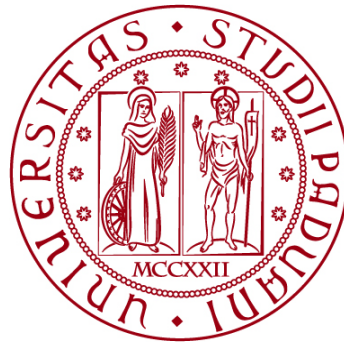


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
AMBIENTALE

Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

PROVE DI TAGLIO DIRETTO SU CAMPIONI IN
MURATURA RINFORZATI CON FIBRE DI BASALTO

(DIRECT SHEAR TESTS ON MASONRY SAMPLES
REINFORCED WITH BASALT FIBER)

Relatore: Prof. Ing. Carlo Pellegrino
Correlatori: Ing. Paolo Zampieri
Ing. Santinon Davide

Laureando: Brando Tiso
2005092 IC

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

ABSTRACT

Negli ultimi anni la tecnologia dei materiali compositi fibrorinforzati si è diffusa nel campo dell'ingegneria strutturale per riabilitare opere esistenti. Tali sistemi permettono di aumentare la capacità di carico dell'opera strutturale e migliorare il comportamento in caso di sisma, evitandone la demolizione.

Il seguente lavoro riporta un inquadramento teorico e discute i risultati ottenuti da un'indagine sperimentale sul comportamento dei compositi TRM (Textile Reinforced Mortar). Nello specifico, il rinforzo è stato realizzato con una rete in fibra di basalto apprettata¹ con resina, accoppiato con una matrice inorganica a base di calce e applicato su substrati in muratura rettilinei e curvilinei. Sono state poi eseguite prove di taglio diretto per valutare il comportamento di adesione dei sistemi TRM e l'aumento di capacità portante di una generica sezione in muratura rinforzata.

La decisione di esaminare l'interazione tra questi due materiali non è stata casuale: la calce è stata selezionata poiché è compatibile con il patrimonio storico esistente, mentre il basalto è stato scelto per la sua sostenibilità, essendo perfettamente riciclabile.

¹ Una "fibra apprettata" è una fibra che è stata trattata con resine o altri agenti per renderla più resistente e adatta a essere utilizzata in materiali compositi.

Indice

1. Introduzione.....	1
2. Stato dell'arte	3
2.1 Definizione e classificazione dei materiali compositi.....	3
2.2 Matrici cementizie vs Matrici polimeriche	4
2.3 FRP vs FRCM.....	4
2.4 Applicazioni comuni	5
2.5 Meccanismi di crisi	7
2.6 Prove di taglio diretto.....	7
2.7 Studi	9
2.7.1 Matrix–fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach	9
2.7.2 Experimental and analytical investigation of bond behavior in glass fiber-reinforced composites based on gypsum and cement matrices.....	12
2.7.3 Debonding of composites on a curved masonry substrate: Experimental results and analytical formulation	16
3. Sperimentazione	21
3.1 Caratterizzazione meccanica dei materiali utilizzati.....	21
3.2 Preparazione provini	26
3.3 Configurazione di prova.....	27
4. Risultati e Discussione.....	31
4.1 Lavori futuri	37
Bibliografia	39

Elenco figure

- Figura 1:** Meccanismi di crisi di un rinforzo annegato in una matrice cementizia.
- Figura 2a:** Risposta di carico-scorrimento ideale per un FRCM.
- Figura 2b:** Fasi del meccanismo di trasferimento delle sollecitazioni corrispondenti ai vari punti della risposta di carico-scorrimento ideale.
- Figura 3:** Profili di deformazione assiale idealizzati per i punti della Figura 2a.
- Figura 4:** Diagrammi carico-scorrimento globale determinati dalla prova a taglio doppio per il composito a matrice gessosa e a matrice cementizia con diverse lunghezza di legame [7].
- Figura 5:** Configurazione sperimentale, substrato rettilineo e curvilineo.
- Figura 6:** Curve sperimentali di carico-scorrimento [8].
- Figura 7a:** Profilo di deformazione per substrato rettilineo [8].
- Figura 7b:** Profilo di deformazione per substrato curvilineo ($R = 5000$ per SRG e $R = 1800$ per CFRCM) [8].
- Figura 8a:** Set-up macchina di test a flessione.
- Figura 8b:** Spezzoni di provino ottenuti dalla rottura a flessione al termine della prova.
- Figura 9:** Set-up macchina di test a compressione.
- Figura 10:** Rete in fibra di basalto tipo B-NET 450BA.
- Figura 11:** Irregolarità delle maglie della rete.
- Figura 12:** Set-up prova di taglio diretto per un generico campione a substrato rettilineo.
- Figura 13:** Set-up prova di taglio diretto per un generico campione a substrato curvilineo.
- Figura 14:** Metodo di ripartizione dei carichi di Courbon applicato alla rete in fibra di basalto.
- Figura 15:** Curve di sollecitazione assiale della fibra in funzione dello scorrimento globale per campioni aventi substrato con $R = \infty$.
- Figura 16:** Esempio di modalità di rottura a trazione della fibra per il campione $R_{\infty_2_280_80}$.
- Figura 17:** Curve di sollecitazione assiale della fibra in funzione dello scorrimento globale per campioni aventi substrato con $R_2 = 1508$ mm.

Figura 18: Esempio di modalità di rottura a trazione della fibra per il campione R2_3_280_80.

Figura 19: Curve di sollecitazione assiale della fibra in funzione dello scorrimento globale per campioni aventi substrato con $R3 = 800$ mm.

Figura 20: Esempio di modalità di rottura a trazione della fibra per il campione R3_2_280_80.

Figura 21: Grafico di confronto delle curve ottenute dalle tre serie di campioni, che mostra la variabilità dei risultati in relazione ai raggi di curvatura.

Elenco tabelle

Tabella 1: Caratteristiche principali delle matrici cementizie e delle matrici polimeriche [13].

Tabella 2: Punti caratteristici dei diagrammi carico-scorrimento globale registrati durante la prova per il sistema composito a matrice gessosa [7].

Tabella 3: Punti caratteristici dei diagrammi carico-scorrimento globale registrati durante la prova per il sistema composito a matrice cementizia [7].

Tabella 4: Risultati delle prove a flessione e compressione della malta di calce.

Tabella 5: Dati tecnici della fibra di basalto forniti dal produttore.

1. Introduzione

I più recenti eventi sismici italiani (Abruzzo 2009, Emilia 2012, Amatrice 2016) hanno messo in evidenza fragilità e vulnerabilità del costruito storico in muratura, dovuto al loro intrinseco comportamento meccanico fragile, di cui sono responsabili i giunti di malta che costituiscono la zona debole del sistema.

Tali modalità di frattura vanno in controtendenza rispetto agli standard di duttilità e di assorbimento dell'energia, i quali rappresentano pilastri fondamentali per assicurare la solidità strutturale e la protezione delle persone in situazioni eccezionali. È quindi imprescindibile esaminare approfonditamente soluzioni di rinforzo in grado di potenziare la resistenza e la duttilità, nel rispetto dei principi di compatibilità, traspirabilità e reversibilità.

In questo contesto, negli ultimi vent'anni, hanno avuto grande diffusione i materiali compositi fibrorinforzati. Si tratta di materiali composti da una fibra di rinforzo immersa in una matrice di natura organica o inorganica, utilizzati per il miglioramento delle prestazioni strutturali di costruzioni esistenti, sia in muratura che in calcestruzzo armato, per la loro capacità di conferire elevate resistenze meccaniche in spessori contenuti e adottando materiali leggeri.

Il seguente lavoro di tesi si propone di esaminare il tema del rinforzo strutturale. Si struttura nel seguente modo: si apre con una sezione dedicata alla revisione della letteratura scientifica e tecnica più rilevante, al fine di fornire una panoramica delle conoscenze attuali relative all'argomento trattato (Capitolo 2). Successivamente, viene presentata una campagna sperimentale basata su prove di taglio diretto di un sistema TRM costituito da una rete in fibra di basalto apprettata con resina, accoppiato con una matrice inorganica a base di calce e applicato su substrati in muratura rettilinei e curvilinei (Capitolo 3). Infine, il lavoro si conclude con un'analisi comparativa e una discussione dei risultati ottenuti (Capitolo 4).

2. Stato dell'arte

2.1. Definizione e classificazione dei materiali compositi

L'ASM materials engineering dictionary [2] definisce un materiale composito come la combinazione di due o più materiali, che differiscono nella forma o composizione a livello macroscopico, agiscono insieme mantenendo la loro identità e mostrano un'interfaccia tra di loro. L'impiego di più materiali in combinazione consente di ottenere prestazioni superiori rispetto a quelle dei singoli componenti, grazie alla sinergia delle loro proprietà.

In genere si distinguono due fasi in un materiale composito, una fibra e una matrice.

In particolare:

- La fase fibra rappresenta il rinforzo, che conferisce al composito le resistenze meccaniche, motivo per cui vengono adottati materiali ad alta resistenza (fibra di carbonio, di vetro, di basalto, di acciaio, aramide, ecc...);
- La fase matrice assicura il mantenimento della forma del rinforzo, preserva la corretta adesione tra elemento rinforzato e rinforzo, protegge le fibre da attacchi fisico-meccanici, ma soprattutto trasferisce le forze dall'elemento strutturale rinforzato al rinforzo e le ripartisce tra le fibre.

A seconda della natura della matrice utilizzata si distinguono rinforzi FRP (Fiber Reinforced Polymer) a matrice polimerica di natura organica (resine epossidiche termoindurenti o termoplastiche) e rinforzi FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) a matrice inorganica (calce e/o cemento).

In generale si preferisce utilizzare malte a base di calce in quanto ritenute soluzioni più compatibili con la natura delle strutture murarie storiche, per i vantaggi che offre in termini di durabilità, versatilità e sostenibilità.

2.2 Matrici cementizie vs Matrici polimeriche

Nella tabella seguente, si sono riassunte le principali differenze fisico-meccaniche tra le due matrici. La corretta valutazione critica di queste differenze è fondamentale per coloro che intendono concepire un rinforzo in materiale composito e costituisce la base per una scelta progettuale accurata.

Tabella 1: Caratteristiche principali delle matrici cementizie e delle matrici polimeriche [13]

Matrice	Modulo elastico [GPa]	Resistenza a trazione (per flessione) [MPa]	Resistenza alle alte temperature	Umidità del supporto	Lavorabilità	Tossicità	Comportamento a rottura	Viscosità	Susce ttibilità raggi UV
Cementizia	6,0	(a 28 gg) 3,5	Identica a quella del supporto in calcestruzzo	Favorisce l'adesione in quanto a base inorganica	Tra i 5°C e i 40°C non esistono grandi differenze nel tempo di lavorabilità	Nulla	Duttile	Alta allo stato fluido e quindi difficile impregnazione delle fibre	No
Polimerica	2,7-3,6	40-82	Perdono le loro caratteristiche di adesione sopra gli 80°C	Non possono essere applicate su sottofondi	Applicate a temperatura ambiente (20-25°C)	Pericolosità sia per contatto, sia per inalazione	Fragile	Bassa allo stato fluido e quindi facile impregnazione delle fibre	Si

2.3 FRP vs FRCM

Ad oggi, il sistema di rinforzo FRCM è una delle tecniche maggiormente utilizzate nel campo del consolidamento e della riabilitazione di strutture murarie danneggiate. Questo perché superano alcuni svantaggi dei rinforzi in FRP, come la mancanza di traspirabilità, la resistenza alle alte temperature, l'impossibilità di aderire a superfici umide e irregolari, l'incompatibilità fisica e chimica con i materiali appartenenti alle tecniche costruttive tradizionali e la suscettibilità ai raggi UV. Nei sistemi FRP, inoltre, il trasferimento delle sollecitazioni di taglio dal supporto al composito avviene in un'interfaccia situata all'interno del mattone, a pochi millimetri di distanza dal giunto di matrice utilizzato per fissare il rinforzo. Al contrario, nei sistemi FRCM, l'effettiva zona di trasferimento delle sollecitazioni tra il rinforzo e il substrato riguarda l'interfaccia matrice-fibra. Questi ultimi sono quindi preferibili per il rinforzo di strutture murarie antiche, poiché il cedimento non danneggia la muratura sottostante. Gli FRCM aderenti alla muratura cedono per rottura a trazione delle fibre all'interno o all'esterno della matrice o per

scivolamento del tessuto con meccanismi resistivi fricolari post picco². L'attrito fornisce al sistema un comportamento più duttile rispetto agli FRP [5], [1].

2.4 Applicazioni comuni

L'impiego dei materiali compositi FRP nell'ingegneria strutturale è vario: si va dal rinforzo a flessione di travi in calcestruzzo armato con lamine o tessuti di FRP, al rinforzo a taglio mediante applicazioni ad U o avvolgimenti, al confinamento di elementi come pilastri e colonne mediante fasciature esterne, al rinforzo di pannelli murari, elementi curvi come archi e volte, fino al rinforzo di solai in legno.

Per quanto riguarda i compositi FRCM, l'applicazione più diffusa riguarda l'aumento della resistenza a taglio dei pannelli in muratura tramite l'applicazione del composito su entrambi i lati della parete. Altri utilizzi includono il confinamento di pilastri in calcestruzzo armato e colonne in muratura, oltre al rinforzo di volte ed archi [4].

Grazie all'applicazione esterna di questi compositi, il comportamento degli elementi strutturali risulta migliorato in senso assiale [3], flessionale [9], torsionale [11] e a taglio [6].

È essenziale esaminare attentamente ogni singola applicazione e selezionare i componenti che assicurino la migliore compatibilità fisico-chimica e meccanica sia tra le fibre e la matrice del rinforzo, sia rispetto al substrato da trattare. Non è possibile abbinare matrici e tessuti senza evidenze sperimentali e applicative sulle loro proprietà, sul risultante composito e sull'interazione supporto-rinforzo. Il successo dell'intervento dipende principalmente dall'adesione tra il supporto e il rinforzo, dalla corretta impregnazione e dall'allineamento preciso delle fibre. L'aderenza ottimale tra composito e supporto è essenziale per il trasferimento delle tensioni e costituisce un requisito fondamentale per l'efficacia del rinforzo.

La tecnica di incollare uno strato di FRCM su una muratura rappresenta un'alternativa moderna alle tradizionali tecniche, quali iniezioni di resine,

² I "meccanismi resistivi fricolari post picco" sono processi fisici che si verificano in materiali e strutture soggetti a sollecitazioni dinamiche, come terremoti o impatti improvvisi, dopo aver superato il picco di carico massimo. Questi meccanismi comprendono fenomeni come deformazioni plastiche, movimenti relativi tra parti della struttura, rottura di collegamenti, che generano una resistenza aggiuntiva alla deformazione e alla dissipazione dell'energia.

inserimento di tiranti in acciaio, aggiunta di contrafforti³ e utilizzo di intonaci rinforzati. Queste vecchie pratiche sono spesso costose, richiedono tempi prolungati, possono avere un impatto estetico negativo e aumentano la massa dell'elemento strutturale.

L'applicazione di un FRCC segue i seguenti passaggi:

- **Preparazione del muro:** questo primo passo implica la rimozione di eventuali danni precedenti, come crepe o distacchi, e la pulizia della superficie per rimuovere detriti, polvere o sostanze che potrebbero compromettere l'adesione del materiale;
- **Applicazione della malta di base:** si applica uno strato sottile di malta sulla superficie del muro previa saturazione con acqua della superficie. Questo strato serve da base per l'adesione del rinforzo in fibra;
- **Posizionamento del rinforzo tessile:** il tessuto fibroso viene attentamente posizionato, seguendo precise direzioni di orientamento in base alle sollecitazioni previste e ai requisiti strutturali del progetto;
- **Applicazione della malta di finitura:** si applica un altro strato di malta sopra il tessuto in fibra, saturandolo completamente. Questo strato garantisce una superficie uniforme e resistente per proteggere il sistema FRCC dai danni ambientali e migliorare l'aspetto estetico;
- **Presa e indurimento:** seguendo le indicazioni del produttore si consentono i tempi necessari di presa e indurimento del materiale;
- **Verifica della qualità:** è essenziale condurre test di controllo qualità per garantire l'aderenza corretta del sistema FRCC al substrato e la conformità agli standard specificati;
- **Monitoraggio post-installazione:** è consigliabile eseguire un monitoraggio periodico del rinforzo per valutare la sua effettiva prestazione nel tempo e identificare eventuali segni di degrado o necessità di manutenzione.

³ I contrafforti sono elementi strutturali supplementari utilizzati per rinforzare e stabilizzare le pareti, distribuendo le forze laterali e contrastando le spinte esterne. Posizionati specialmente in strutture soggette a carichi orizzontali significativi, come quelle che supportano archi o volte.

2.5 Meccanismi di crisi

La ricerca sulle proprietà meccaniche dei sistemi FRCM non è esaustiva per quanto riguarda il comportamento di adesione, il quale ha un impatto significativo sull'efficacia del rinforzo. Gli studi sperimentali esistenti evidenziano una modalità di cedimento associata alla rottura a trazione delle fibre (all'interno o all'esterno della matrice) o al fenomeno di debonding⁴ tra il tessuto e la matrice, anziché tra la matrice e il substrato, come più tipicamente osservato nelle applicazioni di FRP. Questo fenomeno è ulteriormente complicato dal cosiddetto "comportamento telescopico", osservato tra i filamenti di un fascio di fibre, dove i filamenti interni hanno un diverso meccanismo di trasferimento delle sollecitazioni rispetto a quelli esterni, a causa della diversa impregnazione delle fibre nella matrice. Il debonding è inoltre influenzato da altri fattori, tra cui: la compatibilità chimica e meccanica dei materiali, l'invecchiamento degli stessi, l'esposizione a umidità, temperature estreme o sostanze chimiche.

In base alle prove riportate in letteratura, poiché il debonding si verifica all'interno del composito, le proprietà meccaniche del substrato sono meno rilevanti rispetto a quelle nelle applicazioni FRP. Per questo motivo i risultati sperimentali degli accoppiamenti FRCM-calcestruzzo sono simili ai risultati degli accoppiamenti FRCM-muratura.

2.6 Prova di Taglio Diretto

La prova di Taglio Diretto (o Direct Shear Test) è una metodologia di prova utile per valutare le proprietà di adesione e resistenza al taglio dei compositi fibrorinforzati (FRP e FRCM), offrendo indicazioni importanti per la progettazione e l'ottimizzazione di questi materiali.

La prova consiste nel sottoporre le fibre di rinforzo ad una forza di trazione in direzione parallela alle fibre. Questa può provocare lo scorrimento della fase fibra

⁴ Il termine "debonding" si riferisce ad un fenomeno interno di distacco e scorrimento l'uno sull'altro di due materiali che erano precedentemente aderenti tra loro. Nel caso in esame è provocato da una sollecitazione di trazione che causa tensioni che superano la capacità di adesione del composito. Può essere provocato anche da carichi termici, umidità, invecchiamento del materiale e difetti di adesione.

rispetto alla fase matrice lungo la superficie di contatto, permettendo di valutare la resistenza all'interfaccia tra le fibre e la matrice, nonché la coesione interna del composito stesso.

Durante la prova, il comportamento dipende dall'adesione dei filamenti esterni del filato con la matrice, mentre quelli interni scivolano come avvolti da una guaina, a causa dell'impregnazione non omogenea della fibra da parte della malta. Questo meccanismo di rottura, noto come "rottura telescopica", si caratterizza per lo sfilamento graduale dei filamenti seguito da una rottura a trazione dei filamenti esterni (Figura 1), garantendo una maggiore dissipazione di energia e duttilità nel rinforzo a matrice cementizia rispetto ai classici FRP. In quest'ultimi, infatti, non sussiste tale comportamento poiché le resine epossidiche riescono a penetrare efficacemente negli spazi tra i filamenti di fibre.

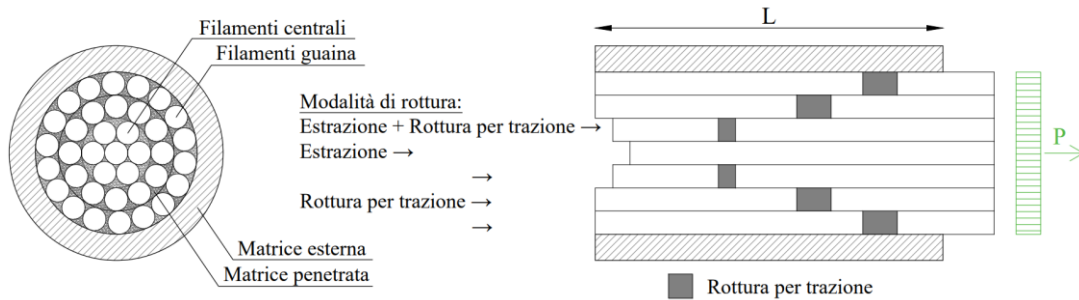


Figura 1: Meccanismi di crisi di un rinforzo annegato in una matrice cementizia

2.7 Studi

Prima di passare alla parte in cui verrà descritta la sperimentazione presentata in questo lavoro di tesi, si procede ad illustrare alcuni studi precedentemente svolti nel campo del comportamento dei materiali compositi FRCCM.

2.7.1 Matrix–fiber bond behavior in PBO FRCCM composites:

A fracture mechanics approach

(T. D’Antino, C. Carloni, L.H. Sneed, C. Pellegrino) [10]

La Figura 2a mostra una risposta idealizzata di carico-scorrimento. Nella primo tratto (OA) l’interfaccia tra fibre e matrice è in grado di fornire una risposta elastica lineare. Dopo il punto A si ha un tratto non lineare, dove la matrice inizia a subire un microdanneggiamento e il carico aumenta fino al punto B dove insorge il debonding (qui il carico è detto “carico di debonding P_{deb} ” o “capacità di carico dell’interfaccia matrice-fibra”). L’attrito tra i singoli filamenti delle fibre e tra fibre e matrice si verifica nella porzione di composito in cui le fibre hanno subito il debonding, di conseguenza si osserva un ulteriore aumento del carico applicato dal punto B al punto C. Se si assume che l’attrito dipenda solo dalle caratteristiche del materiale o dall’area di contatto tra le fibre delaminate e la matrice e che non diminuisca all’aumentare dello scorrimento, si può ipotizzare che il suo contributo determini un aumento lineare del carico con l’aumento della lunghezza di debonding. Una lunghezza efficace l_{eff} , se esiste, deve quindi essere determinata dalla distribuzione delle deformazioni lungo le fibre nel punto B della risposta di carico, dove l’attrito non è ancora presente (Figura 3).

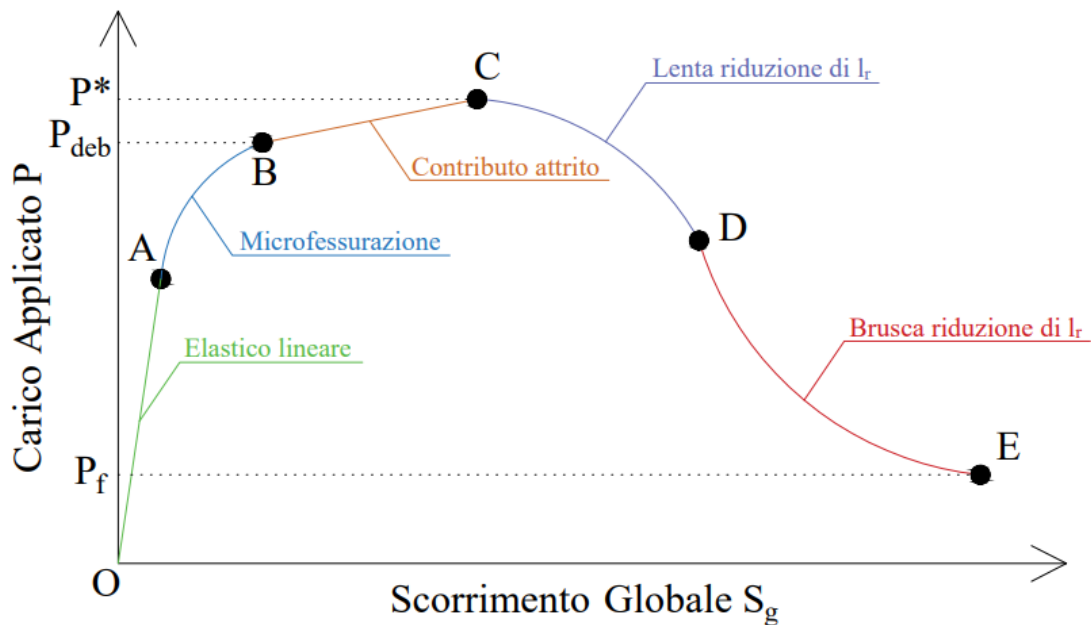
I diversi stadi del meccanismo di trasferimento delle sollecitazioni per i vari punti della risposta al carico della Figura 2a sono mostrati nella Figura 2b. La lunghezza residua di incollaggio l_r è definita come la lunghezza effettiva dell’area di incollaggio, cioè $l_r = l$ tra i punti O e B. Tra i punti B e C il carico applicato aumenta a causa dell’attrito finché il processo di debonding raggiunge la fine dell’area di incollaggio. Nel punto C, il carico applicato raggiunge il massimo carico P^* e la lunghezza di incollaggio residua è uguale alla lunghezza efficace ($l_r = l_{eff}$). Dopo il punto C il carico applicato inizia a diminuire perché il meccanismo di incollaggio

non è più completamente stabilito ($l_r < l_{eff}$). Dopo il punto D si ha un cambio di concavità della curva, il carico applicato diminuisce velocemente e la lunghezza residua di incollaggio l_r si riduce notevolmente. Nel punto E le fibre sono completamente delaminate dalla matrice ($l_r = 0$) e l'unico contributo residuo al carico è costante e pari a P_f e dato dall'attrito tra i singoli filamenti e tra fibra e matrice. La sollecitazione di taglio associata all'attrito può essere determinata in base al carico applicato al punto E come:

$$\tau_f = \frac{P_f}{2nb * l}$$

Dove $nb * l$ è l'area di legame nominale dei fasci di fibre longitudinali. Il 2 tiene conto che l'area di contatto è doppia perché le fibre scivolano rispetto ad entrambi gli strati di matrice. La formula non tiene conto dello spessore delle fibre perché molto più piccolo rispetto alla lunghezza.

a)



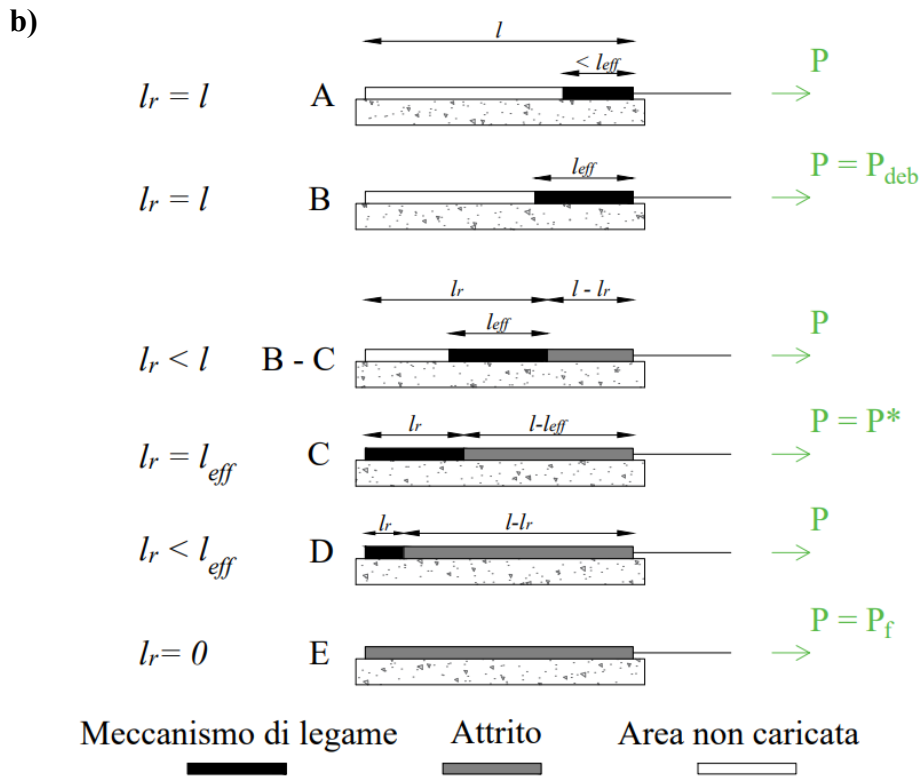


Figura 2: a) Risposta di carico-scorrimento ideale per un FRCM; b) Fasi del meccanismo di trasferimento delle sollecitazioni corrispondenti ai vari punti della risposta di carico-scorrimento ideale.

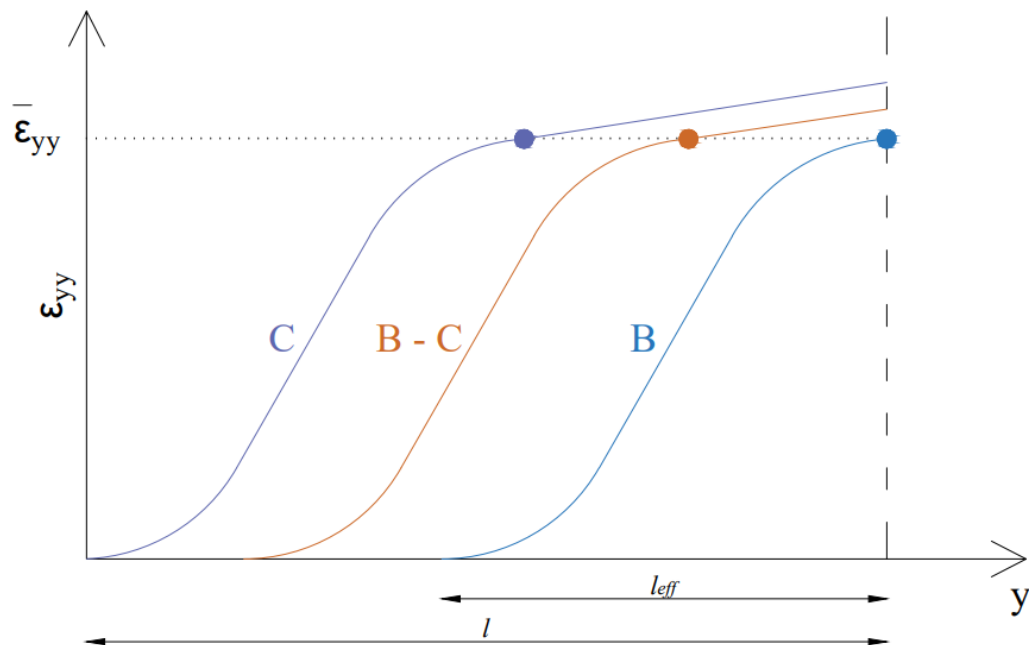


Figura 3: Profili di deformazione assiale idealizzati per i punti della Figura 2a.

2.7.2 Experimental and analytical investigation of bond behavior in glass fiber-reinforced composites based on gypsum and cement matrices (L. Rovero, Galassi S., Misseri G.) [7]

Il documento illustra le indagini sperimentali e analitiche sui sistemi compositi con matrice a base di gesso e cemento, entrambi accoppiati con rete in fibra di vetro. Sono state eseguite prove di taglio doppio (double shear lap test) tra mattoni e sistemi compositi su diverse lunghezze di legame. Il composito a base di gesso (Fiber Reinforced Gypsum Matrix - FRGM) ha mostrato carichi di picco più elevati e un comportamento più fragile rispetto alla risposta del sistema FRCM standard.

In letteratura è stato studiato l'effetto della lunghezza di legame nei sistemi FRCM, con l'obiettivo di evidenziare la sua influenza sulla risposta comportamentale del legame fibra-matrice e sulla modalità di rottura. Si definisce lunghezza effettiva di legame o zona di trasferimento delle sollecitazioni (Stress Transfer Zone – STZ) la lunghezza minima del rivestimento necessaria perché avvenga il completo trasferimento delle sollecitazioni dal substrato al composito. Dopo l'inizio del processo di debonding si ha un graduale aumento dello scorrimento globale all'interfaccia matrice-fibra, che si traduce in una semplice traslazione della STZ più avanti lungo la lunghezza di legame del composito, mentre la sua forma rimane costante.

Sono state considerate tre lunghezze di legame, rispettivamente 150, 200 e 250 mm e per ciascuna si sono realizzati 3 provini, eseguendo un totale di 9 prove per il composito con matrice a base di gesso e altrettante per il composito con matrice a base di cemento. Per tutti i campioni testati, sono stati poi tracciati diagrammi globali carico-scorrimento (Figura 4).

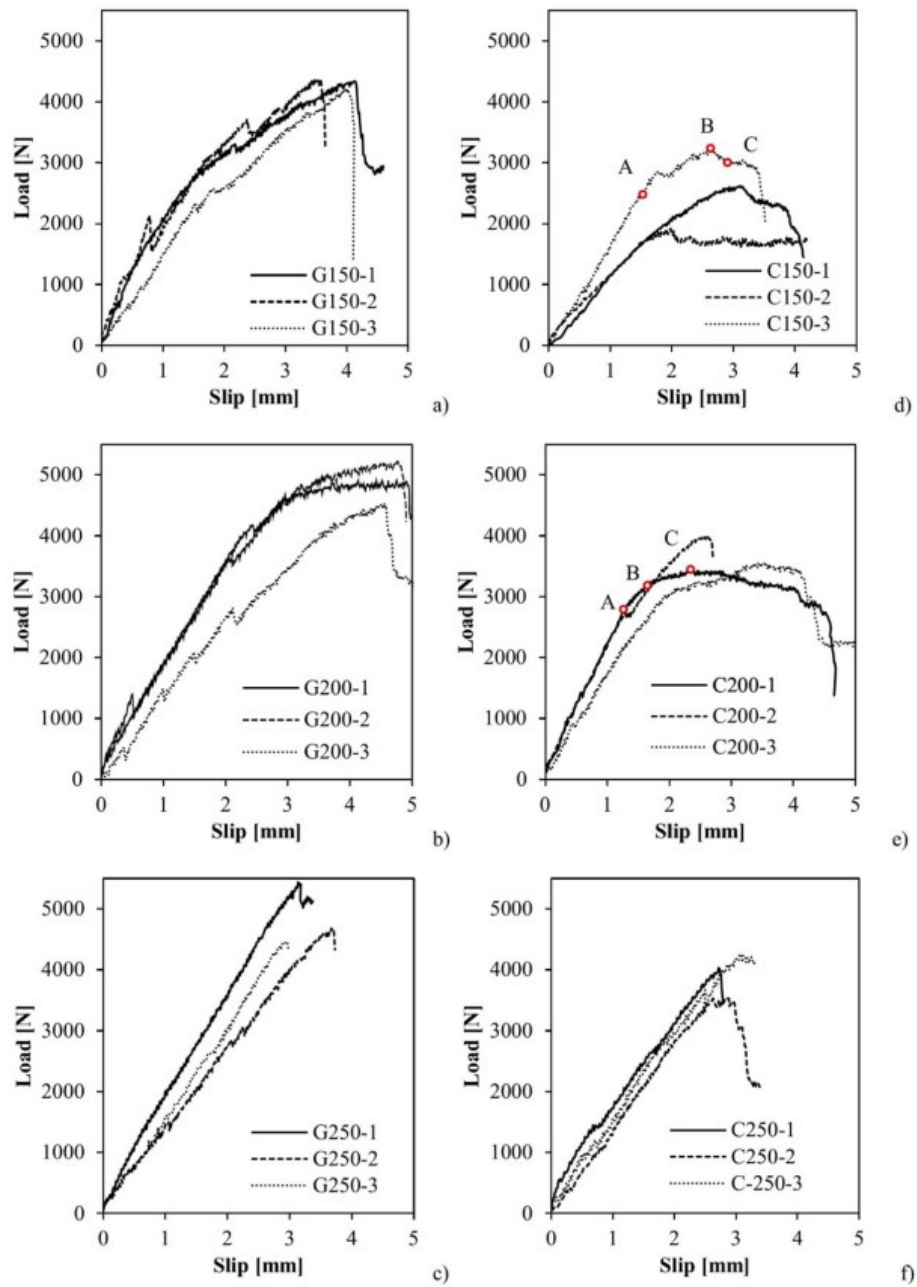


Figura 4: Diagrammi carico-scorrimento globale determinati dalla prova a taglio doppio per il composito a matrice gessosa con una lunghezza di legame di a) 150 mm, b) 200 mm e c) 250 mm e per il composito a matrice cementizia con una lunghezza di legame di d) 150 mm, e) 200 mm e f) 250 mm [7].

In particolare, il punto A corrisponde rispettivamente alla fine del ramo elastico lineare, dove la matrice si è visibilmente fessurata; il punto B, corrispondente al punto finale del ramo elastico non lineare, costituisce il carico di picco per la serie C150 e l'inizio del debonding per la serie C200; il punto C è per la serie C150 l'inizio della fase di attrito e per la serie C200 il punto corrispondente al carico

massimo. Per i campioni con lunghezza del legame pari a 250 mm è stata registrata una modalità di rottura tessile e non è stato possibile identificare i punti C.

Sistema composito a matrice gessosa

Per i campioni G150 e G200 la rottura è stata causata dallo scorrimento del tessuto all'interno della matrice, accompagnato dalla rottura di alcuni filamenti dopo aver raggiunto il carico massimo, provocando una rapida diminuzione del carico. Nel caso della serie G250 si è verificata una rottura a trazione della fibra e non è stato possibile osservare lo scorrimento della fibra.

Il valore massimo del carico raggiunto dalla serie G250 è in media del 7,2% superiore al carico di debonding, P_B , raggiunto dal campione G200 (Tabella 2). È plausibile pensare che i campioni G250 abbiano raggiunto al massimo il carico di debonding, poiché la sezione trasversale della rete non era sufficiente a sopportare ulteriori aumenti del carico. Non è pertanto stato possibile osservare l'evoluzione della fase di attrito. In effetti, il calcolo della tensione di trazione sulla sezione trasversale della fibra nuda ha mostrato, per il campione G250, valori superiori alla resistenza a trazione della fibra asciutta determinata mediante prova di trazione diretta.

Confrontando il carico connesso all'inizio della fase di attrito P_B (Tabella 2), si può affermare che la lunghezza effettiva di legame sia inferiore a 150 mm, infatti l'incremento di carico alla fine del ramo elastico non lineare (Punto B), aumentando la lunghezza di legame da 150 mm a 200 mm e poi a 250 mm, non è degno di nota (entro il 10%), si può quindi affermare che tutte le lunghezze di legame abbiano stabilito completamente la zona di trasferimento delle sollecitazioni (STZ).

Tabella 2: Punti caratteristici dei diagrammi carico-scorrimento globale registrati durante la prova per il sistema composito a matrice gessosa. Nelle righe intermedie, in grassetto, sono riportati i valori medi (A_v) e i corrispondenti coefficienti di variazione (Cov) [7].

Specimen code	P_A	P_B	P_C	δ_1	δ_2	δ_3
	[N]			[mm]		
G150-1	2720	4163	4327	1.517	3.649	4.13
G150-2	2631	4193	4389	1.395	3.274	3.47
G150-3	2542	4000	4222	1.827	3.701	4.00
AvG150	2631	4119	4313	1.580	3.541	3.87
CovG150	0.03	0.03	0.02	0.14	0.07	0.09
G200-1	2910	4688	4720	1.63	3.11	4.88
G200-2	2973	4782	4983	1.64	3.21	4.76
G200-3	2671	4079	4518	2.12	3.65	4.55
AvG200	2851	4516	4740	1.80	3.32	4.73
CovG200	0.06	0.08	0.05	0.16	0.09	0.03
^a G250-1	2951	5410	-	1.61	3.15	-
^a G250-2	3090	4662	-	2.03	3.71	-
^a G250-3	2627	4459	-	1.77	2.96	-
AvG250	2889	4844	-	1.80	3.27	-
CovG250	0.08	0.10	-	0.12	0.12	-

^a Specimens failed for tensile rupture of the fiber.

Sistema composito a matrice cementizia

Tutti i campioni della serie C250 sono ceduti per rottura a trazione della fibra. Per i campioni delle serie C150 e C200, la modalità di rottura registrata è lo scorrimento della fibra all'interno della matrice.

Il valore massimo del carico raggiunto dalla serie C250 è in media del 15% superiore al carico di debonding, P_B , raggiunto dal campione C200 (Tabella 3). Seguendo un ragionamento simile a quello sviluppato per il sistema composito a matrice gessosa, il carico massimo raggiunto per la serie C250 può essere considerato il palusibile carico di debonding.

Confrontando il carico P_B (Tabella 3), si può osservare che per la serie C200, il carico è superiore del 31,8%, rispetto alla serie C150. Tuttavia, Questo incremento per P_B non è altrettanto notevole quando si passa da 200 mm a 250 mm (15%). Questo conclude che la STZ non era stata stabilita completamente per il collegamento da 150 mm, ma si è stabilita per la lunghezza di collegamento di 200 e 250 mm.

Tabella 3: Punti caratteristici dei diagrammi carico-scorrimento globale registrati durante la prova per il sistema composito a matrice cementizia. Nelle righe intermedie, in grassetto, sono riportati i valori medi (A_v) e i corrispondenti coefficienti di variazione (Cov) [7].

Specimen code	P_A [N]	P_B	P_C	δ_1 [mm]	δ_2	δ_3
^b C150-1	1026	2619	2319	0.92	3.12	3.39
^b C150-2	1673	1917	1815	1.50	1.98	2.21
^b C150-3	2841	3243	2912	1.76	2.62	2.92
AvC150	1847	2593	2349	1.39	2.58	2.84
CovC150	0.50	0.26	0.23	0.31	0.22	0.21
C200-1	2716	3266	3456	1.17	1.75	2.34
C200-2	2698	3759	3920	1.30	2.26	2.68
C200-3	2307	3228	3570	1.39	2.47	3.55
AvC200	2574	3418	3649	1.27	2.16	2.86
CovC200	0.09	0.09	0.07	0.09	0.17	0.22
^a C250-1	2428	4038	-	1.45	2.73	-
^a C250-2	2633	4255	-	1.88	3.09	-
^a C250-3	2549	3544	-	1.62	2.87	-
AvC250	2537	3946	-	1.65	2.90	-
CovC250	0.04	0.09	-	0.13	0.06	-

^a Specimens failed for tensile rupture of the fiber.

^b short bond length specimens.

2.7.3 Debonding of composites on a curved masonry substrate: Experimental results and analytical formulation

(M. Malena, G. de Felice) [8]

Il seguente lavoro presenta i risultati di una campagna sperimentale di prove di debonding su substrati rettilinei e curvilinei costituiti da mattoni assemblati con malta e rinforzati con matrice cementizia rinforzata con fibre di carbonio (CarbonFRCM) o con malta rinforzata con acciaio (Steel Reinforced Grout - SRG) (Figura 5). I risultati rivelano l'effetto della curvatura del substrato sulla distribuzione delle deformazioni interfacciali e sulla risposta carico-scorrimento.

Sono state eseguite prove di trazione su entrambi i sistemi di rinforzo, al fine di determinare la risposta sforzo-deformazione, comprese la deformazione e la sollecitazione ultime e il modulo di elasticità a trazione prima e dopo la fessurazione della matrice. Complessivamente, sono stati testati per ciascun raggio considerato ($R = \infty$, $R = 5000$ mm, $R = 2650$ mm, $R = 1800$ mm) due campioni per ogni tipo di rinforzo.

Il sistema di misura consiste in estensimetri applicati lungo le due strisce di composito, che registrano la deformazione locale del rinforzo e due LVDT per ogni lato, che misurano lo spostamento tra parte superiore e inferiore.

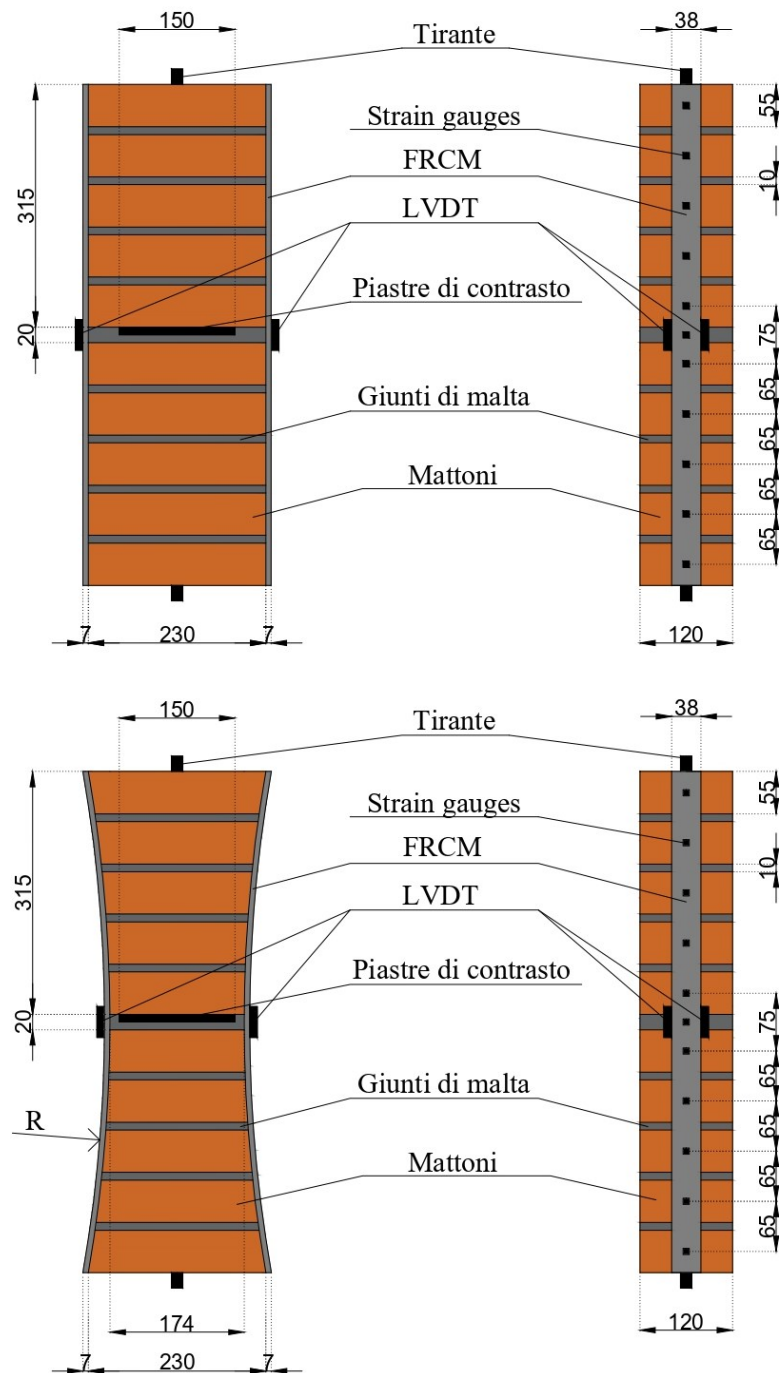


Figura 5: Configurazione sperimentale, substrato rettilineo e curvilineo.

I risultati sperimentali dimostrano che all'aumentare della curvatura si ha una diminuzione della resistenza e dello scorrimento finale, attribuibile alle sollecitazioni normali di trazione che si verificano all'interfaccia tra la striscia di composito e il substrato. La riduzione è più evidente nei sistemi SRG (con un raggio di curvatura di 5000 mm, si registra una diminuzione del 41%) rispetto ai sistemi CFRCM (con un raggio di curvatura di 5000 mm, si registra una diminuzione del 15%) (Figura 6).

Per entrambi i tipi di rinforzo, la rottura avviene per debonding all'interfaccia tra la matrice e il tessuto: la matrice si separa in due strati, uno dei quali rimane attaccato al substrato, mentre l'altro viene asportato insieme al tessuto. Il cedimento osservato dipende dalla minore resistenza della matrice di malta rispetto al substrato in muratura e dalla sezione resistente inferiore all'interfaccia tra la matrice e il tessuto. Infatti, poiché l'adesione è significativamente inferiore rispetto a quella dei materiali FRP, il trasferimento delle sollecitazioni avviene principalmente attraverso la coesione della malta e l'incastro del tessuto all'interno della matrice. Di conseguenza, all'aumentare della densità del tessuto, diminuisce la sezione resistente della malta.

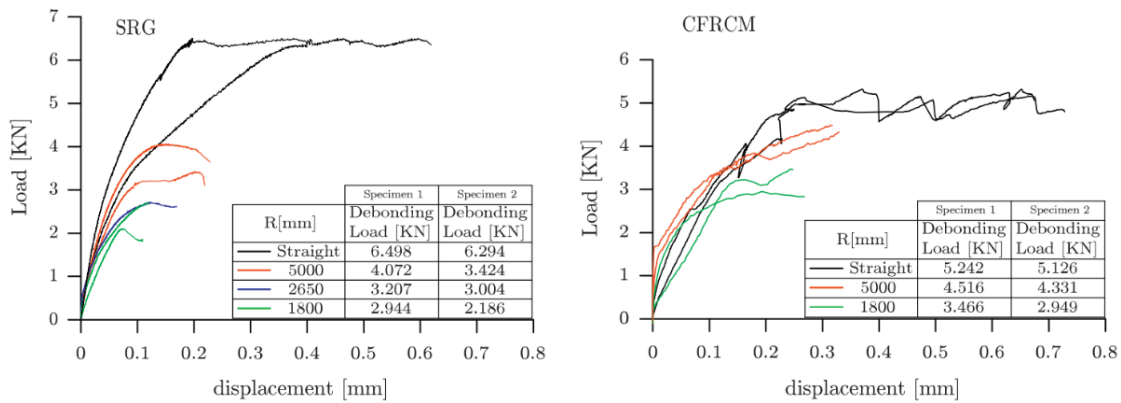


Figura 6: Curve sperimentali di carico-scorrimento [8].

Per tutti i campioni, il profilo di deformazione rimane quasi esponenziale fino al raggiungimento del carico massimo. Nel caso di substrato dritto, sembra che la lunghezza di trasferimento effettiva sia di circa 200 mm per entrambi i compositi, mentre la deformazione massima è in media $3 \cdot 10^{-3}$ per SRG e $4 \cdot 10^{-3}$ per CFRCM. Nel caso di SRG con substrato curvo ($R=5000$), le prove sperimentali mostrano una riduzione più significativa della deformazione al debonding, che si riduce a circa $2 \cdot 10^{-3}$. Nel caso di CFRCM con substrato curvo ($R=1800$), la lunghezza di trasferimento effettiva si riduce a circa 150 mm e la deformazione massima si riduce a valori intorno a $2,5 \cdot 10^{-3}$.

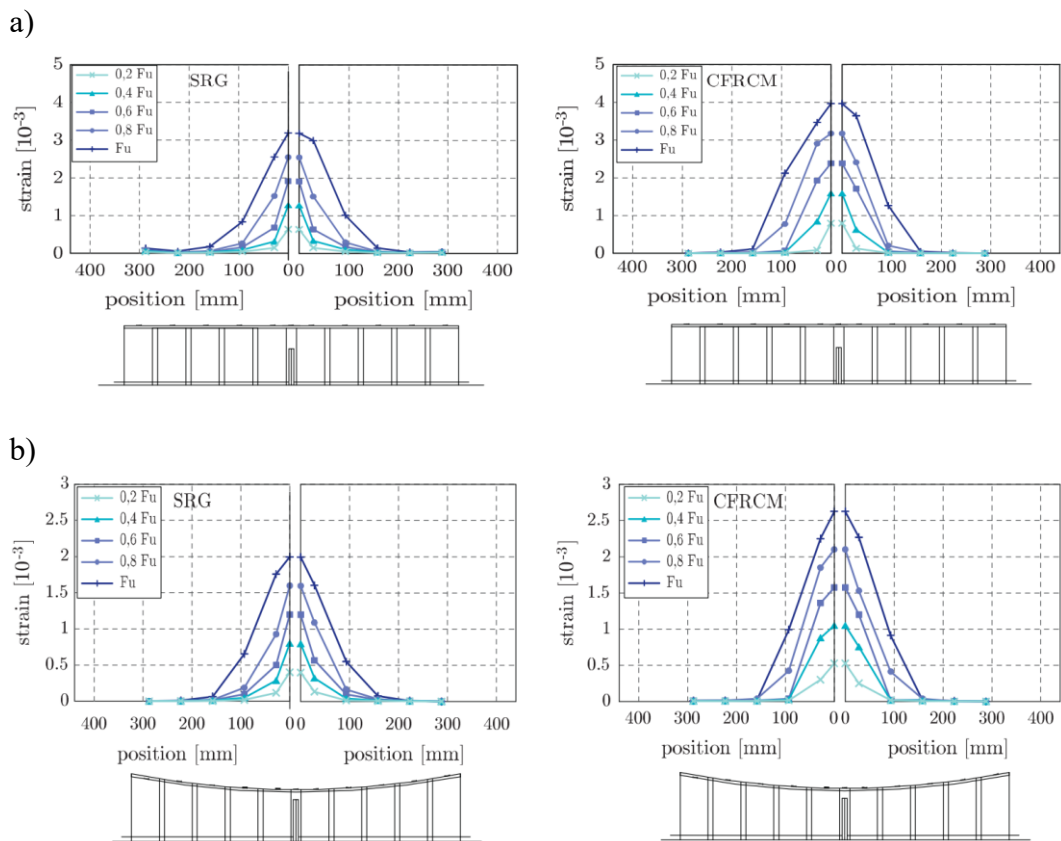


Figura 7: a) Profilo di deformazione per substrato rettilineo. b) Profilo di deformazione per substrato curvilineo ($R = 5000$ per SRG e $R = 1800$ per CFRCM) [8].

3. Sperimentazione

In questo lavoro di tesi verranno descritti i passaggi seguiti per eseguire le prove di taglio diretto (direct shear test) su campioni BFRLM (Basalt Fiber Reinforced Lime Matrix) precedentemente preparati. Ciascun campione è costituito da un rinforzo realizzato con una rete in fibra di basalto apprettata con resina, accoppiato con una matrice inorganica a base di calce e applicato su substrati in muratura rettilinei e curvilinei. In seguito, saranno esposti i risultati ottenuti e l'elaborazione dei dati, al fine di trarre delle conclusioni sul comportamento di adesione tra FRLM e muratura e sull'aumento di capacità portante di una generica sezione in muratura rinforzata. Tutte le prove sono state condotte nel "Laboratorio Sperimentale per le Prove sui Materiali da Costruzione" del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale della Scuola di Ingegneria di Padova.

3.1. Caratterizzazione meccanica dei materiali utilizzati

Prima di passare alle prove di taglio diretto, si è proceduto con l'effettuare una serie di prove preliminari atte a definire le caratteristiche meccaniche dei singoli materiali utilizzati.

Malta di Calce

La malta utilizzata per la sperimentazione è una malta premiscelata da muratura (tipo M 15) strutturale, ad alta resistenza, in calce idraulica naturale NHL 5,0, particolarmente indicata nei cicli di rinforzo FRP-FRCM SYSTEM e con buona compatibilità con le murature antiche, per questo di interessante studio.

La normativa di riferimento è la UNI EN 1015-11 "Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita" [12].

In una prima fase sono stati realizzati sei campioni di forma prismatica di dimensioni 160x40x40 mm, come da prescrizioni normative. Dopo 28 giorni di maturazione, si è passati all'esecuzione della prova: i campioni sono stati posizionati uno alla volta sulla macchina di test a flessione, costituita da due rulli di sostegno inferiori (distanti 100 mm) su cui viene appoggiato il campione e da un

terzo rullo centrale che imprime il carico progressivamente crescente a velocità costante (Figura 8a). La normativa impone di utilizzare una velocità di carico compresa tra i 10 N/s e i 50 N/s in modo che il cedimento avvenga entro un periodo tra i 30 s e i 90 s. In questa sperimentazione è stata usata una velocità di 25 N/s. Tale configurazione fa in modo che nel centro del campione venga applicato un momento flettente crescente fino al raggiungimento del valore di rottura. È cruciale posizionare accuratamente il campione in modo che solo le facce lisce gettate contro l'acciaio del cassero entrino in contatto con i tre rulli di acciaio, in modo da avere una ripartizione del carico applicato il più uniforme possibile.

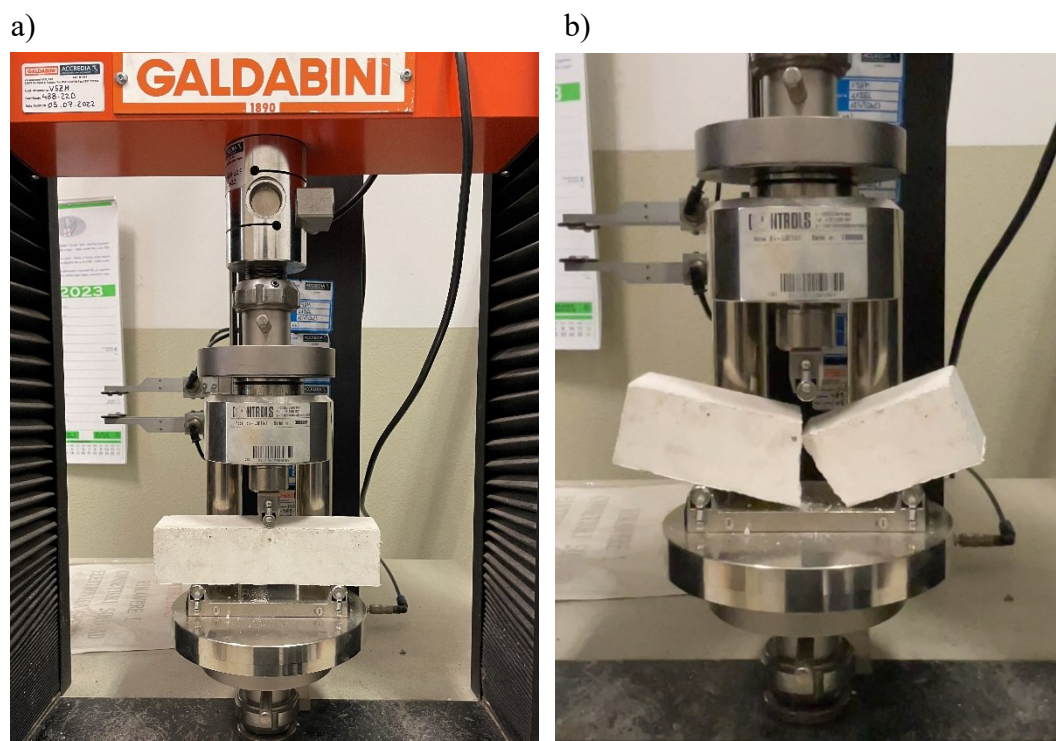


Figura 8: a) Set-up macchina di test a flessione. b) Spezzoni di provino ottenuti dalla rottura a flessione al termine della prova.

Avvenuta la rottura per flessione, si sono ottenuti 12 spezzoni di provini sui quali sarà rispettivamente condotta la prova di compressione (Figura 8b). Ciascun spezzone è stato posizionato sulla piattaforma inferiore della macchina di test a compressione, avendo cura di centrarlo lateralmente e longitudinalmente rispetto i piani della macchina. Anche in questo caso, è importante che le facce a contatto con i piani di compressione inferiore e superiore siano le facce lisce gettate contro l'acciaio del cassero. Dopo il posizionamento si è proceduto con l'inizio della

prova, aumentando il carico uniformemente fino a rottura. Per malte di categoria M15 la normativa impone una velocità di carico di 400 N/s (Figura 9).



Figura 9: Set-up macchina di test a compressione

Durante le prove, sul display è possibile monitorare il grafico tempo/forza applicata (s/N). Il picco più alto registrato sul grafico corrisponde al carico massimo in N che il campione è stato in grado di sopportare. Per calcolare la tensione di resistenza a flessione, è stata utilizzata la formula di Navier, trattando il provino come una trave a sezione quadrata. Per determinare invece la tensione di resistenza a compressione, il carico massimo è stato semplicemente diviso per l'area della sezione trasversale. Il risultato delle prove è stato valutato calcolando la media aritmetica dei singoli risultati. I risultati ottenuti dalle due prove sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 4: Risultati delle prove a flessione e compressione della malta di calce.

Numero Campione	Tensione a Flessione [MPa]	Tensione a Compressione [MPa]	
1	5,70	21,70	21,40
2	5,75	21,70	19,27
3	5,66	18,95	18,31
4	5,17	17,60	19,72
5	5,93	20,88	20,36
6	5,23	19,42	18,08
Media Sperimentale	5,57	19,78	
Valore dichiarato dal produttore	> 4	> 15	
Deviazione Standard	0,28	1,37	

Fibra di Basalto

La rete di rinforzo utilizzata per la sperimentazione è in fibra di basalto tipo B-NET 450BA, che presenta uno speciale trattamento superficiale (appretto), ovvero una pre-impregnazione chimica industriale a base di resina che ne migliora la compatibilità, l'applicazione e l'adesione al supporto ed evita il verificarsi del comportamento telescopico tra le fibre di un fascio, il quale complica ulteriormente il processo di debonding.

Essa è formata da fasci di fibre bidirezionali di larghezza 3,5 mm, distanziati di 25 mm, con uno spessore equivalente della singola fibra pari a 0,075 mm. Il tessuto ha un peso di 0,45 kg/m² e una densità di 3100 kg/m³, presenta una disposizione intrecciata e un fissaggio incollato nei punti di intersezione tra i fasci di fibre di trama e ordito (Figura 10).

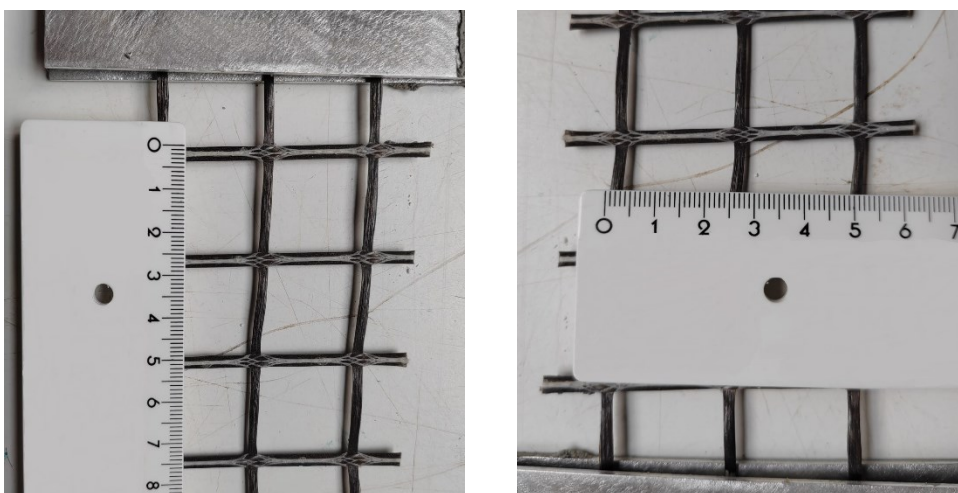


Figura 10: Rete in fibra di basalto tipo B-NET 450BA

Per quanto riguarda le proprietà meccaniche si fa riferimento alla scheda tecnica.

Tabella 5: Dati tecnici della fibra di basalto forniti dal produttore.

Dati Tecnici	
Resistenza a trazione filamento	> 3200 MPa
Modulo elastico a trazione filamento	> 90 GPa
Allungamento a trazione filamento	> 3 %
Resistenza a trazione rete per direzione	> 1980 MPa
Modulo elastico rete	> 74 GPa
Deformazione a rottura della rete	> 2,3 %
Carico a trazione per unità di larghezza	> 145 KN/m

Si è scelto di attuare la sperimentazione su una rete in fibra di basalto poiché sostenibile, deriva infatti da una risorsa naturale rinnovabile (magma vulcanico) e produce meno emissioni di CO₂ durante la produzione rispetto ad altre fibre sintetiche. È inoltre riciclabile, resistente e duratura, offrendo una buona alternativa ai materiali tradizionali di rinforzo. La sua compatibilità ambientale la rendono adatta a una varietà di applicazioni, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale delle costruzioni e delle infrastrutture.

Nell'analisi della rete, è stato notato che le fibre avevano un andamento ondulatorio (figura 10) e non sempre seguivano una disposizione regolare delle maglie (Figura 11). Queste variazioni potrebbero influenzare le proprietà meccaniche della rete. Nella Figura 11 si nota un diverso interasse tra il filo centrale e il filo destro e tra il filo centrale e il filo sinistro. Se i fili avessero tutti la stessa lunghezza, questo non influenzerebbe i risultati. Tuttavia, se un filo è ondulato, effettivamente risulta più lungo degli altri. Di conseguenza, quando la macchina tira, si crea una rotazione che porta ad avere un filo più teso rispetto agli altri.

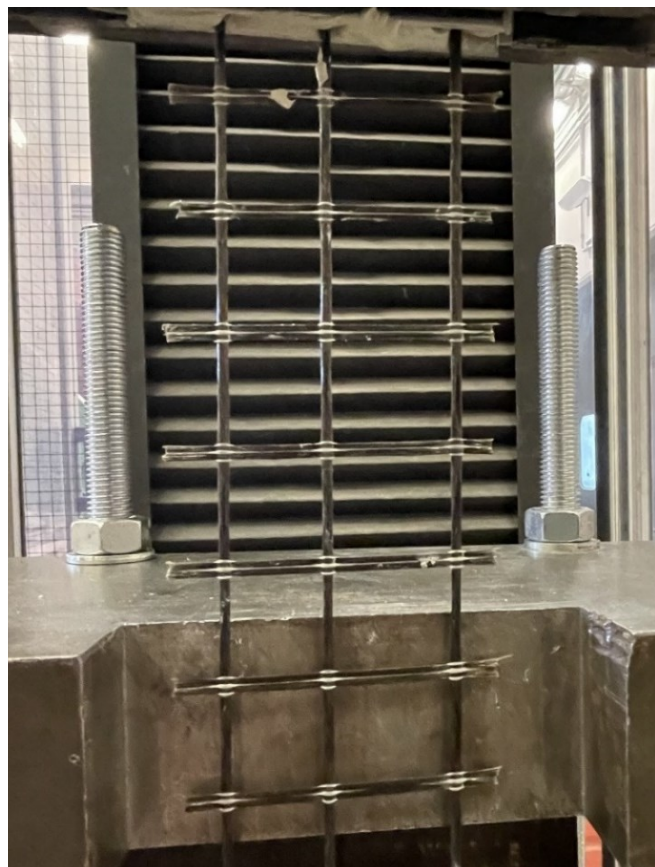


Figura 11: Irregolarità delle maglie della rete.

3.2. Preparazione dei provini

Per la sperimentazione eseguita in questo lavoro di tesi sono stati riutilizzati dei prismi in muratura realizzati per una sperimentazione precedente. Abbiamo a disposizione un totale di 14 campioni di muratura caratterizzati tra tre diversi valori del raggio interno, R ($R_\infty = \infty$ mm; $R_2 = 1508$ mm; $R_3 = 800$ mm). Nello specifico, il prisma in muratura è composto da sei mattoni pieni in laterizio (55x120x250 mm), sovrapposti e incollati con giunti di malta aventi uno spessore minimo di 10 mm (misurato nel raggio interno per i campioni curvilinei) e uno spessore massimo dipendente dal raggio di curvatura considerato.

Il rinforzo composito è stato applicato solamente all'intradosso dei prismi in muratura ed è stato realizzato seguendo tale procedura: per prima cosa, è stata saturata la superficie con acqua e si è steso in aderenza al prisma uno strato di matrice in malta di calce dello spessore di 5 mm; successivamente, una striscia di tessuto di basalto, composta da 3 fasci di fibre longitudinali, è stata applicata sul primo strato di matrice, assicurandosi che le fibre longitudinali fossero parallele alla lunghezza della faccia del prisma; infine, un secondo strato di matrice è stato applicato sul tessuto, raggiungendo uno spessore totale di circa 10 mm. Nel posizionamento della fibra, si è fatto attenzione che la fibra sporgesse anche dalla parte opposta a quella nella quale veniva ancorata alla macchina, per circa 15 mm. Lo scopo di tale operazione era quello di poter verificare, durante la prova a taglio diretto, quali fasci della rete scorrevano all'interno della matrice e quali si sarebbero eventualmente spezzati. L'area incollata misura 280 mm di lunghezza e 80 mm di larghezza. La lunghezza dei fasci di fibre non immersi nella matrice è variabile da campione a campione, in media è di 200 mm.

In questo lavoro, i campioni hanno la notazione (R_∞ o R_2 o R_3)_N_L_H (dove N = numero del provino; L = lunghezza area incollata; H = larghezza area incollata).

3.3. Configurazione di prova

Le prove di taglio diretto sui provini di composito BFRLM sono state eseguite controllando lo spostamento. In particolare, la fibra che fuoriesce dal provino è stata sottoposta a trazione mentre il provino di muratura è stato bloccato in posizione. La macchina utilizzata per questo test è una macchina di prova universale Galdabini Sun 60 con una capacità di carico nominale di 600 kN e una corsa massima della traversa di 1270 mm.

Nella configurazione di prova, il prisma in muratura è stato vincolato in posizione verticale mediante un telaio in acciaio (per evitare la rotazione e la distorsione del provino). L'estremità libera del tessuto è stata incollata tra due piastre in alluminio con resina epossidica. Queste poi sono state inserite all'interno di due piastre in acciaio (collegate alla macchina) compresse e imbullonate con otto viti, interponendo tra le due superfici dei fogli in gomma, per evitare lo scivolamento. Particolare attenzione è stata posta all'atto del posizionamento del provino, in quanto la direzione di trazione della macchina doveva essere perfettamente in asse con le fibre e con il composito BFRLM (Figure 12, 13).

Le prove di taglio diretto sono state condotte ad una velocità di 0,15 mm/min e lo scorrimento del tessuto all'interno della matrice è stato misurato utilizzando due LVDT⁵ (linear variable displacement transducer) fissati alla superficie della muratura vicino ai bordi dell'area incollata. Gli LVDT hanno reagito ad un supporto di alluminio fissato ad un fascio di fibre trasversali vicino all'area incollata.

⁵ Un LVDT è un dispositivo di misurazione che converte la posizione lineare di un oggetto in un segnale elettrico proporzionale. La sua funzione principale è quella di misurare con precisione e accuratezza la posizione di un oggetto lungo un percorso lineare.

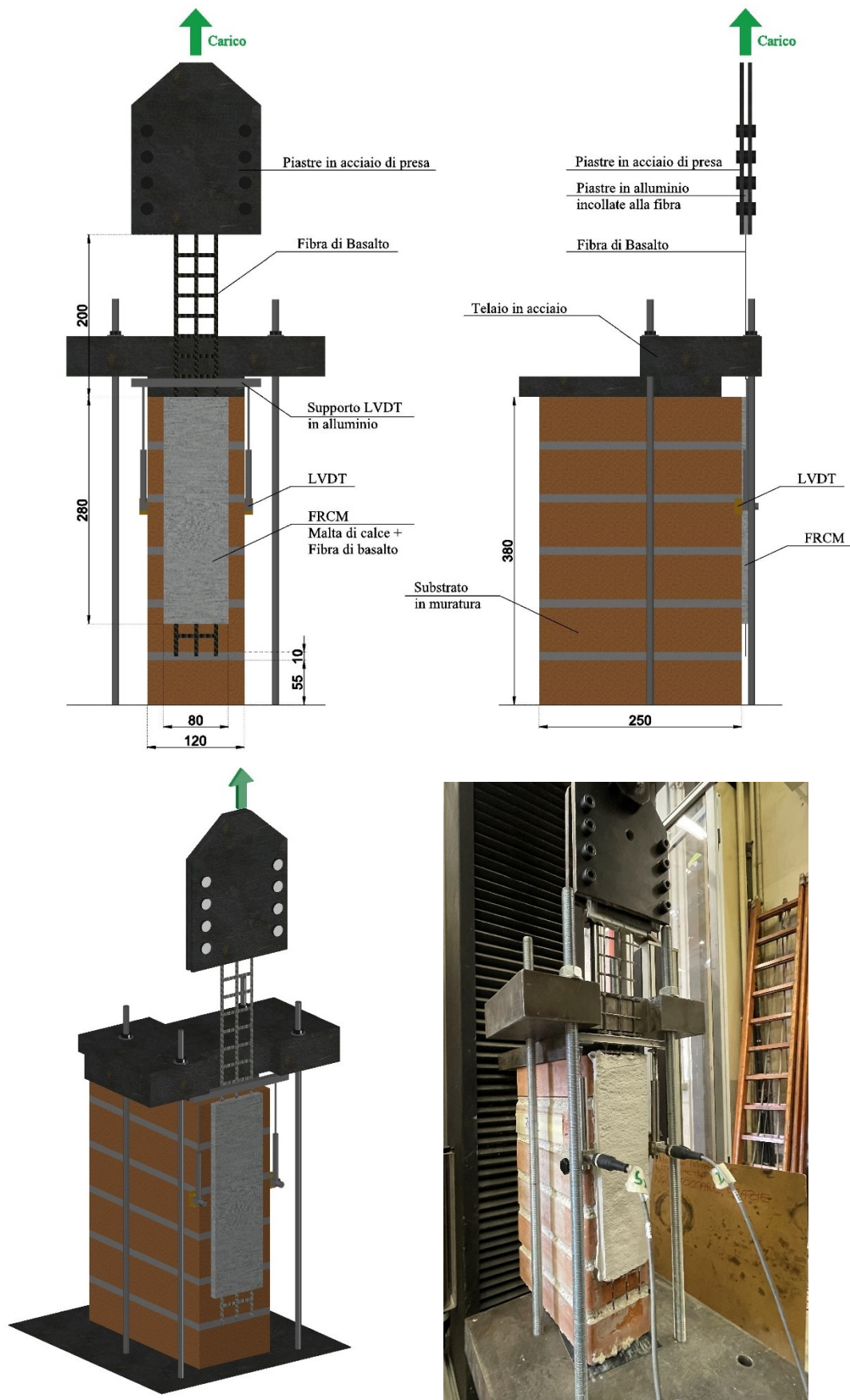


Figura 12: Set-up prova di taglio diretto per un generico campione a substrato rettilineo.

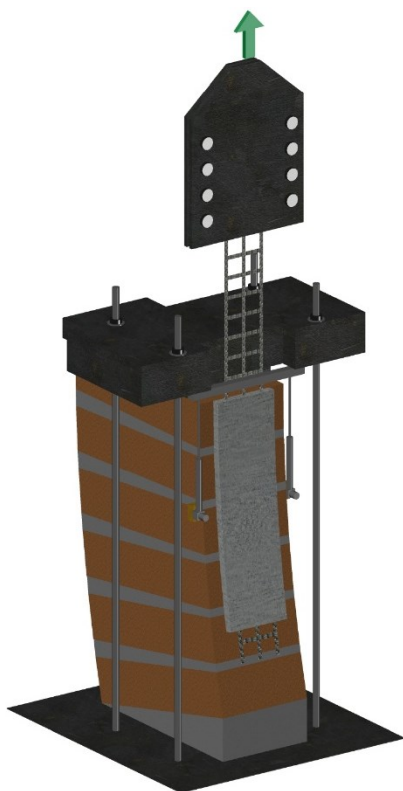
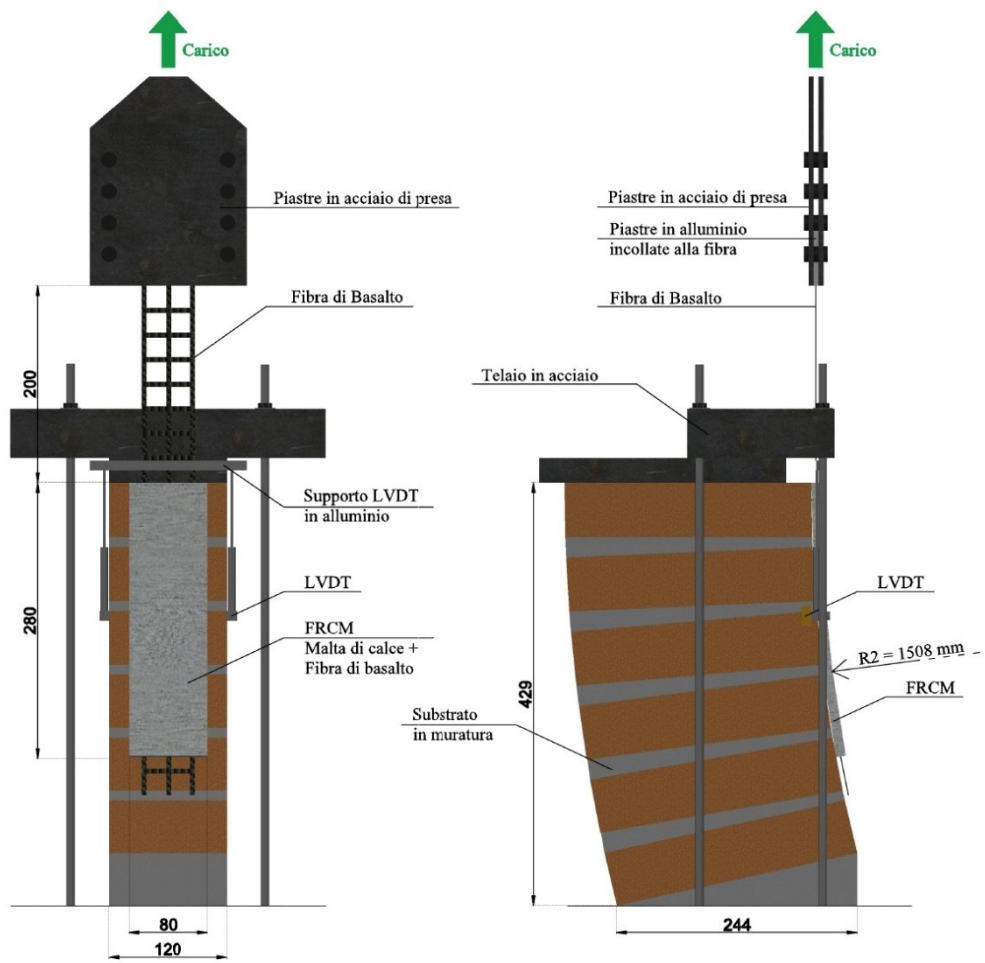


Figura 13: Set-up prova di taglio diretto per un generico campione a substrato curvilineo.

4. Risultati e Discussione

In questo paragrafo vengono presentati i risultati ottenuti dalle prove di taglio diretto condotte su campioni in muratura rettilinei e curvilinei. Per ciascun gruppo di prove, viene fornita un'analisi mediante tabelle e grafici. In particolare, per ogni campione è stata tracciata una curva che mostra la sollecitazione assiale σ_y in funzione dello scivolamento globale. Quest'ultimo è stato calcolato come la media aritmetica degli spostamenti registrati dai sensori LVDT destro e sinistro, mentre la sollecitazione σ_y è stata determinata dai risultati delle prove come segue:

$$\sigma_y = \frac{P \cdot r}{(t_{eq} \cdot h)/n}$$

Dove: P = carico applicato [N]; r = coefficiente di ripartizione trasversale; t_{eq} = spessore equivalente della fibra [mm], calcolato come il rapporto tra il peso ($0,45 \text{ kg/m}^2$) e la densità (3100 kg/m^3) del tessuto; h = larghezza area incollata [mm] e n = numero di fasci di fibre.

L'utilizzo del coefficiente di ripartizione trasversale ha consentito di determinare la percentuale di carico che viene distribuita su ciascuno dei tre fasci di fibre che costituiscono il rinforzo dei campioni testati, in relazione all'intera area trasversale del tessuto. L'applicazione di tale coefficiente sta alla base del metodo di Courbon, previsto come metodo di ripartizione dei carichi per la progettazione degli impalcati da ponte. Esso permette di trovare la condizione più gravosa per una trave in base alla configurazione di carico.

Lo stesso approccio è stato esteso alla rete di basalto dove i tre fasci di fibre rappresentano le “travi dell'impalcato” (Figura 14). Durante la prova, la pressa esercita una trazione centrale, che per la geometria talvolta ondulata della fibra, si ripartisce caricando più un filo rispetto ad un altro. Nello specifico, si è risaliti al filo più sollecitato sia in base alla rottura del filo che dall'analisi dei dati degli LVDT. A questo filo si considera applicato il carico P e si procede andando a calcolare il coefficiente di ripartizione trasversale con la formula seguente:

$$r_i = \left(\frac{1}{n} + e \frac{d_i}{\sum d_i^2} \right)$$

Dove: e = eccentricità del carico, pari alla larghezza delle maglie della rete (25 mm)
e d_i = interasse dei fasci di fibre (sempre 25 mm).

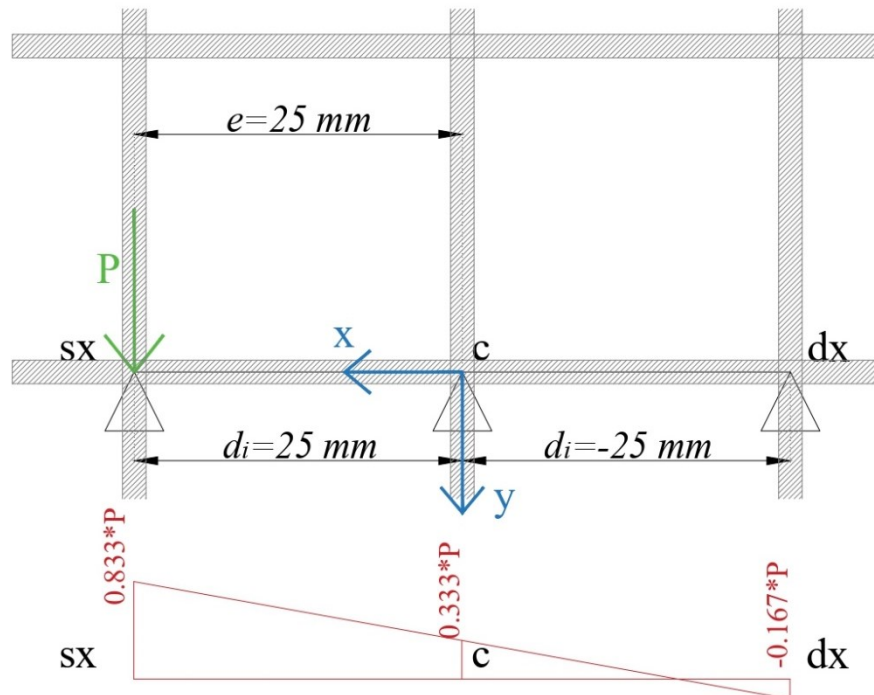


Figura 14: Metodo di ripartizione dei carichi di Courbon applicato alla rete in fibra di basalto.

Le curve e i risultati numerici che saranno forniti di seguito si riferiscono al fascio di fibre maggiormente sollecitato. Nei grafici, inoltre, sono state escluse le curve che presentavano un valore di tensione massima eccessivamente diverso, probabilmente dovuto a un allineamento non ottimale delle fibre, e/o che mostravano una pendenza anomala. Queste curve sono state rappresentate in semitrasparenza.

Serie di campioni con $R = \infty$

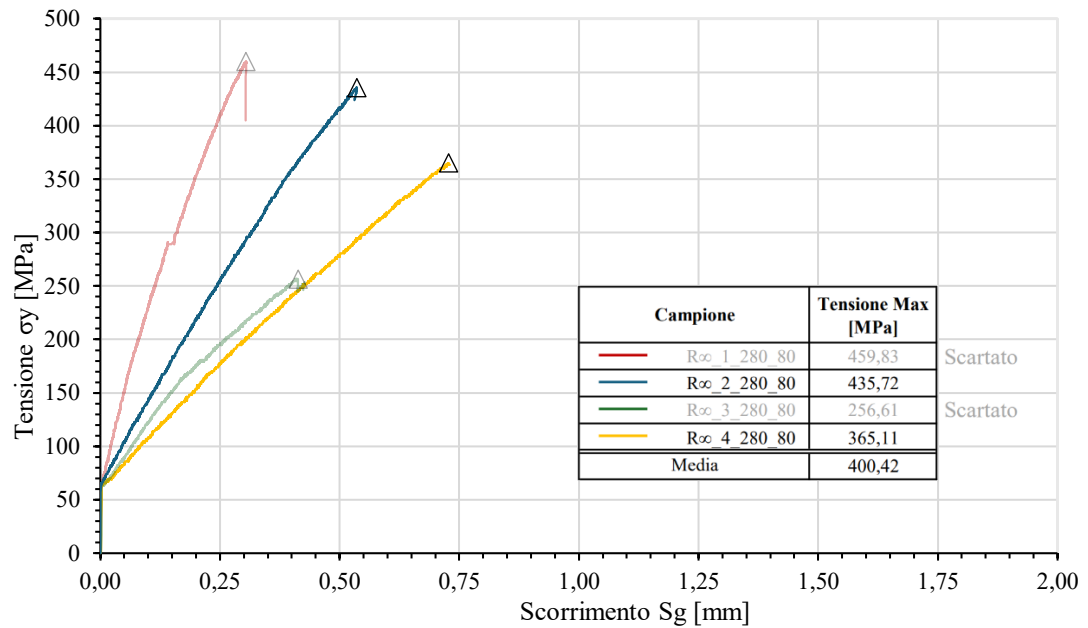


Figura 15: Curve di sollecitazione assiale della fibra in funzione dello scorrimento globale per campioni aventi substrato con $R = \infty$.



Figura 16: Esempio di modalità di rottura a trazione della fibra per il campione R ∞ _2_280_80.

In questa serie, per il campione R ∞ _3_280_80 si scarta il valore finale di tensione massima per una prematura rottura della fibra, ma la rigidità rimane valida. Il campione R ∞ _1_280_80 viene invece scartato perché mostra un valore di rigidità che si discosta dalle altre prove.

Serie di campioni con $R2 = 1508 \text{ mm}$

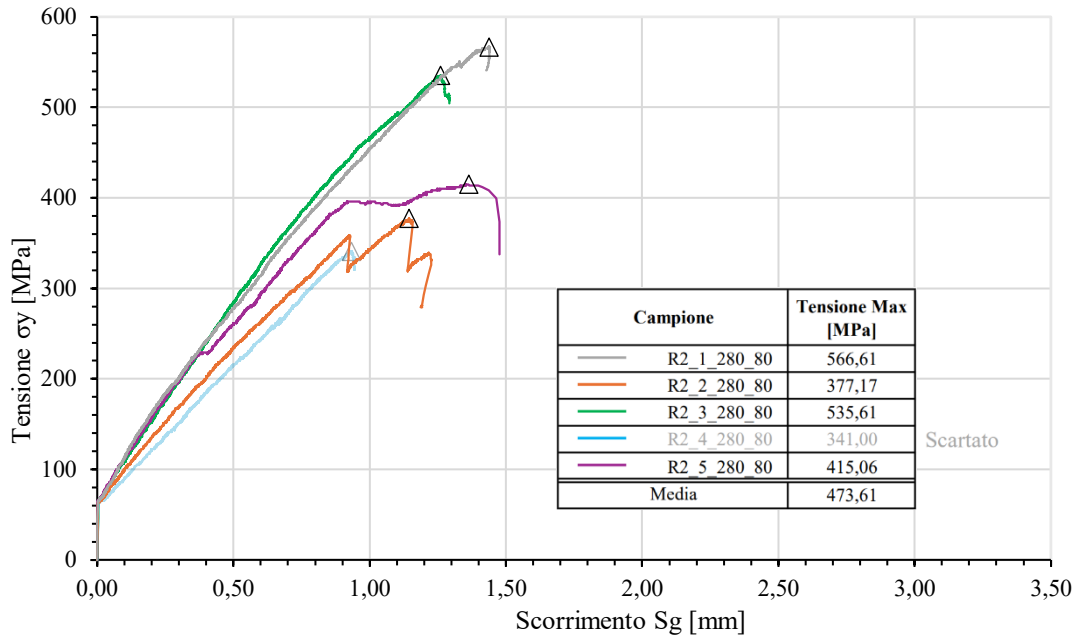


Figura 17: Curve di sollecitazione assiale della fibra in funzione dello scorrimento globale per campioni aventi substrato con $R2 = 1508 \text{ mm}$.

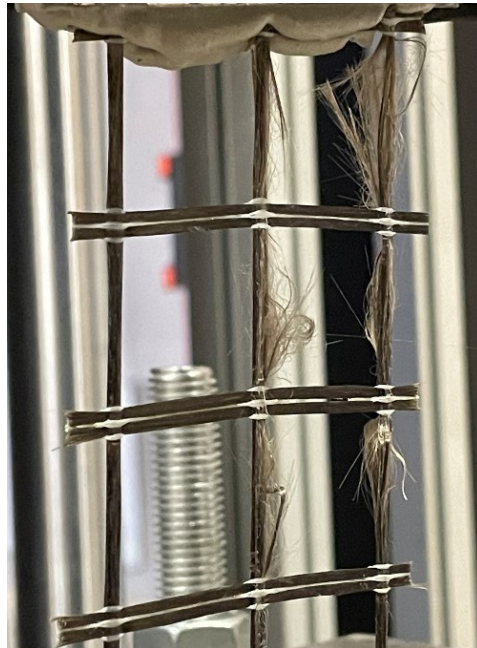


Figura 18: Esempio di modalità di rottura a trazione della fibra per il campione R2_3_280_80.

In questa serie, il campione R2_4_280_80 viene scartato per una prematura rottura della fibra, ma ha comunque mostrato un valore di rigidità in linea con le altre prove.

Serie di campioni con R3 = 800 mm

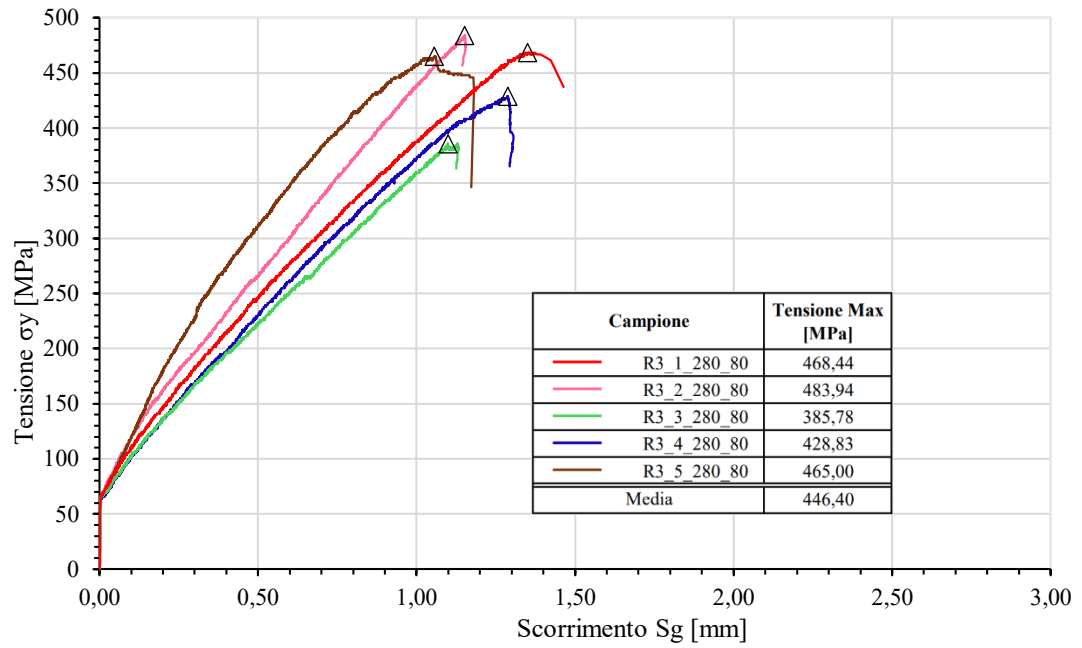


Figura 19: Curve di sollecitazione assiale della fibra in funzione dello scorrimento globale per campioni aventi substrato con R3 = 800 mm.

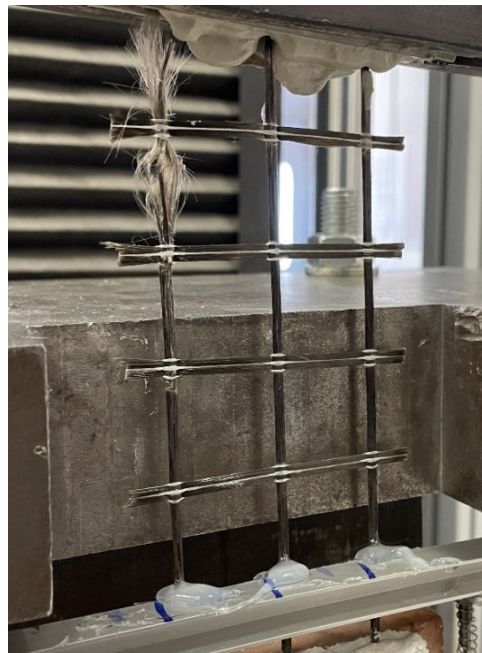


Figura 20: Esempio di modalità di rottura a trazione della fibra per il campione R3_2_280_80.

Grafico conclusivo di confronto

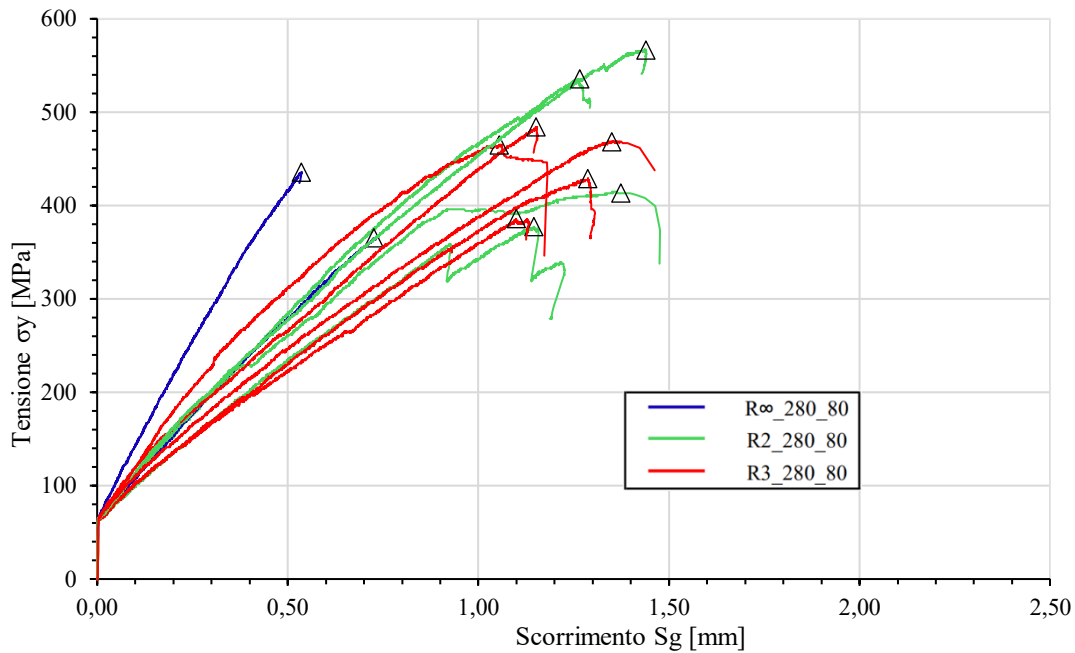


Figura 21: Grafico di confronto delle curve ottenute dalle tre serie di campioni, che mostra la variabilità dei risultati in relazione ai raggi di curvatura. N.B: Non sono riportate le curve precedentemente scartate.

Durante le prove e dall'analisi delle curve $\sigma_y - S_g$ (Figure 15, 17 ,19), è emerso che in tutti i campioni si è verificata la rottura a trazione del tessuto nella parte non immersa nella matrice (Figure 16, 18, 20). Non sono state osservate fessurazioni nella malta, né sulla parte frontale né lungo i bordi, di conseguenza non si è verificato il fenomeno del debonding all'interfaccia tessuto-matrice. Questo è attribuibile all'impiego di fibre pre-impregnate, le quali assicurano una migliore adesione tra fibra e matrice rispetto alle fibre asciutte; e all'impiego di una malta di calce ad aderenza migliorata. Tali fattori contribuiscono a spiegare perché il raggio di curvatura non ha avuto un impatto significativo sulla tensione ultima. Lo spostamento misurato è quindi causato dal solo allungamento della fibra. L'assenza di debonding consente di sfruttare appieno le proprietà della fibra, consentendo di raggiungere carichi più elevati. Inoltre, non sono state riscontrate modalità di rottura insolite associate al raggio di curvatura per la lunghezza di aderenza utilizzata (Figura 21). Di conseguenza, si può concludere che la lunghezza di aderenza di 280 mm è sufficiente per stabilire la lunghezza effettiva di trasferimento del carico.

Dall'analisi dei risultati ottenuti, emerge una notevole variabilità tra i campioni all'interno di una stessa serie. È plausibile attribuire questa variabilità a difficoltà e imperfezioni riscontrate durante la realizzazione dei campioni stessi. In aggiunta, si sono verificati problemi nel tessuto di rinforzo in basalto, con maglie irregolari (Figura 11) e fasci di fibre ondulati (Figura 10). Durante la fase di trazione, le curvature dei fasci tendono a raddrizzarsi, potenzialmente provocando la rottura della resina e danneggiando i fili di basalto, con conseguente significativa riduzione della tensione finale applicabile.

Per mitigare l'impatto delle curvature dei fasci sulla tensione ultima, durante la costruzione, si è deciso di posizionare la parte più ondulata della rete all'interno della matrice. Ciò ha contribuito a migliorare l'aderenza, mantenendo la rottura della fibra anziché consentirne lo scorrimento all'interno della matrice.

4.1. Lavori futuri

La variabilità dei risultati ottenuti in questo lavoro di tesi si è ritenuta principalmente imputabile all'irregolarità della fibra. È quindi auspicabile un proseguimento della sperimentazione, avendo cura di costruire un maggior numero di provini e di utilizzare una rete che si mostri regolare in tutte le direzioni.

Bibliografia

- [1] A. Turk - *Seismic response analysis of masonry minaret and possible strengthening by fiber reinforced cementitious matrix (FRCM) materials*. - Advances in Materials Science and Engineering, 2013.
- [2] ASM international - *ASM materials engineering dictionary* - 1992.
- [3] D. A. Bournas, P. V. Lontou, C. G. Papanicolaou, T. C. Triantafillou - *Textile-reinforced mortar versus fiber-reinforced polymer confinement in reinforced concrete columns* - 2007.
- [4] F.S. Murgo - *Analisi numeriche del comportamento meccanico del rinforzo di murature con FRCM: dall'aderenza al problema strutturale*. - Dottorato di ricerca Università di Bologna, 2018.
- [5] G. Misseri, L. Rovero, S. Galassi - *Analytical modelling bond behaviour of polybenzoxazole (PBO) and glass Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems coupled with cement and gypsum matrixes: Effect of the Cohesive Material Law (CML) shape* - Department of Architecture, University of Florence, Italy, 2021.
- [6] J. Gonzalez-Libreros, L. Sneed, T. D'Antino, C. Pellegrino - *Behavior of RC beams strengthened in shear with FRP and FRCM composites* - 2017.
- [7] L. Rovero, S. Galassi, G. Misseri - *Experimental and analytical investigation of bond behavior in glass fiber-reinforced composites based on gypsum and cement matrices*. - Department of Architecture, University of Florence, Italy, 2020.
- [8] M. Malena, G. de Felice - *Debonding of composites on a curved masonry substrate: Experimental results and analytical formulation* - Department of Engineering, University of Roma, Italy 2014.
- [9] M. Y. Alabdulhady, L. H. Sneed, C. Carloni - *Torsional behavior of RC beams strengthened with PBO-FRCM composite ; An experimental study* - 2017.
- [10] T. D'Antino, C. Carloni, L.H. Sneed, C. Pellegrino - *Matrix-fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach*. - Engineering fracture mechanics, Missouri University of Science and Technology, 2014.

- [11] T. D'Antino, C. Poggi - *Characterization and design of multilayer PBO FRCM composite reinforcements for concrete structures* - 2021.
- [12] UNI EN 1015-11 - *Metodi di prova per malte per opere murarie, Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione della malta indurita* - 2007.
- [13] V. Alvaro - *Materiali compositi a matrice cementizia per i rinforzi strutturali*. - Tesi di Laurea Università di Bologna, 2006-2007.