



UNA NUOVA GENERAZIONE DI MATERIALI COMPOSITI PER IL RINFORZO DI STRUTTURE ESISTENTI: PROPRIETA' DEI MATERIALI ED ASPETTI PROGETTUALI

Maria Antonietta Aiello e Alessio Cascardi

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento,
via per Arnesano, 73100 Lecce (IT)

antonietta.aiello@unisalento.it

alessio.cascardi@unisalento.it

Sommario

Il patrimonio edilizio murario è, come noto, molto vulnerabile alle azioni sismiche sia per le scarse proprietà meccaniche della maggior parte delle murature esistenti sia per il ricorso ad approcci progettuali adeguati a garantire la sicurezza solo in presenza di carichi gravitazionali. Inoltre, gli interventi tradizionali di rinforzo sono risultati, in alcuni casi, scarsamente efficaci in quanto associati ad un incremento delle masse e delle rigidità nonché ad un degrado a lungo termine.

A partire dal 1990 è cresciuto l'interesse verso l'impiego di materiali compositi per il rinforzo strutturale, costituiti da fibre ad alte prestazioni impregnate in una matrice polimerica (FRPs – Fiber Reinforced Polymers). Il successo di detti materiali è principalmente connesso agli elevati valori di resistenza e rigidità specifiche, all'assenza di corrosione elettrochimica, alla rapidità di installazione. Tuttavia, proprio la presenza della matrice polimerica pone alcune problematiche proprio nell'applicazione su strutture murarie. Infatti, la resina utilizzata riduce la traspirabilità della muratura, risulta poco compatibile con il substrato originario e comporta una non completa reversibilità degli interventi.

Nel cercare di superare dette limitazioni, sono stati sviluppati più recentemente i compositi di tipo FRCMs (Fabric Reinforced Cementitious Mortars). Gli FRCMs, sono compositi a matrice inorganica (malta di calce o di cemento) e dunque più compatibili con le murature esistenti, in grado di garantire una adeguata traspirabilità, più facilmente rimovibili. La ricerca scientifica in tale ambito è ancora in fase di sviluppo, sebbene la conoscenza ad oggi acquisita ha consentito di mettere a punto linee guida per la qualificazione e la progettazione di interventi di rinforzo mediante l'impiego di detti materiali. Nel presente lavoro, sono sinteticamente riportati alcuni aspetti inerenti la progettazione e le proprietà dei materiali, di interesse per i tecnici operanti nel settore.

1. Introduzione

Le strutture in muratura rappresentano una parte significativa del patrimonio costruito europeo e, in particolare, delle aree Mediterranee, ricadenti spesso in zone a medio/alto rischio sismico. Come noto, le costruzioni in muratura sono state realizzate in passato tenendo conto dei soli carichi gravitazionali, rispetto ai quali hanno mostrato nel tempo buone caratteristiche di resistenza meccanica. In caso di azioni orizzontali, quali quelle sismiche, la costruzione in muratura presenta delle carenze più o meno gravi, correlate sia alla concezione strutturale sia alla specifiche proprietà dei materiali. In riferimento al materiale, si rileva spesso il ricorso a murature scadenti e fortemente irregolari; tuttavia, anche nei casi in cui gli elementi resistenti risultano essere di buona fattura e buone proprietà meccaniche, queste ultime si abbattano notevolmente a causa delle scarse proprietà della malta utilizzata. D'altro canto, il sistema strutturale, concepito per i soli carichi gravitazionali, non consente un adeguato trasferimento delle azioni orizzontali e, quindi, non garantisce un comportamento globale dell'organismo resistente, con conseguenti crolli, spesso dovuti all'insorgere di meccanismi locali.

In tale scenario, nel corso dei decenni sono state studiate diverse tecniche di rinforzo finalizzate all'incremento della resistenza delle pareti murarie nel piano e fuori dal piano, all'incremento di capacità delle colonne, alla limitazione di possibili meccanismi locali, all'inibizione dei meccanismi di collasso di archi e volte, ecc. I materiali generalmente utilizzati a detti scopi erano il calcestruzzo e l'acciaio; sono stati, infatti, diversi gli interventi su pareti murarie mediante intonaci armati, il confinamento delle colonne mediante camicie in c.a., fasce in acciaio, tirantini antiespulsivi; la realizzazione di cappe armate sugli impalcati curvi; le iniezioni di malta semplice o armata; l'impiego di catene in acciaio a scopo di collegamento, ritegno, assorbimento della spinta, ecc. Detti interventi, sebbene efficaci in diverse situazioni, hanno determinato a volte un eccessivo aggravio di masse o incrementi rilevanti di rigidità e, soprattutto, hanno subito un degrado nel tempo dovuto alla corrosione dell'acciaio, con conseguente decadimento dell'efficacia dell'intervento medesimo. Ad esempio, l'ossidazione delle barre d'acciaio, inserite negli elementi strutturali, determina l'insorgere di uno stato tensionale aggiuntivo, causa di fenomeni fessurativi.

Al fine di superare detti inconvenienti sono state proposte soluzioni alternative, fra cui l'impiego dei materiali compositi (FRP e FRCM), che ha riscontrato un crescente interesse, considerata la soddisfacente efficacia degli stessi in diverse applicazioni. I compositi FRP, applicati esternamente all'elemento strutturale, possono essere realizzati sotto forma di lamine pultruse (compositi preformati) incollate sull'elemento da rinforzare, o di tessuti unidirezionali, bidirezionali, quadriassiali, che uniti alla matrice polimerica, formano i compositi realizzati *in situ*. Inoltre, in tale ambito bisogna menzionare anche l'impiego di barre, connettori e sistemi di ancoraggio, nonché di reti in FRP utilizzate per la tecnica dell'intonaco armato (CRM - *Composite Reinforced Mortar*), in sostituzione delle tradizionali reti in acciaio. L'applicazione di tali materiali si può ritenere ormai consolidata, così come la consapevolezza degli ambiti applicativi. Infatti, è molto vasta la ricerca condotta e che ha consentito di pervenire alla definizione di Linee Guida di Progettazione e di Qualificazione sia a livello nazionale sia internazionale. Gli FRP sono utilizzati per interventi di consolidamento di strutture in c.a., c.a.p., murature, legno e acciaio. I principali vantaggi degli FRP sono da ascrivere alle prestazioni meccaniche elevate, all'assenza di corrosione elettrochimica, all'esiguo peso e ai ridotti spessori, così come alla rapidità applicativa ed alla possibilità di poter realizzare l'intervento, in alcuni casi, senza interrompere l'utilizzo dell'opera.

I materiali FRCM sono, invece, compositi realizzati con una matrice a base cementizia o di calce, accoppiata a reti in fibra di carbonio, vetro, basalto e tessuti in acciaio ad altissima resistenza, galvanizzato o inox. Tali materiali, di più recente immissione nel mercato nazionale, risultano principalmente efficaci nelle applicazioni su strutture in muratura, in considerazione delle prestazioni meccaniche più ridotte rispetto ai materiali FRP, ma comunque elevate se raffrontate alle proprietà meccaniche dei substrati murari. Oltre al basso peso ed ai limitati spessori, l'interesse verso detti sistemi deriva anche dalla migliore resistenza degli stessi alle temperature elevate, dalla possibilità di applicarli anche in ambienti umidi e su superfici irregolari, dai minori oneri di cantiere. Con particolare riferimento alle costruzioni in muratura, spesso a carattere storico-monumentale, è da evidenziare la garanzia di un'adeguata traspirabilità del substrato, che ne consente anche un'applicazione diffusa sull'intero elemento strutturale, una maggiore compatibilità con il substrato originario, e la possibile rimovibilità del materiale, che ne favorisce l'uso anche su Beni Culturali.

Diversi sono gli studi condotti e disponibili in letteratura, sulla base dei quali è stato possibile pervenire alle prime linee guida progettuali ed alle linee guida di qualificazione ed accettazione. È, tuttavia, necessario evidenziare che la ricerca in tale ambito presenta ancora delle problematiche aperte che necessitano ulteriori sforzi ed approfondimenti. Nel seguito, con riferimenti ai compositi emergenti, di tipo FRCM, verranno illustrate le principali proprietà dei materiali ed alcuni aspetti relativamente alla progettazione degli interventi.

2. I compositi FRCM per il rinforzo strutturale

Il presente paragrafo si prefigge l'obiettivo di introdurre le principali proprietà meccaniche dei compositi FRCM e le procedure di valutazione delle stesse. I tipi di rete, generalmente utilizzati per la realizzazione dei compositi FRCM sono costituite da fibre di aramide, basalto, carbonio, vetro AR (alkali-resistant), PBO (poliparafenilenbenzobisoxazolo) e acciaio ad alta resistenza, trattasi di reti secche o preimpregnate. Dette reti sono disponibili in diverse grammature (kg/m^2) e con diverse dimensioni della maglia; ai fini progettuali si adotta un valore di spessore equivalente della rete (in mm), determinato in funzione della menzionata grammatura e della densità; detto spessore può risultare diverso nelle due direzioni (ordito e trama). Con riferimento a reti aventi le stesse proprietà in trama ed ordito, si riportano (Tabella 1) alcuni valori indicativi di spessore equivalente, di resistenza a trazione e di modulo elastico longitudinale, [1].

A dette reti si associano diverse tipologie di matrici inorganiche, ovvero malte a base di calce o cemento, anche con aggiunta di polimeri, in percentuali limitate, e di fibre corte; dette aggiunte oltre ad incrementare le performances della malta, possono essere finalizzate anche a migliorare l'adesione della stessa con la rete. La rete ha un comportamento a trazione di tipo elastico lineare e, quindi, completamente definito dalla resistenza a trazione, σ_{uf} , e dal Modulo Elastico, E_f , da cui si risale facilmente alla deformazione a rottura, ϵ_{uf} .

Le proprietà della matrice inorganica hanno una significativa influenza sulle prestazioni del rinforzo, come si accennerà nel seguito, per cui risulta necessario determinare la resistenza a compressione della malta, f_{cmat} . Detto valore risulta contenuto in ampi intervalli; infatti, le matrici a base calce spaziano in un range di resistenza a compressione tra 6 MPa e 15 MPa; mentre le matrici cementizie e i geopolimeri raggiungono valori compresi tra 18 MPa e 55 MPa; sono disponibili anche HPM (*High Performance Mortar*) che raggiungono resistenze a compressione anche superiori a 100 MPa. La resistenza a compressione, caratterizzante la tipologia di malta in termini meccanici, consente di cogliere in generale le performances della

stessa, compresa l'evoluzione del fenomeno fessurativo, che comporta importanti riflessi sulla risposta del composito FRCM.

| Tipo di fibra | Spessore equivalente (mm) | Resistenza a trazione (MPa) | Modulo elastico longitudinale (GPa) |
|----------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|
| Aramide | 0.033 | 3151 | 101 |
| Basalto | 0.033 – 0.058 | 1500 - 3200 | 90 |
| Carbonio | 0.047 – 0.157 | 2500 - 4800 | 230 |
| Vetro | 0.031 – 0.062 | 1200 - 2100 | 50 - 84 |
| PBO | 0.014 | 5800 | 270 |
| Acciaio | 0.084 – 0.138 | 1500 - 2800 | 190 |

Tabella 1 : Proprietà principali delle reti in commercio, [1].

In definitiva può essere qualificato come sistema di rinforzo FRCM una rete annegata in uno spessore definito di malta. Nel caso di singola rete, lo spessore complessivo di malta spazia tra 5 e 15 mm, al netto del livellamento del supporto, mentre nel caso di più reti detto spessore può raggiungere il limite di 30 mm. La necessità di utilizzare una rete piuttosto che un tessuto unidirezionale, come per gli FRP, deriva dalla diversa interazione fra fibre di rinforzo e matrice; infatti, mentre per gli FRP la resina organica riesce ad impregnare adeguatamente il tessuto garantendo anche una perfetta adesione fibra-matrice, nonché l'aderenza al substrato; nel caso di FRCM, al fine di assicurare una corretta aderenza, è necessario assicurare il passaggio della malta attraverso le maglie della rete [2], come visibile in Figura 1.

Contrariamente agli FRP, gli FRCM hanno un comportamento a trazione influenzato sia dalla matrice, soprattutto nella fase iniziale (fase non fessurata) e nella fase di evoluzione del quadro fessurativo, sia dalla rete, soprattutto nella fase post-fessurativa e fino alla rottura della stessa. Nella Figura 2 si riporta un legame qualitativo tensione di trazione- deformazione del sistema FRCM; detto legame può risultare di tipo bilineare o tri-lineare, in relazione alle modalità di evoluzione delle fessure nella malta [3], [4], [5], [6]. Ne consegue che la pendenza del primo tratto dipende fondamentalmente dalle proprietà meccaniche della matrice ed è caratterizzato dal modulo elastico, E_l , e dal valore di tensione corrispondente alla prima fessurazione della matrice inorganica. Il terzo tratto, le cui caratteristiche sono fondamentalmente dipendenti dalle proprietà della rete, si interrompe con la crisi del rinforzo, a cui corrispondono i parametri meccanici utilizzati ai fini progettuali, ovvero σ_u e ϵ_u , rispettivamente pari alla tensione di rottura ed alla relativa deformazione a rottura del sistema FRCM. I valori delle tensioni si riferiscono all'area netta del rinforzo secco presente nel composito (con riferimento allo spessore equivalente), trascurando quindi la presenza della matrice.



Figura 1: Esempio di FRCM con rete in fibra di vetro immersa in una matrice a base calce.

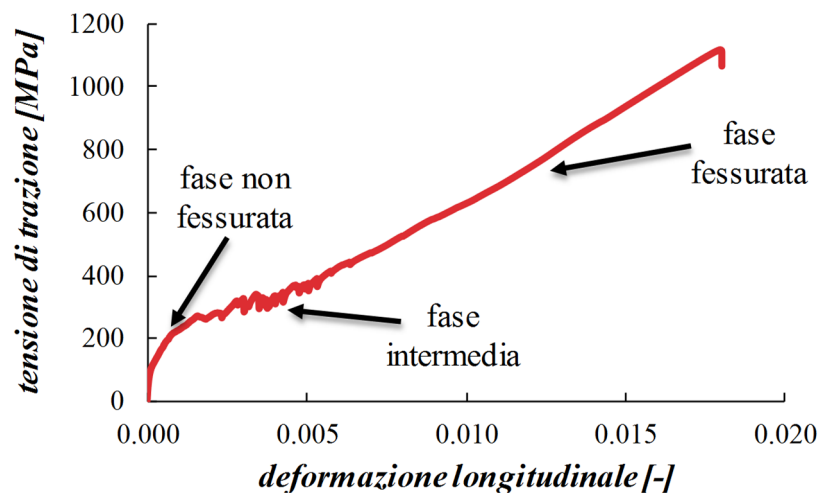


Figura 2: Legame costitutivo a trazione di un FRCM.

Nella Figura 3 si riporta un esempio di legame costitutivo determinato sperimentalmente su campioni di FRCM costituiti da una rete in fibra di vetro e da una malta a base calce, nonché l'immagine di uno dei campioni sottoposti a prova, in cui si rileva chiaramente il quadro fessurativo che insorge nella matrice durante il test. Nella Figura 4 si riporta il confronto fra i legami costitutivi di sistemi FRCM realizzati tutti con rete in fibra di vetro ma con malte di diverse caratteristiche meccaniche. I dettagli della campagna sperimentale e dei risultati ottenuti sono discussi in [6]. Si evidenzia dalla Figura 4 un andamento pressochè bilineare per i casi analizzati; inoltre, si può rilevare come il primo tratto sia influenzato dalle caratteristiche della malta mentre il secondo tratto ha pendenza parallela a quella della sola rete, il cui legame costitutivo viene riportato per confronto nella stessa figura.

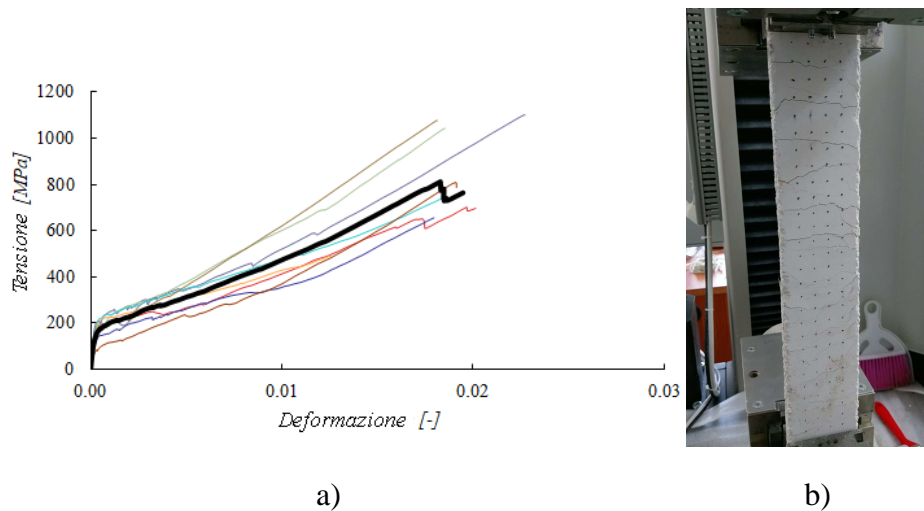


Figura 3 : Legame costitutivo a trazione di un FRCM costituito da rete in fibra di vetro e malta di calce: a) legame costitutivo per diversi campioni e valore medio; b) campione durante il test.

Ai fini della caratterizzazione meccanica dei compositi, è rilevante definire le proprietà di aderenza. Nel caso di compositi FRP, l'estesa ricerca disponibile in letteratura ha consentito di cogliere accuratamente il fenomeno di interazione composito-substrato e di pervenire a relazioni teoriche in grado di prevedere la tensione di delaminazione e la lunghezza di ancoraggio del rinforzo. Si precisa che per i compositi FRP rimane valida l'ipotesi di perfetta aderenza fra fibre e resina e che il fenomeno di delaminazione si verifica fundamentalmente con la crisi nel substrato, in condizioni ambientali usuali e qualora sia garantita una corretta applicazione del composito sull'elemento strutturale.

Nel caso di composito FRCM l'aderenza assume peculiarità diverse; infatti, a causa del comportamento fragile della matrice e della non perfetta aderenza con le fibre, la crisi per aderenza può avvenire secondo diverse modalità, che fundamentalmente coinvolgono la crisi del substrato, la crisi all'interfaccia composito/substrato o matrice/rete di rinforzo, lo sfilamento delle fibre dalla matrice. Dette modalità di crisi sono ben dettagliate in letteratura ([7] e [8]) e dipendono dalle caratteristiche della rete, della malta e del substrato. Attualmente non sono disponibili relazioni teoriche che consentono di valutare la tensione ultima di aderenza, pertanto è prevista una procedura di tipo sperimentale finalizzata a determinare la tensione corrispondente alla crisi per aderenza. Detto valore, $\sigma_{lim,conv}$, (calcolato come forza massima di aderenza diviso l'area netta della fibra), viene utilizzato come resistenza limite a trazione del composito nelle situazioni in cui si ritiene dominante, in fase progettuale, la crisi per aderenza. L'aderenza tra FRCM e substrato è stata analizzata sperimentalmente in letteratura attraverso prove di single-lap e double-lap [9]-[22]; i risultati ottenuti sono stati fundamentalmente comparabili; in [16] si propone uno specifico protocollo di prova, il cui schema è riportato in Figura 5.

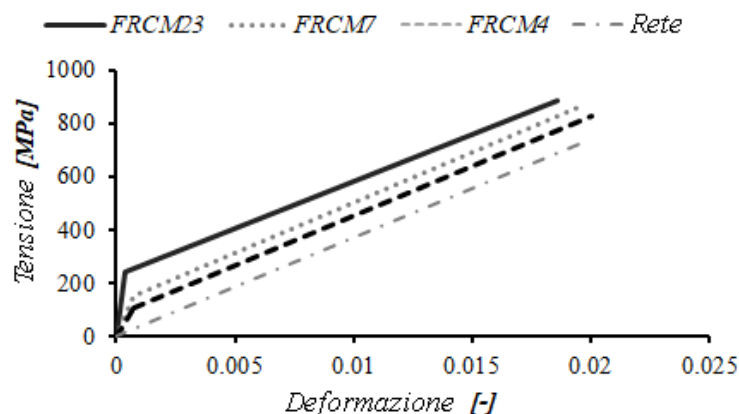


Figura 4 : Legame costitutivo a trazione di sistemi FRCM costituiti da rete in fibra di vetro e diverse tipologie di malte (M4, M7 e M23).

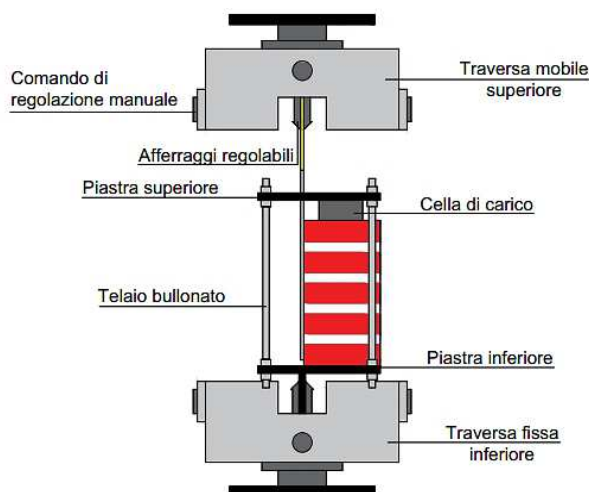


Figura 5 : Set-up di prova di aderenza.

In Figura 6 si riportano alcuni legami forza-spostamento ottenuti in seguito a prove di aderenza fra compositi FRCM in rete di vetro (Figura 6a) e carbonio (Figura 6b), applicati ad un substrato di muratura in laterizio. Nella Figura 7 è possibile osservare alcune modalità di crisi, ovvero per scorrimento delle fibre all'interno della matrice e per distacco fra la rete e la matrice.

In sintesi, già nella fase di qualificazione dei sistemi FRCM sono previste specifiche tipologie di prova (prova di trazione sulla rete e sul sistema FRCM, prove di aderenza, prove di compressione sulla malta) che consentono di definire completamente le proprietà meccaniche utili in fase progettuale. È da sottolineare che in [17] la caratterizzazione meccanica del composito viene condotta mediante la sola prova di trazione che, per il set-up utilizzato (*clevis type*), consente lo scorrimento fra fibra e matrice (si veda anche [18]). In Figura 8 si riporta il confronto fra il setup utilizzato per la prova di trazione, come riportato in [7], e quello suggerito in [17].

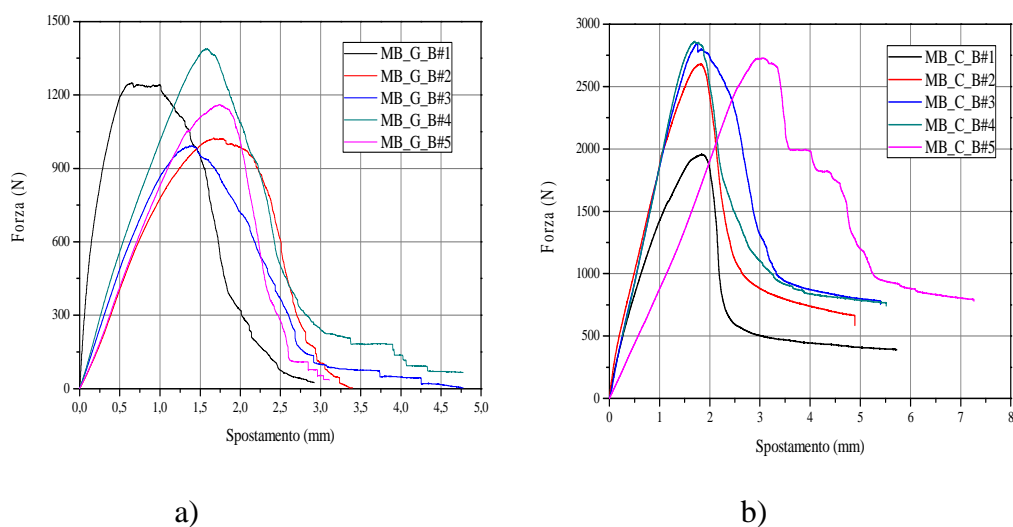


Figura 6 :Curve forza-spostamento sperimentali. a) vetro, b) carbonio.



Figura 7 : Dettaglio della crisi per aderenza di campioni di FRCM.

Un aspetto importante riguarda la durabilità di detti materiali, la cui valutazione risulta fondamentale al fine di garantire l'efficacia degli interventi anche a lungo termine. Sebbene i compositi FRP ed FRCM sono di fatto esenti dal problema della corrosione elettrochimica, l'eventuale degrado delle proprietà meccaniche in diverse condizioni ambientali è una tematica ancora in fase di ricerca, sebbene alcuni studi sull'argomento sono ad oggi disponibili in letteratura. A tal proposito in [7] sono previste delle prove di durabilità in fase di qualificazione miranti a definire l'eventuale degrado delle principali proprietà meccaniche in seguito a cicli di gelo e disgelo, condizioni di umidità elevata, ambienti salini ed alcalini, temperature di esercizio elevate. Inoltre, in fase progettuale [8], nel passare ai valori di progetto delle proprietà meccaniche, vengono introdotti, oltre ai coefficienti parziali di sicurezza, i fattori di conversione ambientale, che tengono conto degli effetti a lungo termine. Questi ultimi variano in funzione del tipo di fibra e della condizione di esposizione (interna, esterna o ambiente

aggressivo). In particolare si assume un valore pari a 0.9 per ambienti interni indipendentemente dal tipo di fibra; 0.8 per ambienti esterni indipendentemente dal tipo fibra e 0.7 per ambienti aggressivi fatta eccezione per il carbonio per cui è suggerito un valore pari a 0.8.



Figura 8 : Setup per prove di trazione su campioni di FRCM: clamp (*sinistra*) e clevis (*destra*).

Essendo i compositi FRCM costituiti da fibre lunghe, secche o preimpregnate, a contatto diretto con una matrice cementizia o a base di calce, diventa rilevante la valutazione della durabilità in ambiente alcalino; uno studio sperimentale in tale ambito è riportato in [23]. I materiali sono testati preliminarmente nelle condizioni più gravose, ovvero utilizzando fibre di vetro E, vetro AR, basalto, PBO, carbonio e acciaio, in assenza di resina. In seguito analoghi test sono stati condotti su materiale FRP, ovvero costituito da fibre e resina precurati. Detti materiali sono stati sottoposti a prove accelerate, seguendo quattro diversi protocolli di condizionamento, caratterizzati da diverse soluzioni alcaline. Le fibre di vetro E e di basalto hanno evidenziato un significativo degrado delle proprietà meccaniche; le fibre di acciaio e carbonio, invece, non hanno mostrato vulnerabilità in ambienti alcalini. D'altra parte per i campioni pre-curati è stato riscontrato un degrado più limitato, grazie alla protezione della resina, sebbene la riduzione del degrado dipenda anche dalla tipologia di resina utilizzata. I dettagli delle procedure di prova e degli ulteriori risultati sono riportati in [23]. Inoltre, In Figura 9 si riporta un'immagine al microscopio elettronico delle fibre di vetro E ed AR in seguito ai trattamenti. Si rileva il significativo danneggiamento delle fibre di vetro E in confronto al danneggiamento superficiale riscontrato per le fibre di vetro AR.

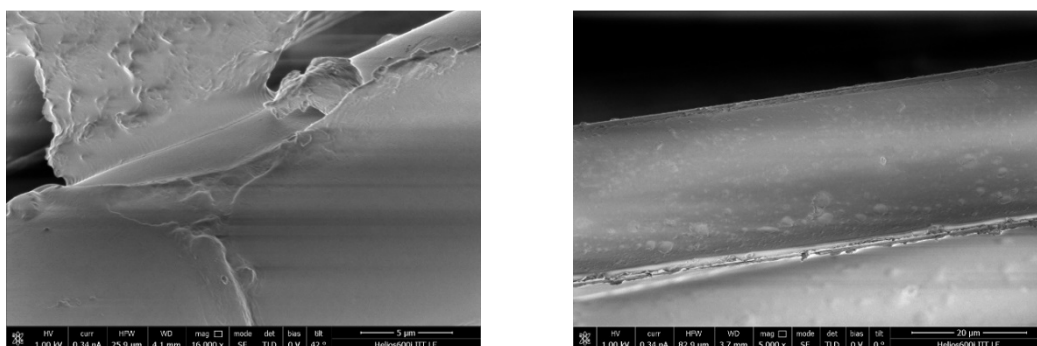


Figura 9 : Dettaglio SEM di fibre di vetro a seguito del condizionamento.

3. PROGETTAZIONE DI INTERVENTI CON FRCCM

Si riportano di seguito alcune fra le applicazioni più significative di rinforzo di strutture murarie mediante compositi FRCCM, utilizzando l'approccio progettuale riportato in [8], in particolare il confinamento di colonne murarie e il rinforzo nel piano di pannelli murari. Una analoga metodologia progettuale è riportata in [1], ove si è cercato, con un'operazione sinergica, di armonizzare l'approccio Europeo e statunitense per la progettazione di interventi su strutture murarie mediante compositi FRCCM. Generalmente, l'incremento della capacità di calcolo dell'elemento rinforzato con FRCCM non può risultare superiore del 50% rispetto a quella dell'elemento non rinforzato.

Il confinamento di elementi sottoposti a prevalente sollecitazione di compressione (colonne) consente di aumentarne sia la capacità resistente sia la duttilità dell'elemento rinforzato, [24]-[28]. Nello specifico, il confinamento mediante FRCCM viene generalmente realizzato mediante fasciatura continua della colonna (Figura 10), in considerazione della maggiore efficacia derivante da tale configurazione, fra l'altro resa possibile dall'assenza di problemi connessi alla traspirabilità della muratura.

La resistenza di progetto di una colonna muraria confinata, f_{mcd} , può essere valutata mediante l'Eq. (1):

$$f_{mcd} = f_{md} \left[1 + k' \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{md}} \right)^{0.5} \right] \quad (1)$$

dove k' è un coefficiente (adimensionale) che mette in conto l'influenza della tipologia di muratura come riportato in Eq. (2)

$$k' = \frac{g_m}{1000} \quad (2)$$

essendo g_m la densità di massa della muratura espressa in kg/m^3 . Nel caso di colonne circolari di diametro D , confinate con n_f strati di rinforzo, aventi spessore equivalente delle fibre nella direzione ortogonale all'asse dell'elemento t_f e la cui matrice sia caratterizzata da un valore $f_{c,mat}$ della resistenza caratteristica a compressione, la pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$, può essere calcolata con le Eqs. (3)-(7):

$$f_{l,eff} = k_H f_l \quad (3)$$

$$f_l = \frac{2n_f t_f E_f \varepsilon_{ud,rid}}{D} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ud,rid} = \min \left\{ k_{mat} \frac{\eta_a \varepsilon_{uf}}{\gamma_f} ; 0.004 \right\} \quad (5)$$

$$k_{mat} = 1.81 \left(\rho_{mat} \frac{f_{c,mat}}{f_{md}} \right)^2 \quad (6)$$

$$\rho_{mat} = \frac{4t_{mat}}{D} \quad (7)$$

essendo f_l la pressione di confinamento, k_H il coefficiente di efficienza orizzontale, da assumersi per le colonne circolari rivestite con continuità pari a 1, $\varepsilon_{ud,rid}$ la deformazione di calcolo del composito FRCCM e k_{mat} il coefficiente adimensionale di efficacia del confinamento

che tiene conto dell'influenza della matrice inorganica. Tale coefficiente è stato calibrato sulla base dei risultati sperimentali disponibili in letteratura e mette in conto l'influenza delle proprietà della matrice e, quindi, anche della sua propensione al danneggiamento, sulla resistenza del rinforzo medesimo.



Figura 10: Esempio di confinamento con FRCM: colonna non confinata (*destra*), applicazione della rete sul primo strato di malta (*sinistra*) e realizzazione della finitura a base di malta (*centro*).

I risultati di una campagna sperimentale condotta di recente dagli autori e dettagliatamente descritta in [6], hanno confermato come la risposta della colonna confinata varia con il tipo di matrice, pur mantenendo inalterati gli altri parametri (Figura 11). Detta campagna sperimentale fa riferimento a colonne di muratura realizzate con pietra naturale (pietra calcarea), confinate con una rete in fibra di vetro e tre tipologie di malta, M4, M7, M23, con resistenza nominale a compressione, rispettivamente, pari a 4 MPa, 7 MPa e 23 MPa. Nella Figura 11 viene riportato il valore della tensione normale nell'elemento confinato al variare della deformazione assiale; si rileva chiaramente come sia la resistenza dell'elemento confinato (valore di picco della curva), sia la rigidità iniziale e il comportamento post-picco siano influenzati dalle caratteristiche della matrice utilizzata.

Il confinamento mediante FRCM di elementi a sezione quadrata o rettangolare consente di conseguire incrementi della resistenza a compressione più modesti. Prima dell'applicazione del sistema FRCM è opportuno procedere, in tal caso, ad un arrotondamento degli spigoli della sezione, allo scopo di evitare concentrazioni di tensione localizzate in corrispondenza degli stessi, che potrebbero provocare una rottura prematura del sistema. Per la progettazione della resistenza a compressione della colonna confinata possono essere utilizzate le formule già riportate di sopra per le sezioni circolari (con D diagonale della sezione prismatica), in cui si tiene conto della ridotta efficacia del confinamento mediante il coefficiente k_H (Figura 12) calcolato con l'Eq. (8).

$$k_H = 1 - \frac{(b - 2r_c)^2 + (h - 2r_c)^2}{3bh} \quad (8)$$

dove:

- b e h sono la lunghezza e la larghezza della colonna rispettivamente,
- r_c è il raggio di curvatura dell'arrotondamento dello spigolo.

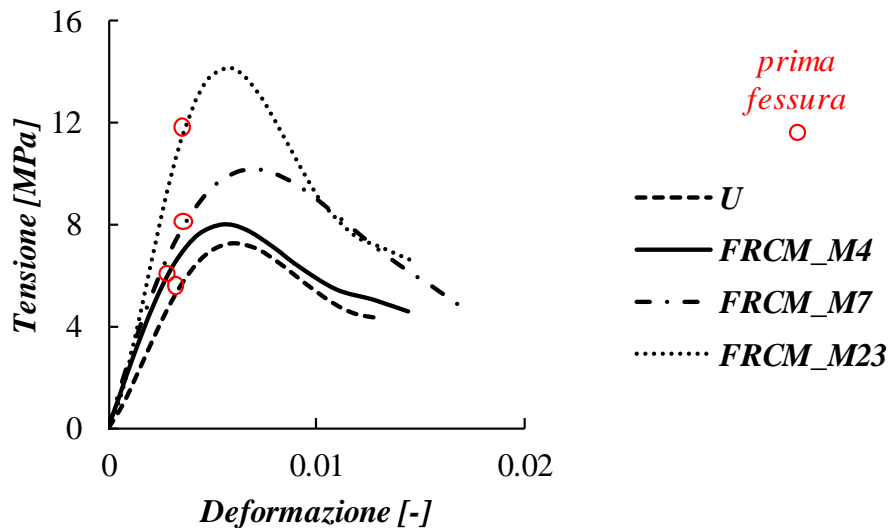


Figura 11 : Curve medie tensione normale-deformazione assiale delle colonne confinate al variare del tipo di matrice, [6].

Oltre alla tipologia di matrice utilizzata, la capacità dell'elemento confinato risulta influenzata anche da altri parametri, quali la tipologia di rete e di substrato murario. In Figura 13 si riporta il risultato di uno studio parametrico, finalizzato a fornire delle indicazioni sull'influenza di detti parametri. Si fa riferimento a colonne murarie, a sezione trasversale quadrata, di lato pari a 250 mm, realizzate con due tipologie di muratura, e caratterizzate da una resistenza a compressione, f_m , pari a 4 MPa e 8MPa. Si suppone di confinare dette colonne con rete in fibra di vetro AR, di carbonio, e con tessuto in acciaio, utilizzando la stessa tipologia di malta in tutti i casi. Inoltre, si prevede di realizzare il confinamento con un numero di strati di rinforzo, n_f , pari a 1, 2 e 3.

La resistenza della colonna confinata viene calcolata utilizzando le relazioni già riportate di sopra; nella Figura 13 viene rappresentato l'incremento di resistenza a compressione della colonna confinata rispetto a quella non confinata (f_{mcd}/f_{md}), in funzione dei parametri analizzati. L'analisi dei risultati ottenuti evidenzia come il confinamento con FRCM è maggiormente efficace quando applicato a substrati meno resistenti; le caratteristiche della rete di rinforzo influenzano notevolmente i risultati anche in relazione al numero di strati utilizzati.

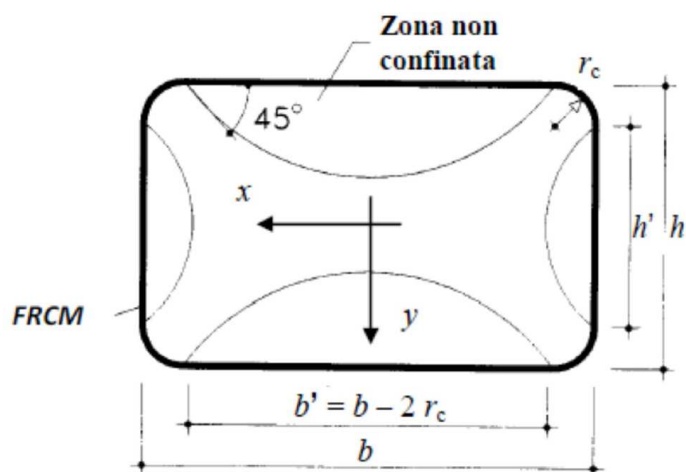


Figura 12: Sezione efficacemente confinata, [8].

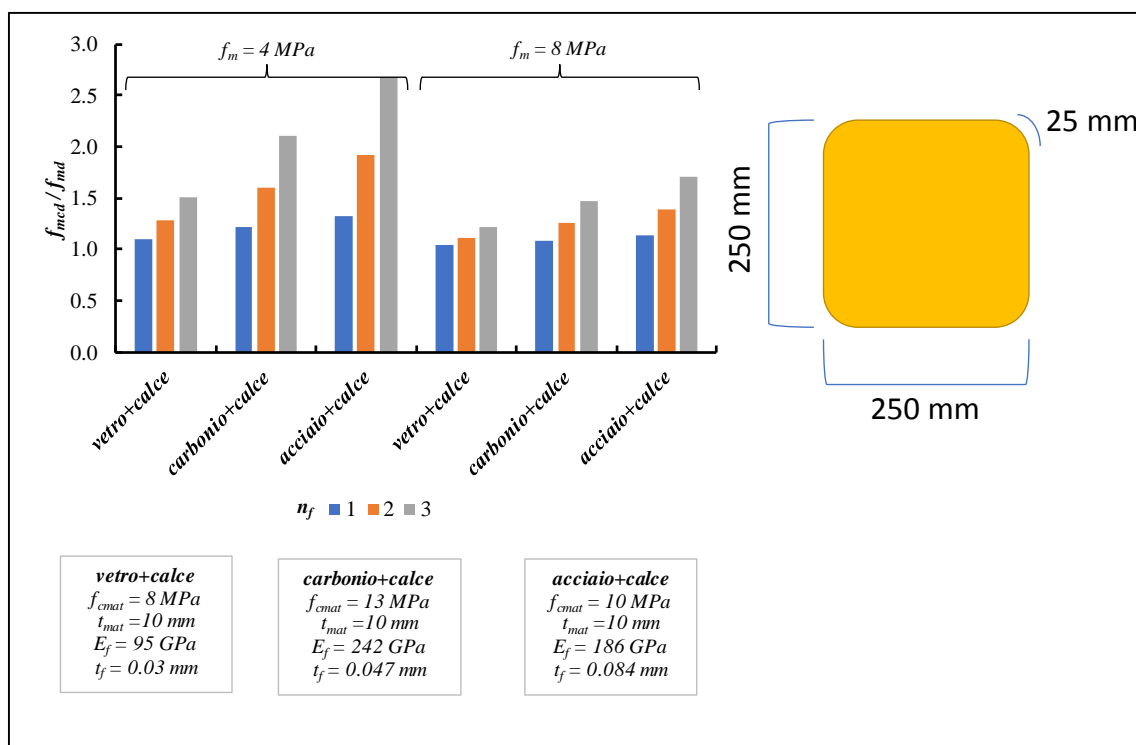


Figura 13 : Studio parametrico del confinamento di colonne in muratura al variare del sistema FRCM, del numero di avvolgimenti e del tipo di substrato.

Allo scopo di incrementare la portanza a taglio di pareti murarie sollecitate nel proprio piano, si applica il composito FRCM generalmente in modo simmetrico sulle due facce della parete, con le fibre preferibilmente dirette nelle direzioni verticale e orizzontale. Il rinforzo determina un incremento di capacità resistente a taglio ed un incremento di duttilità, derivante da una fessurazione diffusa sull'intera superficie del pannello, all'aumentare del carico, contrariamente

alla tipica crisi fragile del pannello non rinforzato che avviene con la formazione di fessure concentrate lungo le diagonali [29]-[32] (Figura 14).



Figura 14 : Pannello murario rinforzato con FRCM sottoposto a test di compressione diagonale.

Ai fini del progetto del rinforzo a taglio si considera l'area delle fibre disposte parallelamente alla forza di taglio e si trascura cautelativamente il contributo offerto dalla matrice inorganica. La resistenza a taglio della parete rinforzata ($V_{t,R}$) è calcolata come somma del contributo della muratura non rinforzata (V_t), valutato in accordo con la Normativa vigente per le pareti non rinforzate, e di quello del rinforzo ($V_{t,f}$). Quest'ultimo è valutato con la relazione riportata in Eq. (9).

$$V_{t,f} = 0.5 \cdot n_f \cdot t_{vf} \cdot b_f \cdot \alpha_t \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f \quad (9)$$

dove:

- n_f è il numero totale degli strati di rinforzo disposti sulle facce della parete;
- t_{vf} è lo spessore equivalente di uno strato di rete con fibre disposte in direzione parallela alla forza di taglio;
- b_f è la dimensione del rinforzo parallela alla forza di taglio, ed in ogni caso non può essere superiore alla larghezza della parete (dimensione misurata parallelamente alla forza di taglio).

Il prodotto: $n_f \times t_{vf} \times b_f$ è, di fatto, l'area della sezione equivalente del rinforzo efficace a taglio, disposto in direzione parallela alla forza di taglio. Il valore della ε_{fd} è la deformazione massima di progetto della fibra. Il coefficiente α_t tiene conto della ridotta resistenza estensionale delle fibre quando sollecitate a taglio. In mancanza di comprovati risultati sperimentali, ad esso può essere assegnato il valore 0.80. In presenza di rinforzo su un solo lato della parete, il contributo $V_{t,f}$ deve essere ridotto almeno del 30% e devono essere applicati

connettori che rendano solidale il rinforzo alla parete. Inoltre, deve essere verificato che il taglio agente non superi il valore di schiacciamento diagonale della muratura, come da Eq. (10).

$$V_{t,c} = 0.25 \cdot f_{md} \cdot t \cdot d_f \quad (10)$$

dove:

- t è lo spessore della parete;
- f_{md} è la resistenza a compressione di progetto della muratura;
- d_f è la distanza tra l'estremo lembo compresso della muratura e l'estremo lembo teso del rinforzo FRCM (fibre ortogonali alla direzione del taglio).

In maniera semplificata, il calcolo della capacità della muratura rinforzata può essere effettuato incrementando forfettariamente, con opportuni coefficienti, la resistenza a taglio della muratura non rinforzata, [8]. Tali coefficienti amplificativi sono stati calibrati sulla base dei risultati disponibili in letteratura; essi sono utilizzabili solo per spessori di muratura non superiori a 400 mm e nel caso di rinforzi disposti sulle due facce delle pareti. Nel caso di murature più spesse di 400 mm, per l'applicazione del rinforzo su un solo lato (e.g. in pareti affrescate) o muratura multi strato (e.g. murature a sacco) è consigliato l'uso di connettori trasversali (Figura 15). L'efficacia dei connettori nonché la loro progettazione è, tuttavia, un tema di ricerca che necessita ancora di ulteriori approfondimenti.



Figura 15: Dettaglio dell'inserimento di connettore metallico all'interno di una muratura.

I risultati di una vasta campagna sperimentale condotta su pannelli in muratura di pietra naturale (pietra calcarea), rinforzati a taglio con materiali di tipo FRCM e CRM, e sottoposti a compressione diagonale (Figura 16), sono presentati in [30]. Nella Figura 17 si riporta sinteticamente qualcuno dei risultati ottenuti, da cui si evince come in tutti i casi l'incremento di resistenza a taglio dei pannelli risulta rilevante. Infatti, il rapporto fra il carico di rottura del pannello rinforzato e quello del pannello non rinforzato ($P_{max} / P_{max-unreinforced}$) risulta superiore

a 7 per tutte le tipologie di rinforzo utilizzato (rete in carbonio, vetro, PBO ed intonaco armato). Inoltre, in Figura 18 vengono rappresentate alcune curve carico-deformazione diagonale, in relazione a pannelli rinforzati a singolo paramento. Da dette curve si conferma ulteriormente il rilevante incremento di resistenza ed è possibile apprezzare, inoltre, il significativo incremento di capacità dissipativa, intesa come area sottesa alle curve medesime sino alla condizione di crisi.



Figura 16 : Prove di compressione diagonale su pannelli in muratura di pietra calcarea.

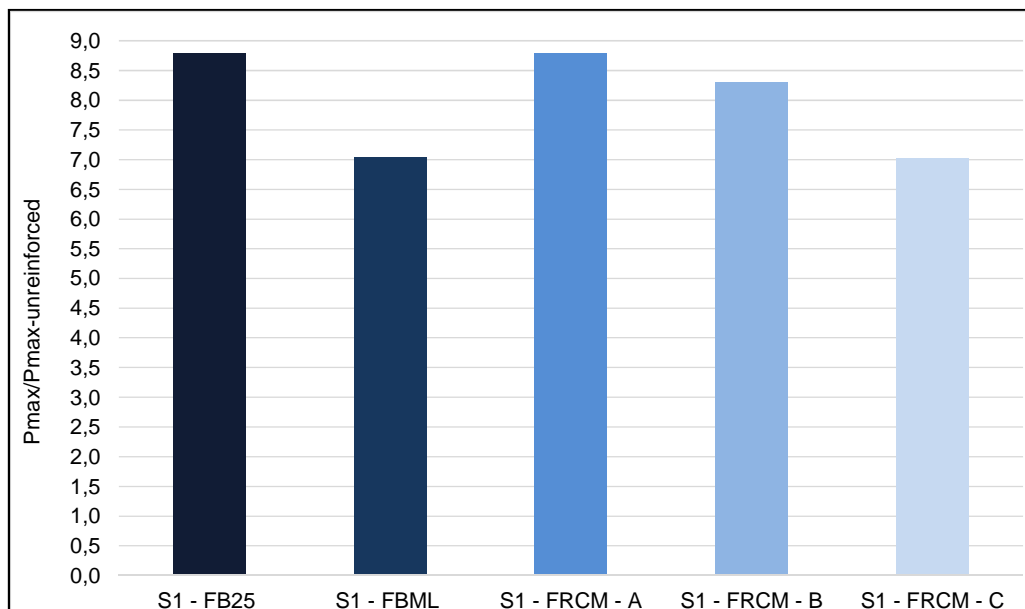


Figura 17 : Incremento di resistenza a taglio di pannelli murari rinforzati con FRCM/CRM.

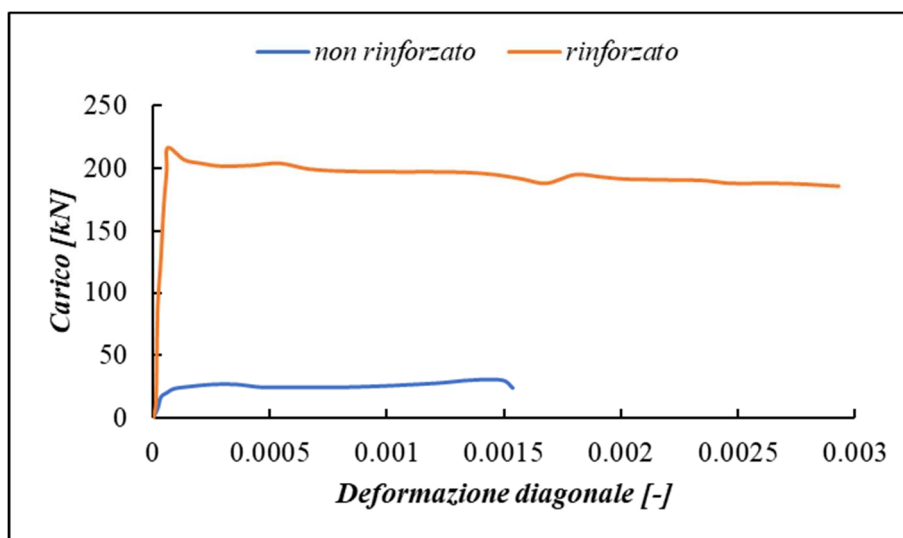


Figura 18 : Curve carico applicato-deformazione diagonale di pannelli murari a singolo paramento rinforzati a taglio con FRCM/CRM.

Conclusioni e sviluppi futuri

I materiali FRCM rappresentano una valida alternativa ai compositi tradizionali (FRP) per il rinforzo di costruzioni in muratura, grazie ad una maggiore compatibilità col substrato ed alla possibile rimovibilità, quest'ultima fondamentale in caso di opere a carattere monumentale. Il comportamento meccanico degli FRCM dipende dalle proprietà dei materiali costituenti (rete e malta), la determinazione dei parametri che lo caratterizzano può essere condotta mediante specifiche procedure sperimentali. Inoltre, risulta fondamentale, ai fini della caratterizzazione meccanica, definire le proprietà di aderenza. Nel caso di materiali FRCM dette proprietà sono correlate al comportamento delle diverse interfacce coinvolte, ovvero composito-substrato, rete-malta.

Oltre alle proprietà meccaniche a breve termine, risulta fondamentale anche la valutazione di quelle a lungo termine, specificatamente connesse all'influenza di diversi fattori, fra cui l'ambiente alcalino, costituito dalla stessa matrice inorganica. Detto ambiente determina un significativo degrado delle proprietà meccaniche, in caso di rete secca, soprattutto per le fibre di vetro E e di basalto. La determinazione delle proprietà meccaniche a breve e lungo termine è stata attualmente definita e riportata nell'ambito di Linee Guida nazionali ed internazionali.

Nel presente lavoro è stato, inoltre, presentato l'approccio progettuale utilizzato per il confinamento di colonne compresse e per il rinforzo a taglio di pareti murarie, evidenziando i principali parametri che influenzano l'efficacia del rinforzo e, comunque, il significativo contributo che si può ottenere anche in termini di duttilità. Anche da un punto di vista progettuale sono, ad oggi, disponibili specifiche Linee Guida

Si ribadisce, comunque, la necessità di ulteriori ricerche al fine di validare le formulazioni già recepite dalle Linee Guida, e di integrare/definire ulteriori formule progettuali e dettagli costruttivi validi per tutte le possibili applicazioni dei materiali FRCM.

Bibliografia

- [1] RILEM TC 250-CSM & ACI 549 - Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel Reinforced Grout (SRG) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures. (2019), [Draft Document].
- [2] Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. C. (2018). Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review (Doctoral dissertation, American Society of Civil Engineers).
- [3] Colombo, I., Colombo, M., Magri, A., Zani, G., & Di Prisco, M. (2012). Tensile behavior of textile: influence of multilayer reinforcement. In High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6 (pp. 463-470). Springer, Dordrecht.
- [4] Arboleda, D., Carozzi, F. G., Nanni, A., & Poggi, C. (2015). Testing procedures for the uniaxial tensile characterization of fabric-reinforced cementitious matrix composites. *Journal of Composites for Construction*, 20(3), 04015063.
- [5] Caggegi, C., Lanoye, E., Djama, K., Bassil, A., & Gabor, A. (2017). Tensile behaviour of a basalt TRM strengthening system: influence of mortar and reinforcing textile ratios. *Composites Part B: Engineering*, 130, 90-102.
- [6] Cascardi, A., Micelli, F., & Aiello, M. A. (2018). FRCM-confined masonry columns: experimental investigation on the effect of the inorganic matrix properties. *Construction and Building Materials*, 186, 811-825.
- [7] DP 8 gennaio 2019 n.1 - Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.
- [8] CNR-DT 215/2018. Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a matrice inorganica. (<https://www.cnr.it/it/node/9347>).
- [9] Sneed, L. H., D'Antino, T., & Carloni, C. (2014). Investigation of bond behavior of PBO fiber-reinforced cementitious matrix composite-concrete interface. *ACI Mater J*, 111(5), 569-580.
- [10] Sabau, C., Gonzalez-Libreros, J. H., Sneed, L. H., Sas, G., Pellegrino, C., & Täljsten, B. (2017). Use of image correlation system to study the bond behavior of FRCM-concrete joints. *Materials and Structures*, 50(3), 172.
- [11] D'Ambrisi, A., Feo, L., & Focacci, F. (2012). Bond-slip relations for PBO-FRCM materials externally bonded to concrete. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 2938-2949.
- [12] Ortlepp, R., Hampel, U., & Curbach, M. (2006). A new approach for evaluating bond capacity of TRC strengthening. *Cement and concrete composites*, 28(7), 589-597.
- [13] De Santis, S., Ceroni, F., de Felice, G., Fagone, M., Ghiassi, B., Kwiecień, A., ... & Viskovic, A. (2017). Round Robin Test on tensile and bond behaviour of Steel Reinforced Grout systems. *Composites Part B: Engineering*, 127, 100-120.
- [14] Donnini, J., & Corinaldesi, V. (2017). Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement. *Construction and Building Materials*, 145, 565-575.
- [15] Triantafillou T, Valluzzi MR, Viskovic A. Recommendation of RILEM TC 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate bond characterization. *Materials and Structures* 2018;51(4):95.

- [16] De Felice, G., Aiello, M. A., Caggegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Garbin, E., ... & Leone, M. (2018). Recommendation of RILEM Technical Committee 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate bond characterization. *Materials and Structures*, 51(4), 95.
- [17] AC434: 2013 – ICC-Evaluation Service, Whittier, CA – Acceptance Criteria for Masonry and Concrete strengthening using Fabric-Reinforced-Cementitious-Matrix (FRCM) Composite Systems.
- [18] Donnini, J., Chiappini, G., Lancioni, G., & Corinaldesi, V. (2019). Tensile behaviour of glass frcm systems with fabrics' overlap: experimental results and numerical modeling. *Composite Structures*.
- [19] Carozzi FG, Milani G, Poggi C. Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry structures. *Compos Struct* 2014; 107:711-725.
- [20] de Felice G, De Santis S, Garmendia L, Ghiassi B, Larrinaga P, Lourenço PB, Oliveira DV, Paolacci F, Papanicolaou CG. Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry. *Mater Struct* 2014;47(12):2021-2037.
- [21] Razavizadeh A, Ghiassi B, Oliveira DV. Bond behavior of SRG-strengthened masonry units: Testing and numerical modeling. *Constr Build Mater* 2014; 64:387-397.
- [22] Leone M, Aiello MA, Balsamo A, Carozzi FG, Ceroni F, Corradi M, Gams M, Garbin E, Gattesco N, Krajewski P, Mazzoti C, Oliveira DV, Papanicolaou CG, Ranocchiali G., Roscini F, Saenger D. Glass fabric reinforced cementitious matrix: Tensile properties and bond performance on masonry substrate. *Compos Part B-Eng* 2017; 127:196-214.
- [23] Micelli, F., & Aiello, M. A. (2017). Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments. *Composites Part B: Engineering*.
- [24] Cascardi, A., Aiello, M. A., & Triantafyllou, T. (2017). Analysis-oriented model for concrete and masonry confined with fiber reinforced mortar. *Materials and Structures*, 50(4), 202.
- [25] Cascardi, A., Longo, F., Micelli, F., & Aiello, M. A. (2017). Compressive strength of confined column with Fiber Reinforced Mortar (FRM): New design-oriented-models. *Construction and Building Materials*, 156, 387-401.
- [26] Di Ludovico, M., Fusco, E., Prota, A., & Manfredi, G. (2008, October). Experimental behavior of masonry columns confined using advanced materials. In *The 14th world conference on earthquake engineering*.
- [27] Fossetti, M., & Minafò, G. (2016). Strengthening of Masonry Columns with BFRCM or with Steel Wires: An Experimental Study. *Fibers*, 4(2), 15.
- [28] Maddaloni, G., Cascardi, A., Balsamo, A., di Ludovico, M., Micelli, F., Aiello, M. A., & Prota, A. (2017). Confinement of Full-Scale Masonry Columns with FRCM Systems. In *Key Engineering Materials* (Vol. 747, pp. 374-381).
- [29] Balsamo A., Asprone D., Iovinella I., Maddaloni G., Menna C., Prota A., Ceroni F., Zinno A. Effectiveness of inorganic matrix-grid composites for strengthening masonry walls. *Proceeding of 16th IB2MAC - International Brick and Block Masonry Conference, Padova, Italy, June 2016*.

- [30] Sciolti, M. S., Micelli, F., Dudine, A., & Aiello, M. A. (2018). In Plane Shear Behavior of Calcareous Masonry Panels Strengthened by FRCM. ACI Special Publication, 324-11, pp. 20.
- [31] Faella C., Martinelli E., Nigro E., Paciello S. Shear capacity of masonry walls externally strengthened by a cement-based composite material: An experimental campaign. *Construction and Building Materials* 24 (2010) 84–93.
- [32] Micelli F., Sciolti M.S. , Leone M., Aiello M.A., Dudine A. Shear behaviour of Fiber Reinforced Mortar strengthened masonry walls built with limestone blocks and hydraulic mortar. In: *Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges – Modena*, da Porto & Valluzzi (Eds) 2016 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02999-6.