



# Capacità tagliante di pannelli in muratura rinforzati con sistemi compositi TRM a base di calce idraulica e tessuto in lino

Giuseppe Ferrara<sup>a,b</sup>, Carmelo Caggegi<sup>b</sup>, Enzo Martinelli<sup>a</sup>, Aron Gabor<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno, Via Giovanni Paolo II 132, 84084, Fisciano, SA, Italy

<sup>b</sup> University Claude Bernard Lyon 1, Laboratory of Composite Materials for Construction (LMC2) Site Bohr, 82 Boulevard Niels Bohr, Campus de la DOUA, 69622 Villeurbanne Cedex, France

*Keywords: TRM; FRM; Prove di compressione diagonale; Rinforzo di muratura; Tessuto in lino.*

## ABSTRACT

I recenti eventi sismici accaduti in Italia hanno messo in luce la necessità di intervenire sugli edifici esistenti, per lo più strutture storiche in muratura caratterizzate da elevati livelli di vulnerabilità. L'impiego di materiali compositi a matrice cementizia e rinforzo in tessuto, definiti come sistemi Textile Reinforced Mortar (TRM), rappresenta un'efficiente tecnica per incrementare la resistenza di elementi in muratura. Il presente studio riporta i risultati di una campagna sperimentale realizzata al fine di valutare il potenziale di un innovativo sistema composito TRM utilizzato per incrementare la capacità tagliante di pannelli in muratura. Nello specifico, il sistema composito in considerazione è caratterizzato da una matrice a base di calce idraulica e un rinforzo in fibra naturale di lino. Le evidenze sperimentali confermano le potenzialità del sistema di rinforzo che conferisce ai pannelli rinforzati una maggiore resistenza rispetto ai muri non rinforzati e una capacità duttile del tutto assente in elementi privi di rinforzo, caratterizzati, invece, da un comportamento altamente fragile. Inoltre, il lavoro presenta un confronto tra il comportamento meccanico esibito dai campioni testati e quello teorico derivante dai modelli proposti da normative vigenti di comprovata validità..

## 1 INTRODUZIONE

Il territorio italiano e, più in generale, tutta l'area del bacino mediterraneo, sono caratterizzati dalla presenza di edifici storici in muratura, spesso con un alto grado di vulnerabilità, i quali, sorgendo in una zona con una significativa pericolosità sismica, costituiscono un'importante fonte di rischio. In tale contesto la problematica del rinforzo e dell'adeguamento sismico di edifici esistenti rappresenta una delle sfide di maggior rilievo della nostra società, soprattutto a seguito degli ingenti danni prodotti dai recenti eventi sismici verificatisi in centro Italia.

Tra le varie tecniche di rinforzo esistenti, l'impiego di materiali compositi a matrice inorganica e rinforzo interno in tessuto, definiti in letteratura come sistemi Textile Reinforced Mortar (TRM), negli ultimi anni ha attirato l'attenzione sia della comunità scientifica che dei professionisti. Tale interesse è dovuto ad una serie di proprietà che rendono i sistemi TRM particolarmente vantaggiosi: buone proprietà

meccaniche, permeabilità al vapore, maggiore compatibilità con il supporto sul quale sono applicati rispetto a compositi a matrice polimerica, reversibilità dell'intervento, tempi e costi di installazione competitivi rispetto ad altre tecniche esistenti (D'Ambrisi et al. 2013).

Negli ultimi anni vari studi sono stati condotti al fine di definire procedure di caratterizzazione dei sistemi TRM attraverso prove di trazione sul composito stesso, e di aderenza fra il composito e il substrato sul quale è applicato (RILEM TC 232-TDT 2016, de Felice et al. 2018). I tessuti maggiormente impiegati in tali applicazioni sono a base di fibre in PBO, carbonio, basalto o vetro (Caggegi et al. 2017, Carozzi et al. 2017, Lignola et al. 2017, Leone et al. 2017). L'efficienza del sistema di rinforzo è stata, inoltre, esaminata sperimentalmente anche su scale di analisi maggiori, studiando il comportamento di muri, costituiti da pietre naturali o mattoni, rinforzati attraverso sistemi TRM (Marcari et al. 2017). Nello specifico, la caratterizzazione è effettuata tramite prove di flessione e compressione diagonale finalizzate a riprodurre condizioni di carico, nel piano e fuori piano, alle quali sono

tipicamente sottoposti elementi strutturali in muratura in corrispondenza di eventi sismici (Sagar et al. 2017).

Al fine di conferire ai sistemi compositi TRM maggiore sostenibilità diversi studi si sono interessati alla possibilità di utilizzare fibre vegetali come rinforzo al posto delle fibre industriali tradizionalmente impiegate (Cevallos and Olivito 2015). Tali studi hanno dimostrato il forte potenziale dei cosiddetti sistemi *Natural TRM* realizzati con diverse tipologie di fibre naturali: lino, curaua, sisal, iuta, coir o canapa (Ferreira et al. 2017, Codispoti et al. 2015).

Lo studio in oggetto ha l'obiettivo di verificare l'efficienza di un sistema di rinforzo TRM realizzato con una matrice a base di calce idraulica e un tessuto in lino (*Flax-TRM*). Le caratteristiche meccaniche di tale sistema composito, concepito per rispondere all'attuale esigenza di soluzioni quanto più sostenibili, sono state identificate attraverso precedenti campagne sperimentali i cui risultati, mostrati in lavori correlati, mettono in luce la virtuosità del sistema stesso (Ferrara et al. 2019a, Ferrara et al. 2019b). Come naturale prosecuzione di tali evidenze sperimentali, nel presente studio il sistema *Flax-TRM* è applicato come rinforzo a pannelli murari la cui prestazione meccanica è valutata attraverso prove di compressione diagonale. Nello specifico la risposta meccanica di pannelli murari in laterizio ad una testa, rinforzati ad entrambi i lati da un sistema *Flax-TRM* è confrontata con quella esibita da elementi murari privi di rinforzo. Due configurazioni di rinforzo, rispettivamente caratterizzate da uno o due strati di tessuto in lino, sono presi in considerazione. Lo studio sperimentale conferma le promettenti potenzialità dell'impiego di fibre naturali come rinforzo in sistemi compositi TRM che ha mostrato di attribuire un significativo incremento di resistenza agli elementi murari oggetto di studio.

## 2 MATERIALI E METODI

### 2.1 Substrato in muratura

Il supporto in muratura consiste in pannelli in laterizio, ad una testa, delle dimensioni di 1 m x 1 m costituiti da 16 filari con legatura a giunti sfalsati separati da letti di malta da 1 cm. I laterizi impiegati sono mattoni pieni in argilla di dimensioni 25 x 12 x 5.5 cm<sup>3</sup> caratterizzati da una resistenza a compressione pari a 17.89 MPa (Co.V. 5%) e da una resistenza a trazione di 2.46 MPa (Co.V. 11%). (de Felice et al. 2015). Al fine di riprodurre una muratura rappresentativa di

strutture esistenti, è stata adottata una malta di calce idraulica di bassa resistenza la cui composizione volumetrica è di 2 parti di legante, 4 parti di sabbia e 1.3 parti di acqua. La malta, caratterizzata secondo ai sensi della norma EN 196-1 (1994), presenta una resistenza a flessione di 0.94 MPa (C.o.V. 20%) e una resistenza a compressione di 4.11 MPa (C.o.V 21%).

### 2.2 Rinforzo Flax-TRM

Il sistema di rinforzo *Flax-TRM*, costituito da tessuto in fibra di lino e matrice a base di calce idraulica, è applicato su entrambi i lati dei muri in maniera diffusa coprendo interamente la superficie rinforzata. Il rinforzo in fibra naturale impiegato consiste in un tessuto di lino costituito da cordoni disposti secondo una maglia bidirezionale caratterizzata dalla stessa resistenza nelle due direzioni (Figura 1).

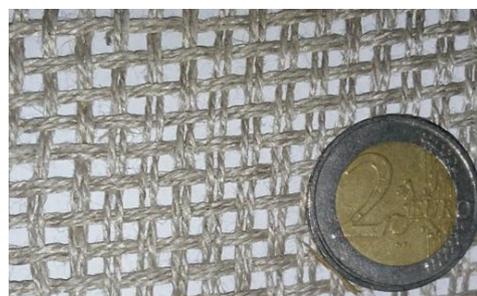


Figura 1. Tessuto in lino.

Le principali proprietà fisiche e meccaniche del tessuto sono elencate nella (Tabella 1) (Ferrara et al. 2019a).

Tabella 1. Proprietà del tessuto in lino.

Proprietà	Mean	Co.V. (%)
diametro dei filamenti ( $\mu\text{m}$ )	16.78	29.64
densità ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.19	3.29
densità lineare (Tex)	302	15.27
n° corde/cm	4.3	-
sezione della corda ( $\text{mm}^2$ )	0.25	16.62
modulo di Young (GPa)	9.36	10.67
deformazione alla rottura (%)	3.85	12.94
resistenza a trazione (MPa)	353.72	11.53

La matrice del sistema composito *Flax-TRM* consiste in una malta premiscelata a base di calce idraulica costituita da un misto granulometrico di aggregati la cui taglia massima è pari a 2.5 mm. Il quantitativo di acqua è pari al 19% in peso del composto premiscelato. La scelta di una calce idraulica, piuttosto che una matrice cementizia, è dovuta ad una maggiore affinità, e dunque compatibilità, con i materiali tradizionalmente impiegati per la realizzazione delle strutture storiche esistenti. La malta, caratterizzata secondo

quanto descritto nella norma EN 196-1 (1994), presenta una resistenza a flessione di 3.13 MPa (C.o.V. 13%) e una resistenza a compressione di 11.13 MPa (C.o.V 8%).

La caratterizzazione meccanica del composito è stata effettuata in uno studio precedente (Ferrara and Martinelli 2018) attraverso prove di trazione, condotte secondo raccomandazioni RILEM TC 232-TDT (2016), che hanno mostrato una capacità massima del composito pari a 1255 N (C.o.V. 10%) e di 2430 N (C.o.V. 7%) relativamente a sistemi rinforzati rispettivamente con uno e due strati di tessuto in lino.

Il sistema di rinforzo è applicato sull'intera superficie che viene opportunamente umidificata prima dell'applicazione (Figura 2a). Dopo l'applicazione del primo letto di malta, il tessuto viene distribuito su tutta la superficie e applicato facendo pressione per garantire una corretta penetrazione della malta attraverso lo stesso (Figura 2b). Nel caso di più strati di rinforzo la procedura è iterata facendo attenzione ad interporre un sottile letto di malta fra gli strati. L'applicazione viene completata con uno strato di malta esterno che viene opportunamente rifinito per rendere la superficie piana (Figura 2c).

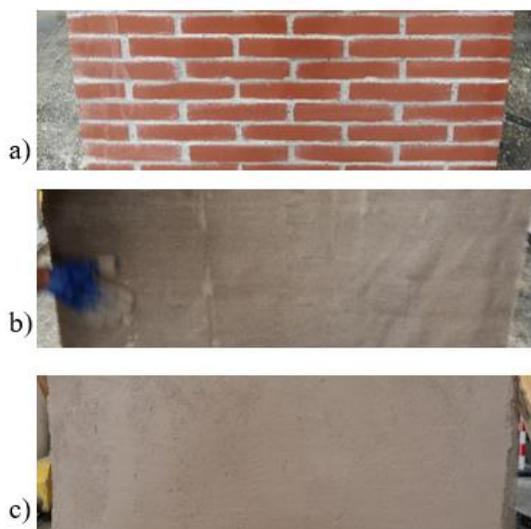


Figura 2. Applicazione del sistema di rinforzo: a) superficie del muro prima del rinforzo; b) applicazione del primo strato di malta e del tessuto; c) applicazione dell'ultimo strato di malta e rifinitura della superficie.

### 2.3 Metodi

La campagna sperimentale, condotta presso il Laboratory of Composite Materials for Construction (LMC<sup>2</sup>) della University Claude Bernard Lyon 1, prevede tre configurazioni diverse di provini:

- *Muri non rinforzati* (USW): consiste in 3 muri 1 x 1 x 0.12 m<sup>3</sup> privi di rinforzo realizzati e testati per studiare il

comportamento meccanico di riferimento (Figura 3a);

- *Muri rinforzati con un sistema TRM costituito da uno strato di tessuto in lino* (SW-1F): consiste in 3 muri 1 x 1 x 0.12 m<sup>3</sup> esternamente rinforzati in entrambi i lati dal sistema composito *Flax-TRM* avente uno spessore di 5 mm e costituito da un unico strato di tessuto in fibra di lino (TRM-1F) (Figura 3b);
- *Muri rinforzati con un sistema TRM costituito da due strati di tessuto in lino* (SW-2F): consiste in 3 muri 1 x 1 x 0.12 m<sup>3</sup> esternamente rinforzati in entrambi i lati dal sistema composito *Flax-TRM* avente uno spessore di 8 mm e costituito da due strati di tessuto in fibra di lino (TRM-2F) (Figura 3c).

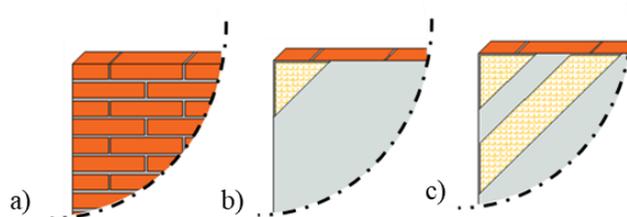


Figura 3. Serie di provini: a) muri non rinforzati USW; b) Muri rinforzati col sistema 1Flax-TRM, SW-1F; c) Muri rinforzati col sistema 2Flax-TRM, SW-2F.

Le prove di compressione diagonale sono state effettuate in accordo con le raccomandazioni RILEM (RILEM TC-76-LUM 1994) (Figura 4a).

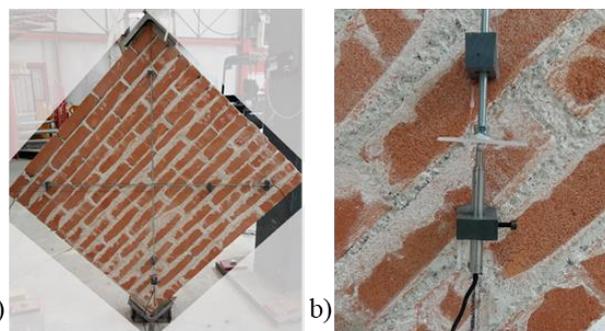


Figura 4. a) set-up di prova della prova di compressione diagonale; b) particolare del trasduttore di spostamento.

In prossimità delle due estremità di carico è stato fissato un angolare in acciaio che copre su ogni lato una lunghezza di 15 cm riducendo effetti locali nella zona di carico. Gli spostamenti verticali e orizzontali lungo le due diagonali del muro sono stati registrati tramite dei trasduttori di spostamento LVDT che misurano nelle due direzioni rispettivamente l'accorciamento e l'allungamento tra due punti posti ad una distanza di 1 m (Figura 4b). La prova è condotta in controllo di spostamento, con una velocità di applicazione del carico di 1 mm/min.

### 3 RISULTATI E ANALISI

#### 3.1 Risultati

La risposta meccanica dei pannelli murari sottoposti a prova di compressione diagonale è presentata sotto forma di curve che mettono in relazione il valore del carico con gli spostamenti lungo le due diagonali: accorciamento lungo la diagonale verticale e allungamento lungo la diagonale orizzontale monitorati attraverso trasduttori di spostamento (Figura 5).

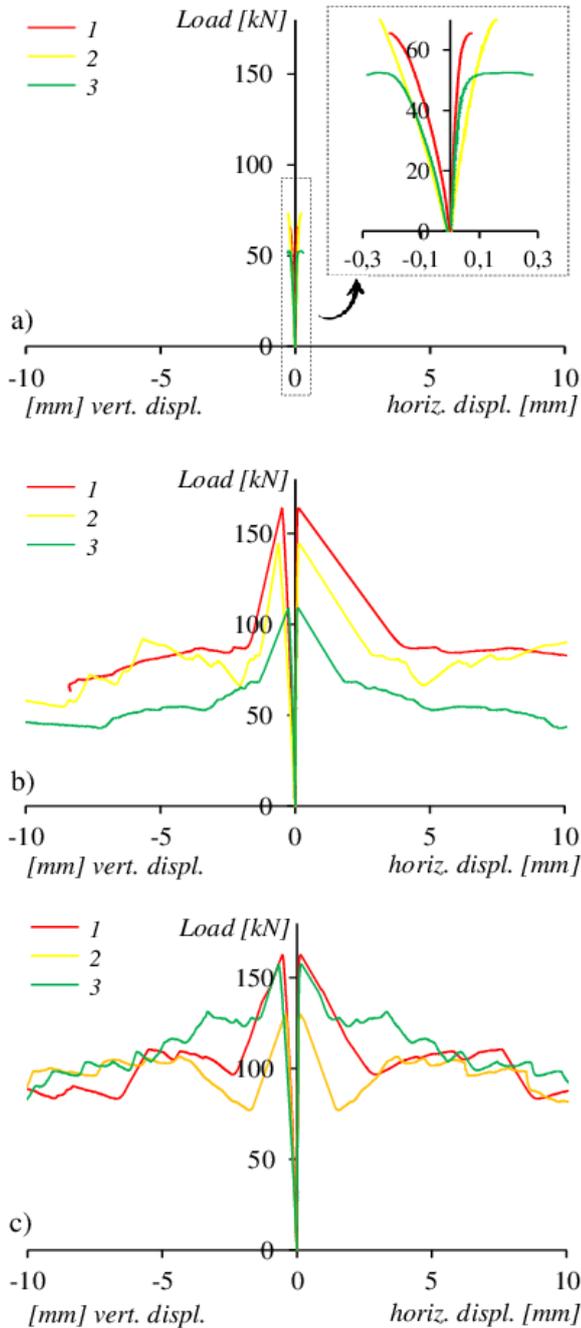


Figura 5. Curve Carico-Spostamento orizzontale/verticale relative alle serie di provini: a) Muri non rinforzati, USW; b) Muri rinforzati col sistema TRM-1F, SW-1F; c) Muri rinforzati col sistema TRM-2F, SW-2F.

#### 3.2 Parametri di analisi

A partire dalle curve Carico-Spostamento mostrate si determinano alcuni parametri tramite i quali è possibile quantificare il comportamento meccanico dei pannelli murari sottoposti a compressione diagonale. In corrispondenza del carico massimo,  $P_{peak}$ , vengono definiti i valori di scorrimento angolare,  $\gamma_{peak}$ , secondo quanto descritto nella norma ASTM 519-2 (2003) (Equazione 1), e di tensione tangenziale  $\tau_{peak}$ . Quest'ultima, generalmente denominata  $\tau_0$ , è definita come la tensione tangenziale massima che si sviluppa nel punto centrale del pannello in condizioni di taglio puro e, dunque, in assenza di compressione. Considerando il sistema sottoposto alle condizioni al contorno imposte dalla prova di compressione diagonale esistono diversi approcci per determinare tale valore: secondo l'approccio seguito dalla norma ASTM 519-2 (2003) nel concio situato all'intersezione delle diagonali, e orientato secondo le stesse, le tensioni principali di trazione e compressione attingono lo stesso valore, e la tensione tangenziale,  $\tau_{0,ASTM}$ , può essere definita secondo l'Equazione 2; secondo l'approccio seguito dalle raccomandazioni RILEM TC-76-LUM (1994) lo stato tensionale sullo stesso concio è determinato a partire da una soluzione elastica considerando il pannello isotropo e omogeneo da cui derivano valori diversi delle tensioni principali di trazione e compressione, e la tensione tangenziale,  $\tau_{0,RILEM}$ , può essere definita secondo l'Equazione 3.

A seguire le equazioni citate sopra:

$$\gamma = (\Delta V / \Delta H) / g \quad (1)$$

$$\tau_{0,ASTM} = 0.707 \cdot P / A_n \quad (2)$$

$$\tau_{0,RILEM} = 0.90 \cdot P / A_n \quad (3)$$

ove  $\gamma$  rappresenta lo scorrimento angolare;  $\Delta V$  e  $\Delta H$  sono rispettivamente le variazioni di spostamento lungo la diagonale verticale orizzontale registrati dai trasduttori di spostamento;  $g$  rappresenta la lunghezza lungo la quale i trasduttori di spostamento registrano la variazione di lunghezza ed è pari ad 1 m;  $\tau_{0,ASTM}$  e  $\tau_{0,RILEM}$  rappresentano il valore della tensione tangenziale al centro del pannello in assenza di sforzo normale rispettivamente valutati secondo i due approcci sopra citati;  $P$  rappresenta il carico di compressione diagonale applicato al provino;  $A_n$  rappresenta l'area netta della parete definita come prodotto fra lo spessore e il lato del muro.

Al fine di caratterizzare la capacità dissipativa dei muri vengono considerati i valori di energia  $E_{el}$  e  $E_{in}$  definiti come l'area sottesa alla curva *Carico vs Spostamento verticale* rispettivamente nella fase elastica (da inizio prova fino al raggiungimento del carico di picco) e nella fase inelastica (dal carico di picco fino al raggiungimento di un valore del carico pari al 30% del carico massimo).

La Tabella 2 racchiude tutti i parametri sopra citati relativamente a tutti i campioni testati in compressione diagonale.

Tabella 2. Parametri della prova di compressione diagonale.

Provino	$P_{peak}$ (kN)	$\tau_{peak}^{ASTM}$ (MPa)	$\tau_{peak}^{RILEM}$ (MPa)	$\gamma_{peak}$ (%)	$E_{el}$ (J)	$E_{in}$ (J)
USW-1	66	0.39	0.49	0.03	9	-
USW-2	73	0.43	0.55	0.05	11	-
USW-3	53	0.31	0.39	0.05	11	-
Mean	64	0.38	0.48	0.04	10	-
Co.V. (%)	16	16	16	27	11	-
SW-1F-1	164	0.97	1.23	0.06	48	881
SW-1F-2	145	0.85	1.08	0.07	51	1552
SW-1F-3	109	0.64	0.82	0.04	19	1019
Mean	139	0.82	1.04	0.06	39	1151
Co.V. (%)	20	20	20	34	45	31
SW-2F-1	163	0.96	1.22	0.07	54	1730
SW-2F-2	130	0.77	0.98	0.05	31	2964
SW-2F-3	158	0.93	1.18	0.08	65	3222
Mean	150	0.88	1.13	0.07	50	2639
Co.V. (%)	12	12	12	22	35	30

### 3.3 Analisi dei risultati

La rottura dei muri è caratterizzata dalla nascita di fessure che si sviluppano con un andamento lungo la diagonale verticale. I muri non rinforzati esibiscono un comportamento fragile costituito da una fase elastica fino al carico massimo seguito da una rottura improvvisa del campione. I muri rinforzati, invece, sono caratterizzati da una fase di post-picco durante la quale il carico decresce al crescere dell'allargamento delle fessure createsi nella zona centrale (Figura 6).

La graduale riduzione del carico nella fase inelastica è dovuta alla progressiva rottura del tessuto in lino in prossimità della zona di fessurazione. In un unico campione dei muri rinforzati, il provino *SW-1F-1*, durante la fase post-picco si sono registrati fenomeni di debonding con parziale distacco del rinforzo *Flax-TRM* dal substrato in muratura nella zona estrema del campione.

Un incremento significativo del carico di picco si osserva nei campioni esternamente rinforzati dal sistema composito *Flax-TRM* rispetto ai muri non rinforzati di riferimento. In particolare, nel caso dei muri rinforzati col sistema costituito da un solo strato di tessuto per ciascuna faccia (serie *SW-1F*) si è registrato un valore medio del carico di picco del 118% più grande rispetto a quello relativo alla serie non rinforzata *URW*. Tale incremento raggiunge un valore del 136% nel caso dei muri rinforzati col sistema *Flax-TRM-2F* costituito da doppio strato di tessuto di rinforzo, serie *SW-2L*. Le evidenze sperimentali, inoltre, mostrano che i provini rinforzati sono costituiti da una fase duttile post-picco completamente assente nel caso dei provini non rinforzati.



Figura 6. Quadro fessurativo osservato sui muri rinforzati (provino *SW-1F-2*)

Confrontando fra di loro le due diverse modalità di rinforzo, invece, si evince che in prossimità del carico massimo si registra una caduta dello stesso che è pari al 37% del carico di picco nel caso dei campioni appartenenti alla serie *SW-1F*, e pari al 18% nel caso dei provini *SW-2F*. Tale evidenza mette in risalto che anche dopo la fessurazione i muri con un quantitativo maggiore di rinforzo riescono a sopportare dei carichi più elevati. Infatti, analizzando i valori dell'energia dissipata in fase inelastica,  $E_{in}$ , si evince come questo parametro raggiunga un valore mediamente più grande di circa 2.3 volte nella serie *SW-2F* rispetto al valore relativo ai provini *SW-1F*. Tale risultato mette in risalto che

incrementando il quantitativo di rinforzo, nelle proporzioni proposte nel presente studio, il composito stesso esibisce un incremento di capacità. Sono pertanto da escludersi, in tale caso studio, fenomeni di riduzione della capacità di aderenza del sistema composito stesso all'aumentare della quantità di fibra, a causa di una complessiva riduzione della maglia del tessuto dovuta alla sovrapposizione degli strati di rinforzo.

### 3.4 Confronto con la normativa

In questa sezione si vuole valutare se i modelli di capacità generalmente utilizzati per setti in muratura rinforzati da sistemi TRM risultano in linea con le osservazioni sperimentali. A tal fine si fa riferimento alla normativa italiana NTC 2018 e al Capitolo 8 della relativa circolare esplicativa, relativo alle costruzioni esistenti, per quanto riguarda la valutazione della capacità tagliante di pannelli murari non rinforzati. Si fa riferimento, invece, alle istruzioni contenute nel CNR-DT 215/18 (2018) per valutare l'incremento di resistenza fornito dall'applicazione del sistema composito TRM.

Il confronto in termini di resistenza tagliante dei muri non rinforzati può essere effettuato in termini di tensione tangenziale massima in assenza di sforzo normale. A partire dai risultati sperimentali si è ottenuto un valore della tensione tangenziale massima,  $\tau_0$ , compresa fra i valori di 0.38 MPa e 0.48 MPa derivanti dai due approcci illustrati nel paragrafo precedente. La normativa, invece, a partire dalle proprietà meccaniche dei materiali costituenti la parete, e considerando una tipologia di muratura in mattoni pieni e a malta di calce di buona qualità, restituisce una stima della tensione tangenziale,  $\tau_0$ , compresa fra i valori di 0.15 MPa e 0.32 MPa. Tale confronto mostra che i risultati sperimentali hanno fornito dei valori più elevati rispetto a quelli che vengono convenzionalmente adottati in fase di progettazione seguendo la normativa citata.

La capacità tagliante del muro non rinforzato (Equazione 4) viene determinata attraverso la formula di Turnsek-Cacovic modificata riportata nella circolare esplicativa della NTC 2018, che in assenza di sforzo normale assume la seguente forma:

$$V_t = A_n \cdot 1.5 \cdot \tau_0 / b \quad (4)$$

ove  $A_n$  rappresenta l'area netta della parete definita come prodotto fra lo spessore e il lato del muro,  $\tau_0$  è la tensione tangenziale massima in assenza di sforzo normale che viene assunta come valore intermedio rispetto all'intervallo fornito

dalla normativa e dunque pari a 0.24 MPa;  $b$  è un coefficiente correttivo legato alla distribuzione degli sforzi tangenziali sulla sezione e viene assunto pari a 1. Si ottiene, pertanto, un valore della capacità tagliante della parete priva di rinforzo pari a 43 kN.

Il contributo alla resistenza fornito dal rinforzo è determinato attraverso la Equazione 5 ricavata dalle istruzioni CNR-DT 215/18 (2018):

$$V_{t,f} = 0.5 \cdot n_f \cdot t_{vf} \cdot b_f \cdot \alpha_f \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f \quad (5)$$

ove  $n_f \cdot t_{vf} \cdot b_f$  è l'area della sezione equivalente del rinforzo efficace a taglio disposto in maniera parallela alla forza di taglio;  $\alpha_f$  è un coefficiente che tiene conto della ridotta resistenza estensionale delle fibre quando sollecitate a taglio e viene assunto pari a 0.8;  $\varepsilon_{fd}$  rappresenta la deformazione massima del tessuto limitata superiormente dal corrispondente valore massimo di tensione di trazione che si attinge durante la prova di aderenza;  $E_f$  rappresenta la rigidità del tessuto secco. L'incremento di resistenza risulta pari a 50 kN, per i campioni rinforzati col sistema composito *TRM-1F*, e pari a 99 kN, per i campioni rinforzati col sistema composito *TRM-2F*. Si evince che la relazione impiegata è concepita in maniera da fornire una stima dell'incremento di resistenza che cresce linearmente con la quantità di tessuto di rinforzo impiegato.

Dall'analisi effettuata risulta una stima della resistenza dei muri rinforzati, data dalla somma dei rispettivi valori di  $V_t$  e  $V_{t,f}$ , pari a 93 kN per il sistema *SW-1F* e 143 kN per il sistema *SW-2F*. Confrontando tali valori con la resistenza teorica ottenuta per il muro non rinforzato si registra un incremento di resistenza pari al 116% con riferimento al sistema rinforzato col sistema *TRM-1F*, e del 232% con riferimento al sistema rinforzato col sistema *TRM-2F*. Confrontando tali valori con quelli ottenuti sperimentalmente, rispettivamente pari al 118% e al 136%, si evince che relativamente alla serie *SW-1F* si è registrato un incremento di resistenza in linea con quanto definito teoricamente facendo riferimento al modello suggerito in normativa. Contrariamente, tale concordanza non è verificata nel caso dei muri rinforzati col sistema *TRM-2F*, rispetto ai quali le evidenze sperimentali hanno mostrato che l'incremento di resistenza fornito dal contributo meccanico del rinforzo non cresce proporzionalmente al quantitativo di tessuto di rinforzo.

## 4 CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha come oggetto di studio l'analisi sperimentale della capacità tagliante di pannelli murari in laterizio rinforzati esternamente da sistemi compositi a malta cementizia e fibra naturale in lino, Flax-TRM. Di seguito si elencano gli aspetti più importanti derivanti da tale analisi:

- l'applicazione del sistema di rinforzo influenza significativamente la risposta meccanica dei pannelli murari conferendovi un incremento di capacità tagliante pari al 118% e al 136% rispettivamente nel caso del sistema *SW-1F* e *SW-2F*;
- la modalità di rottura dei muri rinforzati è caratterizzata dallo svilupparsi di un quadro fessurativo lungo la direzione principale di trazione, pseudo-verticale rispetto al posizionamento del muro, con una graduale rottura delle fibre senza significativi fenomeni di completo distacco all'interfaccia substrato-rinforzo TRM;
- i muri rinforzati hanno esibito una fase post-picco, completamente assente nel tipico comportamento fragile esibito dai muri privi di rinforzo, sottolineando l'efficienza del rinforzo che conferisce duttilità al sistema, aspetto, quest'ultimo, di fondamentale importanza specialmente in vista di applicazioni in campo sismico;
- i muri caratterizzati da un sistema di rinforzo *TRM-2F* hanno esibito in fase post-picco un'energia inelastica dissipata,  $E_{in}$ , più di due volte superiore rispetto allo stesso valore registrato nei campioni rinforzati dal sistema *TRM-1F*;
- dal confronto dei risultati sperimentali con i modelli adottati da norme di riferimento si è evinto che la tensione tangenziale massima in assenza di sforzo normale,  $\tau_0$ , derivante da tali modelli risulta essere significativamente inferiore rispetto ai valori registrati ricavati sperimentalmente;
- l'incremento di resistenza dovuto al rinforzo nel caso dei muri della serie *SW-1F* risulta essere in linea con quanto ricavato dal modello della normativa di riferimento; in riferimento ai provini *SW-2F*, invece, si è osservato che l'incremento di resistenza cresce in maniera meno che proporzionale rispetto all'aumento di quantitativo di rinforzo.

Lo studio, nel suo complesso, mette in luce le potenzialità nell'impiego di fibre di lino come rinforzo sottoforma di tessuto in sistemi

compositi TRM a matrice inorganica. Ulteriori studi volti ad investigare la durabilità di tali sistemi compositi potrebbero essere un'utile prospettiva di tale lavoro nella definizione di una soluzione sostenibile che contribuisca a preservare strutture in muratura.

## 5 RINGRAZIAMENTI

La borsa di dottorato del primo autore è concessa dal Ministero Italiano dell'Istruzione, Università e Ricerca (MIUR) nel quadro del programma "Dottorati Innovativi a caratterizzazione industriale" finanziato dall'Unione Europea (Structural Funding ERDF-ESF for "Research and Innovation" 2014-2020), il cui support finanziario è riconosciuto con gratitudine. Inoltre, gli autori ringraziano INNOVATION s.r.l. per aver fornito i materiali impiegati nella campagna sperimentale.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- ASTM E519-2, 2003. Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages. *ASTM Committee C15 on Manufactured Masonry Units*.
- Caggegi C., Carozzi F.G., De Santis S., Fabbronico F., Focacci F., Hojdys L., Lanoye E., Zuccarino L., 2017. Experimental analysis on tensile and bond properties of PBO and aramid fabric reinforced cementitious matrix for strengthening masonry structures, *Composites Part B*, **127**, 175-195.
- Carozzi, F.G., Bellini, A., D'Antino, T., de Felice, G., Focacci, F., Hojdys, L., Laghi, L., Lanoye, E., Micelli, F., Panizza, M., Poggi, C., 2017. Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements, *Composites Part-B*, **128**, 100-119.
- Cevallos, O.A., Olivito, R.S., 2015. Effects of fabric parameters on the tensile behaviour of sustainable cementitious composites, *Composites Part B*, **69**, 256-266.
- Codispoti, R., Oliveira, D.V., Olivito, R.S., Lourenco, P.B., Figueiro, R., 2015. Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry, *Composites Part B*, **77**, 74-83.
- CNR DT 215/2018, 2018. Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica, *CNR-Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni*.
- D'Ambrisi, A., Focacci, F., Caporale, A., 2013. Strengthening of masonry-unreinforced concrete railway bridges with PBO-FRCM materials, *Composite Structures*, **102**, 193-204.
- de Felice, G., Aiello, M.A., Bellini, A., Ceroni, F., De Santis, S., Garbin, E., Leone, M., Lignola, G.P., Malena, M., Mazzotti, C., Panizza, M., Valluzzi, M.R., 2015. Experimental characterization of composite-to-brick masonry shear bond, *Materials and Structures*, **49**, 2581-96.

- de Felice, G., Aiello, M.A., Caggegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Garbin, E., Gattesco, N., Hojdys, L., Krajewsky, P., Kwiecien, A., Leone, M., Lignola, G.P., Mazzotti, C., Oliveira, D., Papanicolau, C., Poggi, C., Triantafillou, T., Valluzzi, M.R., Viskovic, A., 2018. Recommendation of RILEM Technical Committee 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate bond characterization, *Materials and Structures*, 51:95.
- Ferrara<sup>a</sup>, G., Coppola, B., Di Maio, L., Incarnato, L., Martinelli, E., 2019. Tensile strength of flax fabrics to be used as reinforcement in cement-based composites: experimental tests under different environmental exposures, *Composites Part B*, **168**, 511-523.
- Ferrara, G., Martinelli, E., 2018. Tensile behaviour of Textile Reinforced Mortar composite systems with flax fibres, *Proc. of the 12<sup>th</sup> fib International PhD Symposium in Civil Engineering Aug 29 to 31*, Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic.
- Ferrara<sup>b</sup>, G., Pepe, M., Martinelli, E., Toledo Filho, R.D., 2019. Influence of an impregnation treatment on the morphology and mechanical behaviour of flax yarns embedded in hydraulic lime mortar, *Fibers*, **7**(4), 30.
- Ferreira, S.R., de Andreade Silva, F., Lima, P.R.L., Toledo Filho, R.D., 2017. Effect of hornification on the structure, tensile behaviour and fiber matrix bond sisal, jute and curaua fiber cement based composite systems, *Construction and Building Materials*, **139**, 155-161.
- Leone, M., Aiello, M.A., Balsamo, A., Carozzi, F.G., Ceroni, F., Corradi, M., Gams, M., Garbin, E., Gattesco, N., Krajewski, P., Mazzotti, C., Oliveira, D., Papanicolaou, C., Ranocchiai, G., Roscini, F., Saenger, D., 2017. Glass fabric reinforced cementitious matrix: Tensile properties and bond performance on masonry substrate, *Composites Part B*, **127**, 196-214.
- Lignola, G.P., Caggegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Krajewsky, P., Lourenco, P.B., Morganti, M., Papanicolaou, C., Pellegrino C., Prota, A., Zuccarino, L., 2017. Performance assessment of basalt FRCM for retrofit applications on masonry, *Composites Part B*, **128**, 1-18.
- Marcari G., Basili, M., Vestroni, F., 2017. Experimental investigation of tuff masonry panels reinforced with surface bonded basalt textile-reinforced mortar, *Composites Part B*, **108**, 131-142.
- NTC 2018. Norme tecniche per le costruzioni, *Ministero delle Infrastrutture e Trasporti della Repubblica Italiana*.
- RILEM TC-76-LUM, 1994. Diagonal tensile strength tests of small wall specimens, RILEM recommendations for the testing and use of constructions materials, 488-9.
- RILEM Technical Committee (Brameshuber, W.), 2016. Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete, *Materials and Structures*, **49**, Nr.5.
- Sagar, S.L., Singhal, V., Rai, D.C., Gudur, P., 2017. Diagonal shear and out-of-plane flexural strength of fabric-reinforced cementitious matrix-strengthened masonry wallets. *Journal of Composite Constructions*, **21**.