2 e, per quanto attiene i metodi di campionamento e di prova, alla EN 1015

nelle sue parti. Ogni campionamento è stato effettuato con la realizzazione di una terna di prismi 4x4x16 cm stagionati secondo le procedure riportate nelle norme suddette, poi utilizzati per la caratterizzazione delle resistenze a flessione e a compressione della malta. La procedura seguita ha previsto un primo test su uno dei prismi dopo 14 giorni di maturazione ed una seconda prova sui restanti due prismi a 28 gg dal confezionamento. In questo modo è stata assicurata una corrispondenza diretta tra i risultati ottenuti dai campioni utilizzati per le prove a sfilamento ed i parametri meccanici delle malte utilizzate nel confezionamento degli stessi.

2.2 PROGETTAZIONE E CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI

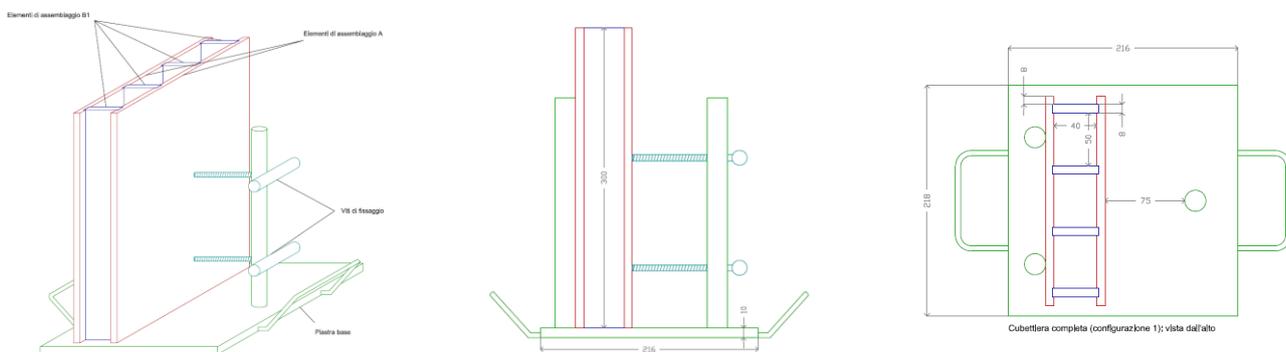
I provini utilizzati nei test di sfilamento sono costituiti da prismi di malta di dimensioni pari a 80x50x300 mm all'interno dei quali è stata inserita una barra di materiale composito di "trama" o "ordito", estratta da campioni delle rete Netfix CRM 490 appartenente ai sistemi Netfix CRM di CVR S.p.A.. I campioni di rete sono stati confezionati eseguendo il prelievo di una porzione di barra singola ("trama" o "ordito") tagliata a misura secondo le lunghezze previste per l'ancoraggio all'interno della malta, senza la presenza di elementi trasversali. All'estremità libera di ciascuna barra è stato applicato un tallone di afferraggio in alluminio (Figura 2) per consentire la messa in trazione della stessa, attraverso le pinze di afferraggio della macchina di prova.



(Figura 2) – Campioni di "trama" e "ordito"

Nella fase di confezionamento, la “barra” viene centrata rispetto allo spessore del prisma ed inserita all’interno del provino per una determinata lunghezza. Ai fini della ricerca sono state individuate tre lunghezze di riferimento pari a 10 cm, 15 cm e 20 cm, ritenute rappresentative per il funzionamento meccanico della rete nei sistemi CRM. Le dimensioni del provino sono state definite sulla base di valutazioni che hanno tenuto in considerazione gli spessori di intonaco tipicamente utilizzati nell’esecuzione del rinforzo CRM e la dimensione della maglia della rete. Immaginando il prisma come un elemento estratto da una porzione di intonaco armato, il suo spessore pari a 50 mm è associato agli spessori di intonaco normalmente realizzati in opera ed indicati dalla linea guida^(*), mentre la larghezza pari a 80 mm corrisponde all’interasse tra le barre che realizzano la tessitura della rete. Sulla base di queste considerazioni, la sezione trasversale del prisma (80x50 mm) rappresenta l’area di influenza della singola barra di rete all’interno della malta in direzione del suo sviluppo. La lunghezza del prisma (pari a 300 mm) è stata invece definita, in modo da contenere le lunghezze di ancoraggio ipotizzate e massimizzata in funzione delle dimensioni massime consentite dalla macchina utilizzata per eseguire le prove.

Ciascun campione di prova è costituito da una terna di provini aventi le stesse caratteristiche in termini di malta, tipologia di barra e lunghezza della barra contenuta nel provino, confezionati mediante una cubettiera in acciaio appositamente progettata per la ricerca (Figura 3).



(Figura 3) – Progettazione ed esecuzione delle cubettiere

(*)Linea Guida per la identificazione, la qualificazione e il controllo di accettazione dei sistemi a rete preformata in materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti con la tecnica dell'intonaco armato CRM (Composite Reinforced Mortar).

La preparazione della malta per il confezionamento dei prismi è stata condotta in conformità a quanto previsto dalla norma EN 1015-2 e la procedura di maturazione dei provini è stata effettuata secondo quanto previsto dalla norma UNI EN 998-2 per le malte idrauliche (Figura 4).

Ciascuna terna di provini è stata identificata attraverso una sigla univoca che ha consentito di definire le caratteristiche dei campioni di prova.

A titolo di esempio prendendo la terna siglata "490-T-R150-10", risulta:

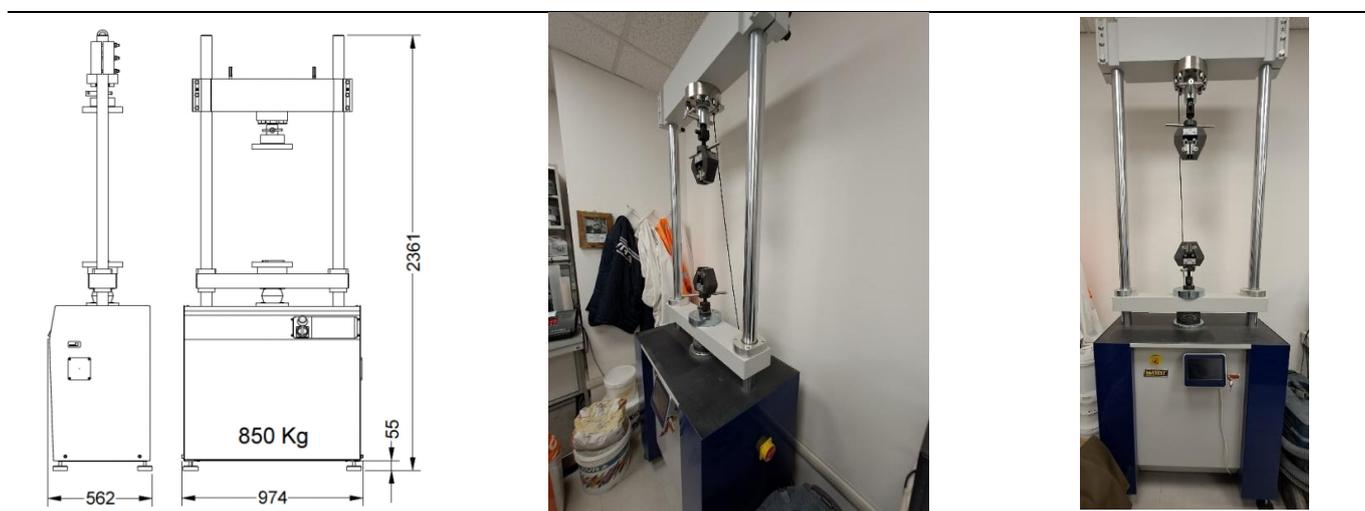
- 490 - rete NETFIX CRM 490;
- T - elemento della rete testato, "trama";
- R150 - malta Ecosan R150;
- 10 - lunghezza di ancoraggio della barra all'interno della malta, pari a 10 cm;



(Figura 4) – Terna di provini in attesa di prova

2.3 METODO DI PROVA

Le prove di sfilamento sono state eseguite con macchina universale “Unitronic 200kN” di Matest (Figura 5). La macchina è composta da un robusto basamento che contiene il gruppo di trasmissione e la strumentazione Hardware di controllo. Il rilevamento dell’effetto del carico avviene tramite una cella estensimetrica, mentre la misura ed il controllo dello spostamento della traversa avviene tramite dispositivo di misura elettronico incorporato alla macchina.



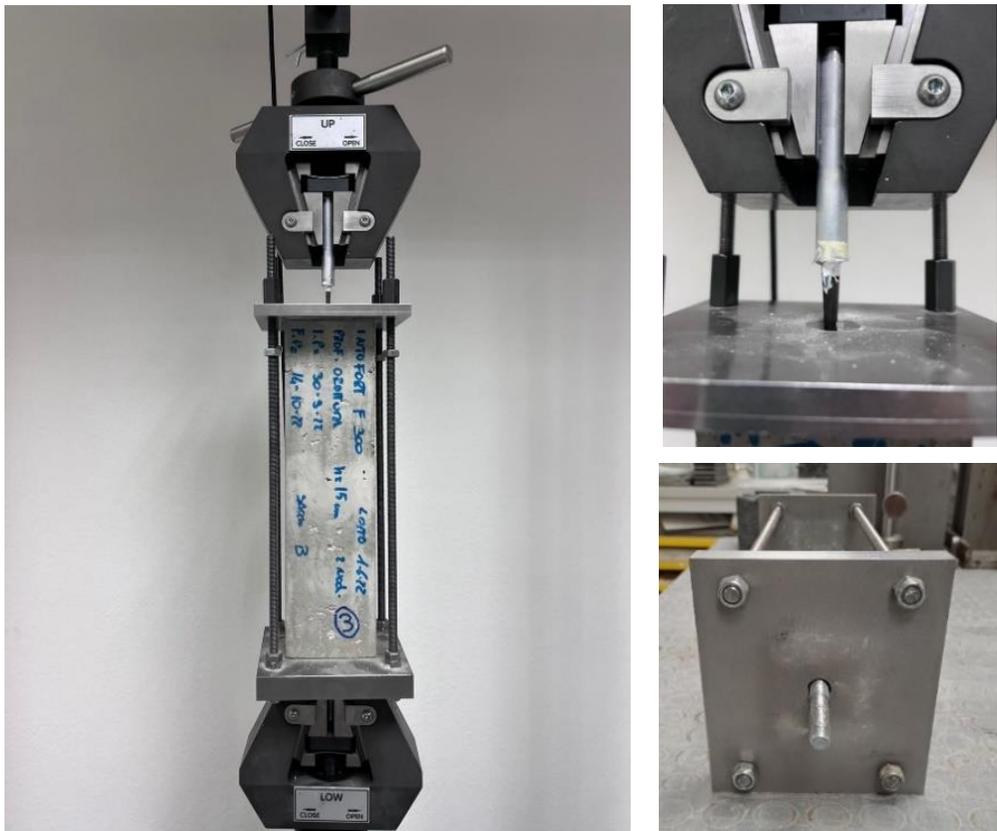
(Figura 5) - Macchina di prova, Matest Unitronic 200 kN

Il setup di prova prevede l'utilizzo di una specifica “camicia” in acciaio (Figura 6) progettata per consentire la messa in trazione della barra di armatura e, al tempo stesso, assecondare quanto più possibile gli stati di sollecitazione cui sono sottoposti i materiali quando in opera.

La prova è stata eseguita in controllo di spostamento con gradiente di 1mm/min. Per la terna di provini, aventi identiche caratteristiche, sono stati registrati: il carico di picco con il relativo spostamento, la modalità di rottura, la media della forza massima raggiunta nelle tre prove ed il grafico forza-spostamento in continuo.



(Figura 6) - Camicia per l'afferraggio del provino



(Figura 7) - Sistema di afferraggio del provino

Nell'esecuzione delle prove sono state identificate le seguenti modalità di rottura:

A - Rottura della barra: senza sfilamento; la barra si rompe a trazione nella zona libera compresa tra tallone e malta.

B – Distacco per sfilamento: avvenuto nella malta, con evidente presenza di residui di malta aderente alla barra a seguito dell'estrazione.

C – Distacco con rottura della malta: avvenuto con lesioni diffuse sulla faccia superiore del prisma e sulle facce laterali.

D - Sfilamento della barra: avvenuto con lievi fessurazioni nella malta, anche solo sulla faccia superiore del prisma.

E - Sfilamento della barra: verificatosi senza evidenti alterazioni della malta.

F – Rottura della malta a causa dello sgretolamento del prisma in prossimità della zona di contatto con la camicia, o **sfilamento del tallone dalla barra**. Tali modalità di rottura sono state considerate identificative di una prova non valida.

Nelle Tabella 1 riportata di seguito sono riepilogate le serie complete delle terne testate nelle fase2 della campagna di prove.

(Tabella 1) – Fase 2- Tabella riepilogativa dei campioni testati

Sigla Campione	Rete	Elemento rete	Malta	Lunghezza di Ancoraggio
490 - O - R150 - 10 - 0,3FIB	Netfix CRM 490	Ordito	Ecosan R150 +0,3% Fibre	10 cm
490 - O - R150 - 15 - 0,3FIB	Netfix CRM 490	Ordito	Ecosan R150 +0,3% Fibre	15 cm
490 - O - R150 - 10 - 0,6FIB	Netfix CRM 490	Ordito	Ecosan R150 +0,6% Fibre	10 cm
490 - O - R150 - 15 - 0,6FIB	Netfix CRM 490	Ordito	Ecosan R150 +0,6% Fibre	15 cm
490 - T - R150 - 10 - 0,3FIB	Netfix CRM 490	Trama	Ecosan R150 +0,3% Fibre	10 cm
490 - T - R150 - 15 - 0,3FIB	Netfix CRM 490	Trama	Ecosan R150 +0,3% Fibre	15 cm
490 - T - R150 - 10 - 0,6FIB	Netfix CRM 490	Trama	Ecosan R150 +0,6% Fibre	10 cm
490 - T - R150 - 15 - 0,6FIB	Netfix CRM 490	Trama	Ecosan R150 +0,6% Fibre	15 cm

Le fibre utilizzate per additivare le malte sono fibre polipropileniche di lunghezza pari a circa 20 mm inserite nella fase di miscelazione della malta in percentuale pari allo 0,30% e 0,60% in peso (Figura 8).



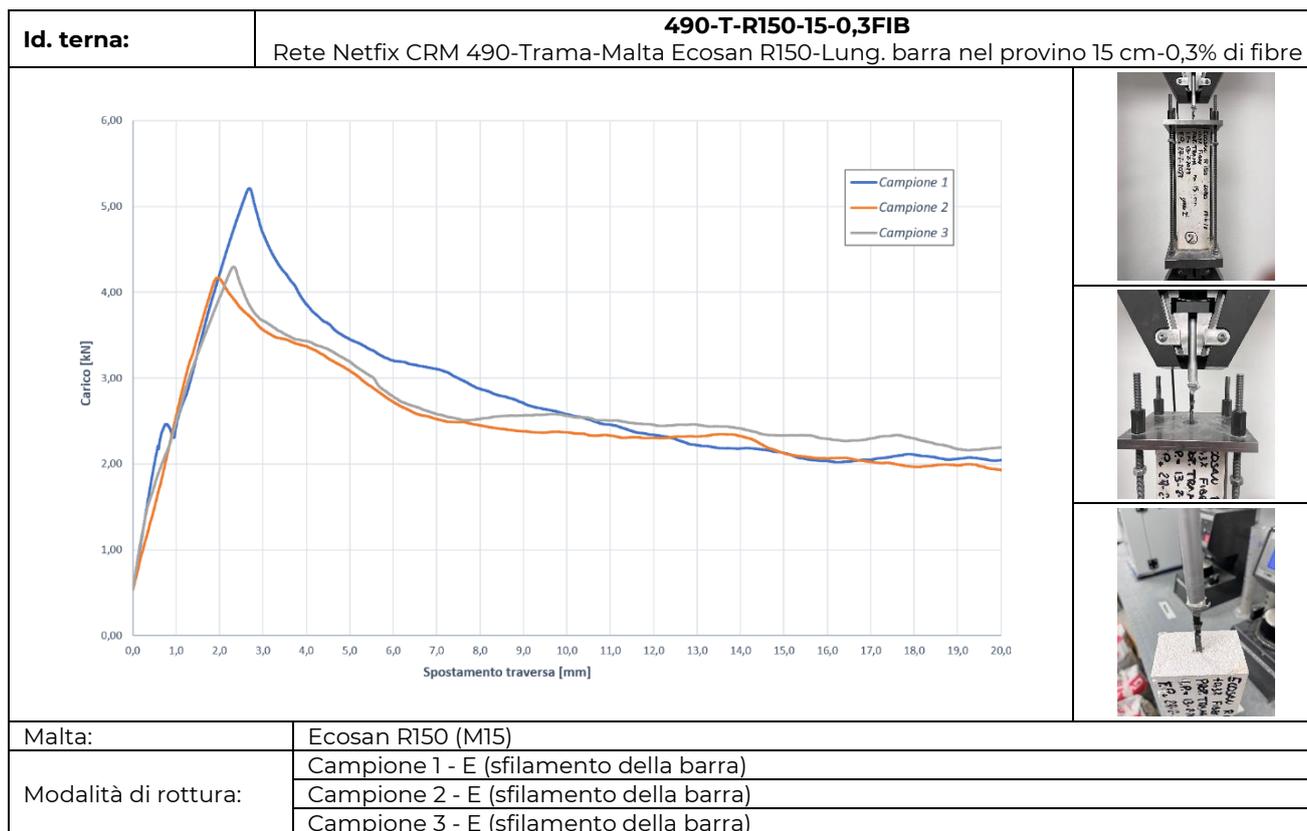
(Figura 8) – Fibre polipropileniche utilizzate nel confezionamento dei provini della Fase 2

3 RISULTATI DELLE PROVE (LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO BARRE = 15 cm) – FASE 2

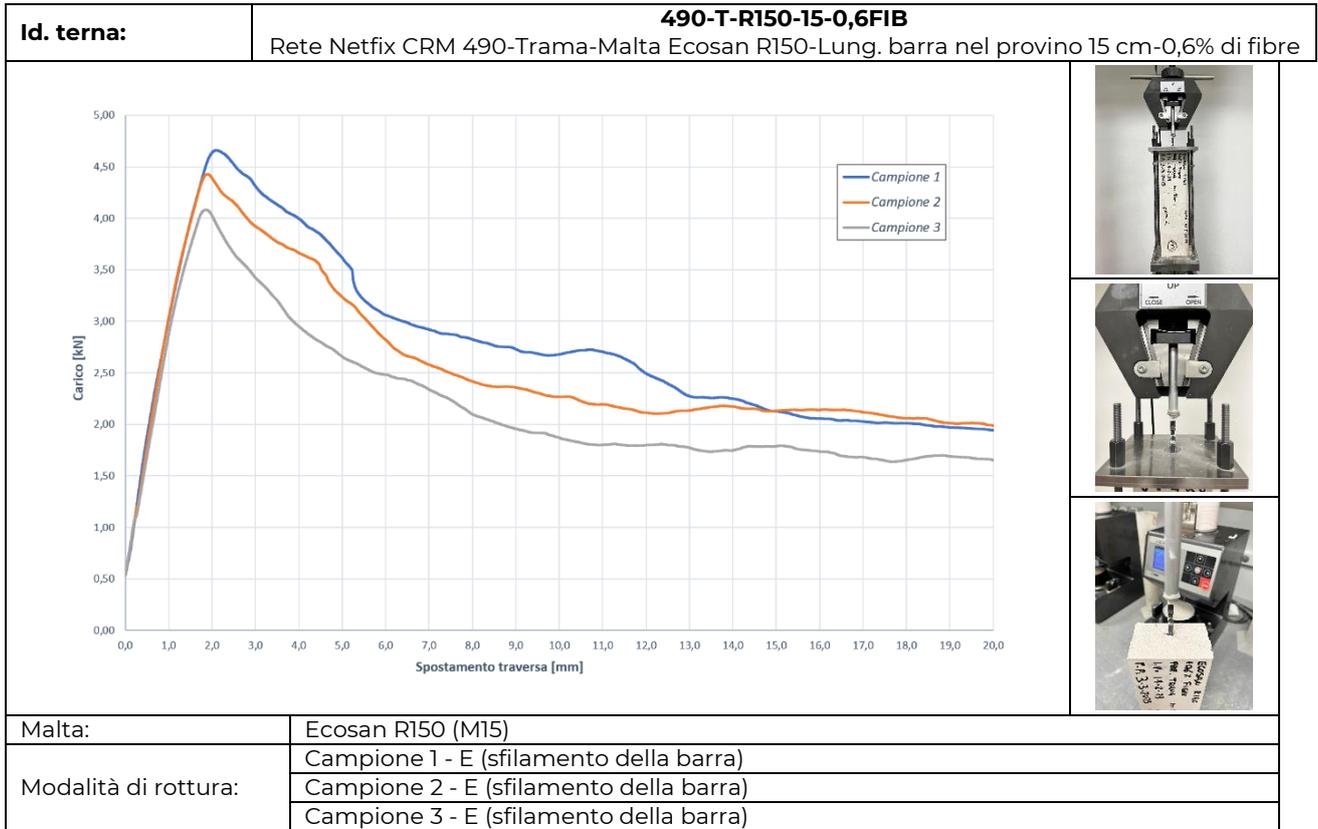
La seconda fase della campagna sperimentale è stata implementata nell’ottica di un’ottimizzazione dei materiali utilizzati nell’ambito della tecnica CRM, con particolare attenzione alle malte. La ricerca è stata indirizzata a valutare l’influenza sul legame di adesione in riferimento all’utilizzo di malte fibrorinforzate con fibre propileniche. **Le fibre sono state introdotte nella miscela della malta ECOSAN R150 con percentuali differenti pari allo 0,3% e 0,6% in peso.**

I risultati ottenuti hanno mostrato una diversa risposta nella resistenza allo sfilamento al variare della tipologia di elemento di rete testato.

3.1 TRAMA-RISULTATI DELLE PROVE FASE 2

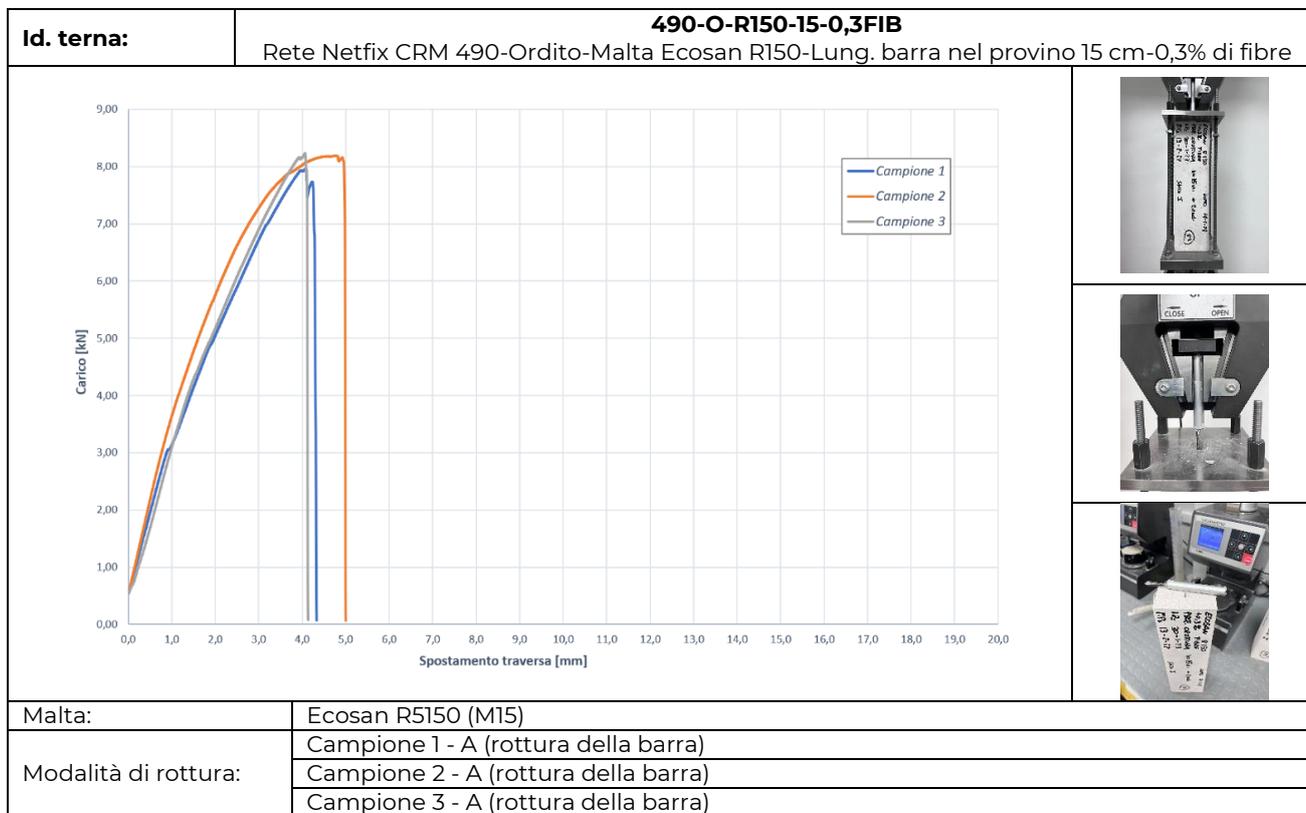


(Figura 19) – **Trama** - Risultati delle prove sulla terna “490-T-R150-15-0,3FIB”

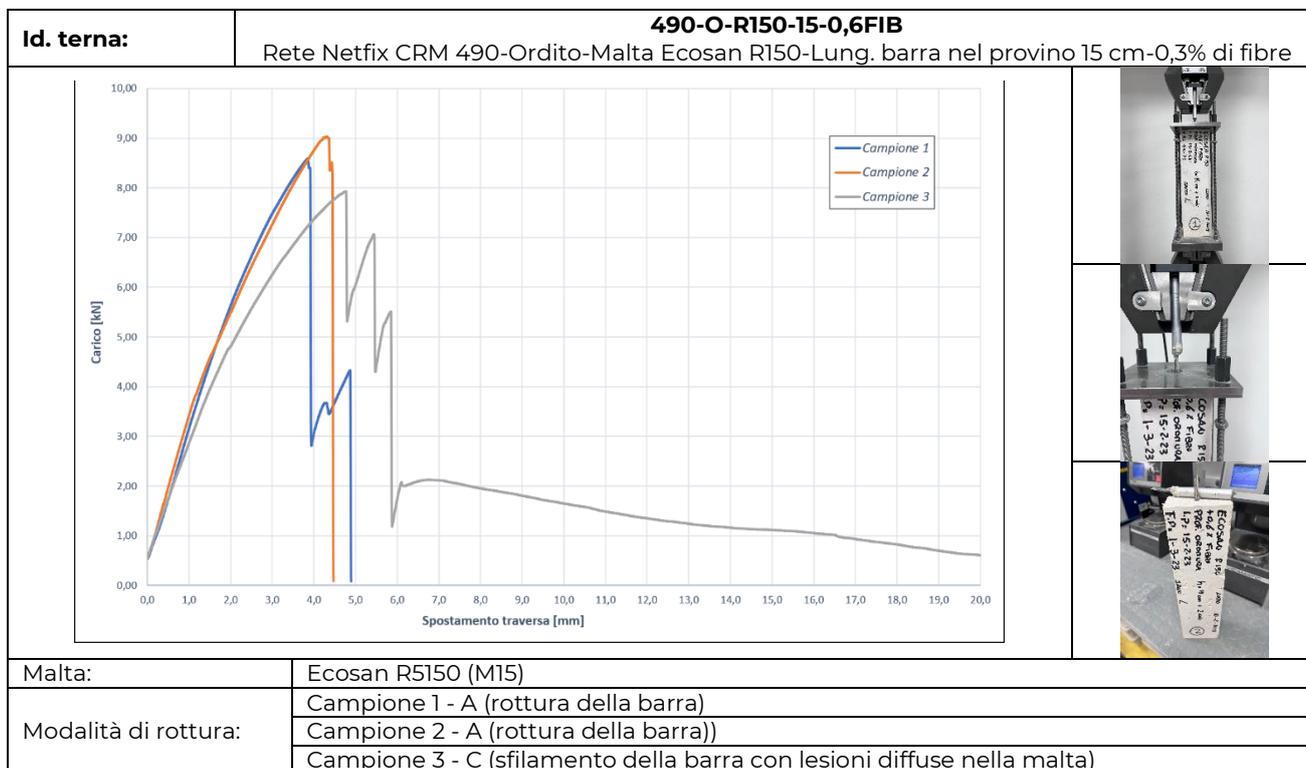


(Figura 20) – **Trama** - Risultati delle prove sulla terna "490-T-R150-15-0,6FIB"

3.2 ORDITO - RISULTATI DELLE PROVE FASE 2



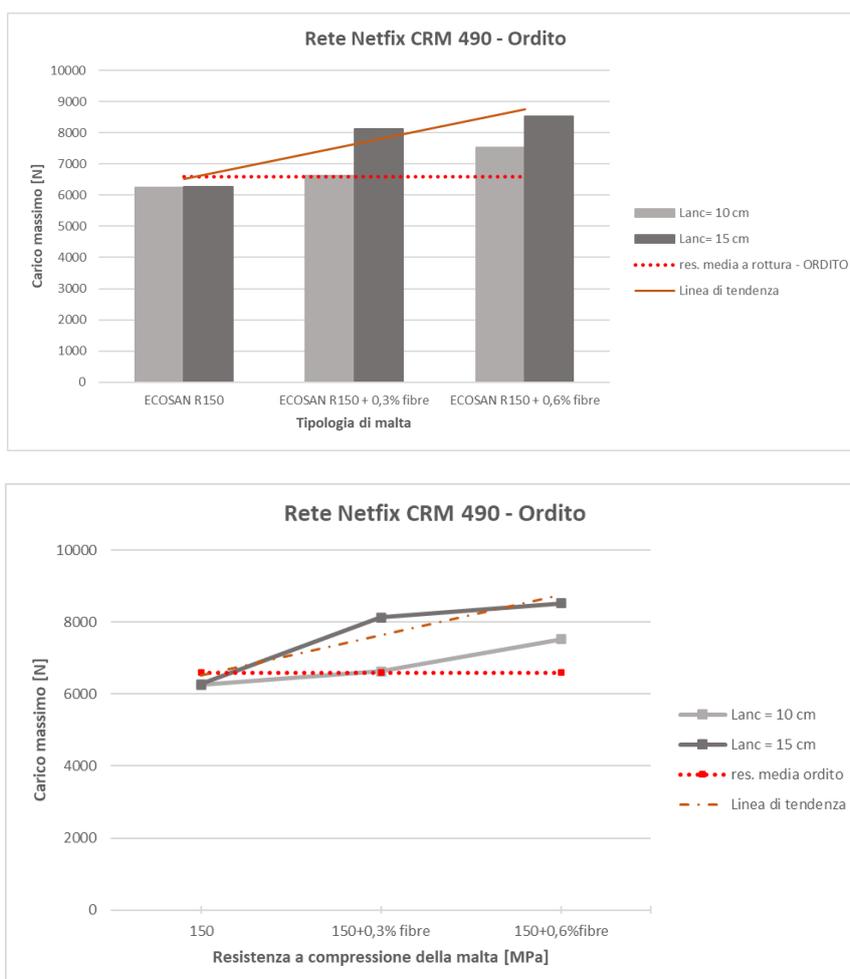
(Figura 21) – **Ordito** - Risultati delle prove sulla terna "490-O-R150-15-0,3FIB"



(Figura 22) – **Ordito** - Risultati delle prove sulla terna "490-O-R150-15-0,6FIB"

4 CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI – FASE 2

In questo caso, soprattutto nei test eseguiti sull'ordito, la presenza delle fibre nella malta ha giocato un ruolo attivo nel meccanismo di resistenza per adesione allo sfilamento. Le fibre, infatti, garantiscono un legame che limita lo sviluppo delle lesioni (deformazioni) all'interno della malta, opponendosi alla loro formazione e soprattutto alla loro propagazione. Lo sfilamento della barra di "ordito" è subordinato allo scorrimento dei nodi presenti su di essa, che coinvolgono il volume di malta circostante, alla stessa stregua di quanto avviene con le asperità superficiali delle barre di acciaio ad aderenza migliorata nel calcestruzzo armato. Per quanto riportato in precedenza, l'aggiunta di fibre allo 0,3% e allo 0,6% in peso alla malta Ecosan R150, ha consentito un sensibile incremento della resistenza allo sfilamento dell'elemento "ordito" della rete testata (Figura 27) che si attesta mediamente intorno al +18% con lo +0,3 % in peso di fibre e pari a +28% nel caso dello +0,6% di fibre.



(Figura 27) – Involuppo dei valori medi delle resistenze allo sfilamento dell' "Ordito" in funzione delle caratteristiche meccaniche (resistenza a compressione) della malta testata con l'aggiunta di fibre

5 CONCLUSIONI – PARTE 2

La campagna sperimentale è stata condotta attraverso prove di sfilamento di barre in composito appartenenti a reti in GFRP, distinte in “trame” e “orditi”, inserite all’interno di prismi di malta confezionati al variare delle lunghezze di ancoraggio e della tipologia di malta. Nella prima fase della ricerca i provini sono stati confezionati con malte strutturali per la realizzazione di intonaci armati quali: Ecosan R50, Ecosan R150, Intofort F, Intofort F300 e Spritz Beton. Nella seconda fase, riportata nella presente seconda parte, nell’ottica di un’ottimizzazione dell’efficacia dei materiali, è stato indagato l’effetto sulla resistenza allo sfilamento prodotto dall’aggiunta alla malta Ecosan R150, di fibre polipropileniche in percentuali differenti pari allo 0,3% e allo 0,6% in peso.

Le prove eseguite nella fase 1 hanno mostrato una proporzionalità diretta tra resistenza allo sfilamento degli elementi costituenti le reti e resistenza a compressione delle malte indagate. Dall’analisi qualitativa dei grafici forza-spostamento ricavati dai test, è stato inoltre possibile associare il comportamento degli elementi di rete testati, ai differenti atteggiamenti, ampiamente studiati, delle barre di acciaio da calcestruzzo armato lisce o ad aderenza migliorata.

I risultati della fase 2 della ricerca hanno evidenziato come la presenza delle fibre aggiunte alla malta, in particolare nel caso dell’ordito, garantisce un ulteriore incremento della resistenza allo sfilamento rispetto alla stessa malta non additivata. I materiali testati, prodotti da CVR SpA, hanno mostrato una perfetta omogeneità nelle resistenze a garanzia della loro qualità e dell’attendibilità dei risultati delle prove stesse.

Le resistenze allo sfilamento nelle due fasi della ricerca, ottenute distintamente per “trama” e “ordito”, potranno essere di riferimento anche nelle modellazioni per le progettazioni strutturali essendo peraltro cautelative rispetto alle resistenze della rete nel suo insieme.