ASSOCIAZIONE NAZIONALE ITALIANA DI INGEGNERIA SISMICA
ANIDIS
Italian National Association of Earthquake Engineering

XVIII CONVEGNO ANIDIS
L'ingegneria sismica in Italia
ASCOLI PICENO 2019
15-19 Settembre

FRCM composites for the out-of-plane retrofitting of masonry walls

Alessandro Bellini[a], Andrea Incerti[a], Anna Rosa Tilocca[a], Marco Savoia[b]
[a] *CIRI Edilizia e Costruzioni, Università di Bologna, Via del Lazzaretto 15/5, 40131 Bologna, Italy*
[b] *DICAM, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italy*

Keywords: masonry; strengthening; out-of-plane; FRCM; capacity.

ABSTRACT
Several earthquakes occurred during the last decades have shown the seismic vulnerability of masonry buildings, typical of Italian and European built heritage. Post-earthquake damage assessment has often highlighted the weakness of masonry walls when subjected to out-of-plane actions, with a consequent partial or total collapse of the building. To this purpose, different strengthening techniques have been proposed in recent years for repairing and retrofitting masonry constructions in order to extend their service life and improve their structural safety. Among them, structural retrofitting with innovative techniques, such as those based on FRP and FRCM composites, is becoming increasingly widespread, thanks to the significant advantages of these materials with respect to the traditional ones. Despite the growing use of these innovative systems, the knowledge about FRCMs when applied on masonry structures is still quite limited, in particular if their out-of-plane behavior is concerned. In this framework, the aim of the present paper is to analyze the out-of-plane behavior of masonry walls strengthened with different types of FRCM composite materials subjected to axial force and horizontal out-of-plane actions. In order to test full-scale masonry panels, a purposely designed experimental set-up was used for evaluating their behavior under seismic actions. Experimental outcomes will be presented in terms of failure modes, maximum capacity and analyzing differences with reference to an unreinforced wall. The availability of results coming from tensile and bond tests performed on the same materials allowed also to evaluate and compare the out-of-plane capacity of masonry walls with the results of simple theoretical models. The experimental campaign, still in progress, is also aimed at obtaining useful data for the calibration of design formulas suitable for this type of strengthening system.

1 INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi decenni il territorio italiano è stato colpito da numerosi terremoti che hanno mostrato una notevole vulnerabilità delle strutture in muratura nei confronti delle azioni sismiche ed, in particolare, una manifesta sensibilità dei maschi murari alle azioni orizzontali agenti fuori dal piano della parete, con conseguenti fenomeni di collasso parziale o totale dell'edificio. In questo contesto, nell'ottica del ripristino e del rinforzo degli edifici in muratura, negli ultimi anni sono state proposte diverse tecniche basate sull'impiego di materiali compositi FRP (Fiber Reinforced Polymer) o FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix). La seconda tipologia di sistemi di rinforzo, pur garantendo prestazioni meccaniche mediamente inferiori alla prima, ha dimostrato di essere una delle soluzioni più adatte in virtù della maggiore compatibilità con il supporto, della possibilità di applicazione su superfici umide, della resistenza alle alte temperature, della permeabilità e della ridotta invasività.

Nonostante i notevoli vantaggi di tali sistemi, la conoscenza relativa al loro utilizzo risulta ancora piuttosto limitata (Papanicolaou et al. 2011, Bellini et al. 2016, 2019, 2019b, Caggegi et al. 2017, Carozzi et al. 2017, de Felice et al. 2014, De Santis et al. 2017, Leone et al. 2017, Lignola et al. 2017), in particolare se si analizza il comportamento per azioni fuori dal piano (Papanicolaou et al. 2008, Harajli et al. 2010, Babaeidarabad et al. 2014, Valluzzi et al. 2014, Bellini et al. 2016b, 2017, 2018, De Santis et al. 2016, Mordanova et al. 2016). L'obiettivo della ricerca è pertanto quello di estendere il database sperimentale relativo a prove di flessione fuori piano di elementi murari rinforzati con FRCM e di valutare l'efficacia delle formule predittive recentemente proposte (CNR-DT 215/2018, De Santis et al. 2018).

A tale scopo, è stato impiegato un set-up per l'esecuzione di prove su pareti in scala reale precedentemente validato nel corso di altre campagne sperimentali (Bellini et al. 2016b, 2017, 2018), in grado di applicare alle pareti, simultaneamente ed indipendentemente, uno sforzo assiale costante e un sistema di azioni orizzontali distribuite in direzione fuori dal piano. I sistemi di rinforzo testati comprendono FRCM composti da tessuti unidirezionali in acciaio e reti bidirezionali in fibra di vetro e basalto, caratterizzate da diverse grammature. Verrà presentata una breve analisi relativa al comportamento dei muri rinforzati testati, verificando l'efficacia dei sistemi impiegati e descrivendo modalità di crisi e aspetti peculiari emersi nel corso dei test sperimentali.

L'esecuzione di prove di caratterizzazione meccanica eseguite sui componenti e sugli stessi sistemi di rinforzo ha consentito di valutare l'estendibilità dei risultati sperimentali ricavati da campioni in piccola scala a campioni in scala reale e di ottenere così dati utili alla verifica di formule predittive presenti (CNR-DT 215/2018), nonché allo sviluppo di future formule di progetto e prescrizioni normative valide per questa categoria di materiali compositi.

2 CAMPAGNA SPERIMENTALE E SET-UP DI PROVA

2.1 Descrizione della campagna sperimentale e realizzazione dei campioni

Le prove di flessione fuori dal piano sono state condotte su cinque diverse tipologie di pareti rinforzate con FRCM, utilizzando fibre in basalto (OOP_B200, OOP_B400), vetro (OOP_G185, OOP_G315) e acciaio (OOP_S650), confrontando poi i risultati ottenuti con un muro non rinforzato di riferimento (OOP_NR), come mostrato in Tabella 1. I sistemi di rinforzo sono stati applicati su muri a due teste a tessitura gotica delle dimensioni di 1.20×0.25×2.70 m^3, realizzati impiegando mattoni pieni in laterizio e una malta di allettamento a base calce dalle basse proprietà meccaniche, in modo da simulare le ridotte prestazioni delle murature storiche oggetto di rinforzo. Tutti i campioni sono stati realizzati da manodopera specializzata in modo tale da ridurre la variabilità e ottenere campioni il più possibile omogenei. Dopo la realizzazione, la maturazione dei campioni è avvenuta in condizioni di laboratorio controllate per almeno 28 giorni, prima dell'applicazione dei sistemi di rinforzo FRCM.

2.2 Materiali impiegati e sistemi di rinforzo

Per la costruzione dei pannelli murari sono stati utilizzati mattoni pieni in laterizio realizzati per compattazione secondo un processo di fabbricazione industriale, dotati di resistenza a compressione pari a 18.66 MPa e 23.93 MPa, rispettivamente, nelle direzioni ortogonale e parallela alla faccia di allettamento e di resistenza a trazione di 3.14 MPa e 4.21 MPa lungo le stesse direzioni. L'analisi delle proprietà meccaniche è stata condotta estraendo dei cilindri di diametro e altezza pari a 50 mm testati sia a compressione che a trazione indiretta (Sassoni et al. 2017). Le proprietà meccaniche della malta di allettamento (NHL_{all}) sono invece state determinate in accordo con il metodo di prova indicato nella norma (EN 1015-11, 2007). Lo stesso metodo è stato utilizzando anche per la determinazione delle proprietà meccaniche delle matrici dei sistemi di rinforzo, come suggerito dalla recente Linea Guida italiana (Linea Guida FRCM, 2018). Le malte utilizzate sono due malte a base calce (NHL1, NHL2) e una malta cementizia (CEM1) specifiche per il rinforzo strutturale, dotate delle caratteristiche meccaniche (resistenza a compressione f_c, resistenza a trazione per flessione f_t e modulo elastico E) riportate in Tabella 2.

Tabella 1. Programma sperimentale.

Campione	Rinforzo	Tipologia / layout	Matrice
OOP_NR	-	-	-
OOP_B200	Basalto	Rete / continuo	NHL1
OOP_B400	Basalto	Rete / continuo	NHL1
OOP_G185	Vetro	Rete / continuo	CEM1
OOP_G315	Vetro	Rete / continuo	NHL2
OOP_S650	Acciaio	Tessuto / a fasce	NHL1

Tabella 2. Proprietà meccaniche delle malte impiegate

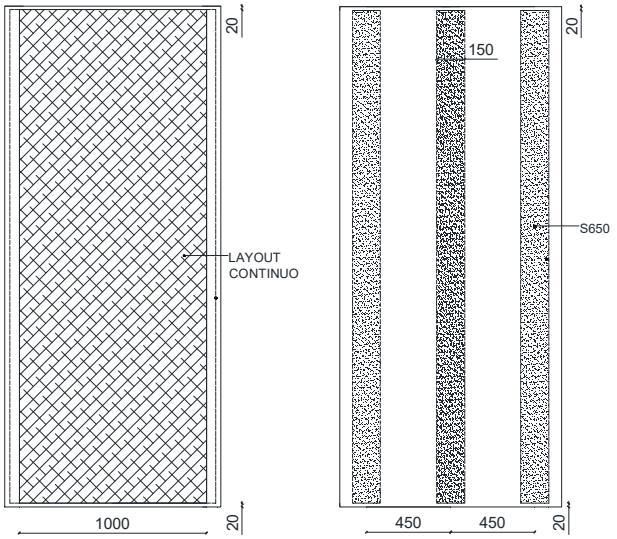
Malta	f_c (MPa)	f_t (MPa)	E (GPa)
NHL_{all}	1.51	0.51	3.15
NHL1	20.44	5.75	10.44
NHL2	11.12	3.59	9.27
CEM1	21.19	6.74	11.10

Le proprietà meccaniche delle fibre di rinforzo sono invece indicate in Tabella 3, in cui i valori riportati di resistenza a trazione $\sigma_{u,f}$ e del modulo elastico E_f sono stati determinati mediante prove di trazione sulla fibra secca, in accordo a quanto previsto dall'attuale Linea Guida (Linea Guida FRCM, 2018).

Tabella 3. Proprietà meccaniche delle fibre di rinforzo

Rinforzo	Grammatura (g/m^2)	Spessore eq. (mm)	$\sigma_{u,f}$ (MPa)	E_f (GPa)
B200	144	0.027	1505	80
B400	264	0.049	1415	80
G185	150	0.028	1190	68
G315	255	0.048	1209	70
S650	650	0.083	2806	200

L'applicazione dei rinforzi sulle pareti è stata realizzata dopo una preventiva pulizia, spazzolatura e bagnatura della superficie senza ulteriori specifici trattamenti superficiali del supporto. I rinforzi FRCM basati su reti bidirezionali in basalto e vetro sono stati applicati secondo un layout continuo (Tabella 1) per una larghezza complessiva pari ad 1 m, senza adottare alcuna sovrapposizione della rete di rinforzo. L'applicazione del rinforzo in fibra di acciaio ha visto invece l'impiego tre fasce della larghezza di 150 mm ciascuna (Figura 1). Lo spessore complessivo adottato per i sistemi di rinforzo è pari a 10 mm, ad eccezione del sistema G315, caratterizzato da uno spessore maggiore (30 mm).



a) b)

Figura 1. Layout dei sistemi di rinforzo.

2.3 Set-up di prova

La valutazione della capacità dei muri rinforzati con materiali compositi FRCM sottoposti ad azioni orizzontali fuori dal piano è stata condotta adottando un set-up sperimentale già validato durante precedenti campagne sperimentali (Bellini et al. 2016b, 2017, 2018), in grado di applicare uno sforzo assiale verticale costante e azioni orizzontali distribuite sulla parete (Figura 2). Lo schema statico adottato è a doppia cerniera, realizzato mediante un sistema di vincoli composto da due bielle connesse al muro di contrasto in sommità e da un elemento a cerniera connesso allo strong floor in basso.

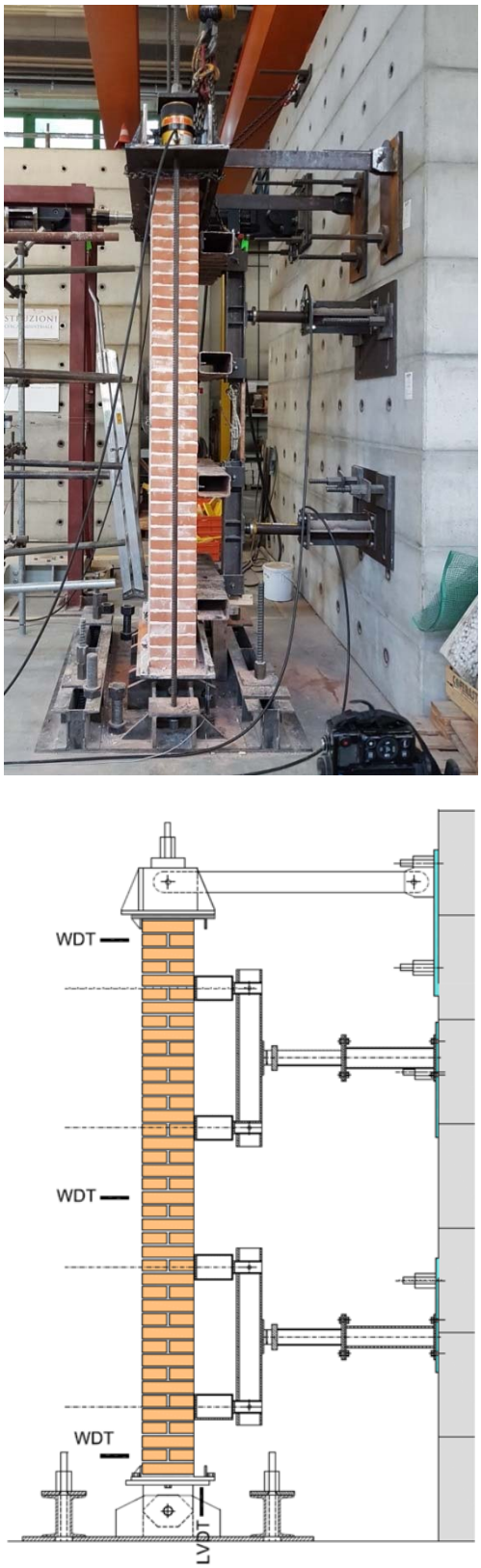


Figura 2. Set-up sperimentale.

Le forze orizzontali sono state applicate mediante un sistema composto da due attuatori idraulici e da due ripartitori, ottenendo perciò un

totale di quattro forze di uguale entità distribuite lungo il piano del pannello, capaci di generare una distribuzione di momento flettente molto simile a quella prodotta da un carico uniformemente distribuito. Lo sforzo assiale applicato (pari a 0.2 MPa), molto simile a quello riscontrabile in situ su edifici rurali tipici della Regione Emilia Romagna, è stato mantenuto costante durante l'esecuzione della prova per mezzo di un sistema chiuso composto da due attuatori idraulici posizionati in sommità e agenti su due barre Dywidag connesse al sistema a cerniera inferiore.

L'analisi del comportamento delle pareti rinforzate, in termini di curve momento-freccia, è stato possibile grazie all'impiego di trasduttori di pressione posizionati sugli attuatori idraulici, di strumenti a filo (WDT) e di trasduttori di spostamento (LVDT). Più in dettaglio, le forze orizzontali e verticali sono state applicate per mezzo di due sistemi idraulici indipendenti composti da diversi circuiti, pompe idrauliche e trasduttori di pressione. La freccia del pannello murario durante la prova è stata valutata istante per istante grazie al posizionamento di trasduttori di spostamento a filo alle diverse quote (in alto, in basso, in mezzeria) e di trasduttori LVDT per la misura della rotazione delle cerniere.

3 RISULTATI SPERIMENTALI

In questo paragrafo vengono riportati e analizzati i risultati ottenuti nel corso delle prove sperimentali. Le modalità di rottura riscontrate sono mostrate in Figura 3 per ciascun muro testato e riassunte in Tabella 4, insieme ai momenti massimi registrati e all'incremento rispetto al muro non rinforzato di riferimento.

La crisi del campione non rinforzato è sopraggiunta per attivazione di un meccanismo classico a due blocchi rigidi con la formazione della terza cerniera nella parte centrale del campione stesso (Modalità A). La modalità di rottura dei campioni rinforzati con reti in basalto, vetro e tessuto in acciaio è risultata la medesima, con rottura finale della fibra in corrispondenza di una delle fessure originatesi durante la prova nella parte centrale del campione soggetta a momento flettente costante e massimo (Modalità B). Unica eccezione il campione rinforzato con rete in fibra di vetro G315, in cui il collasso è avvenuto per rottura a taglio della parete in sommità (Modalità C).

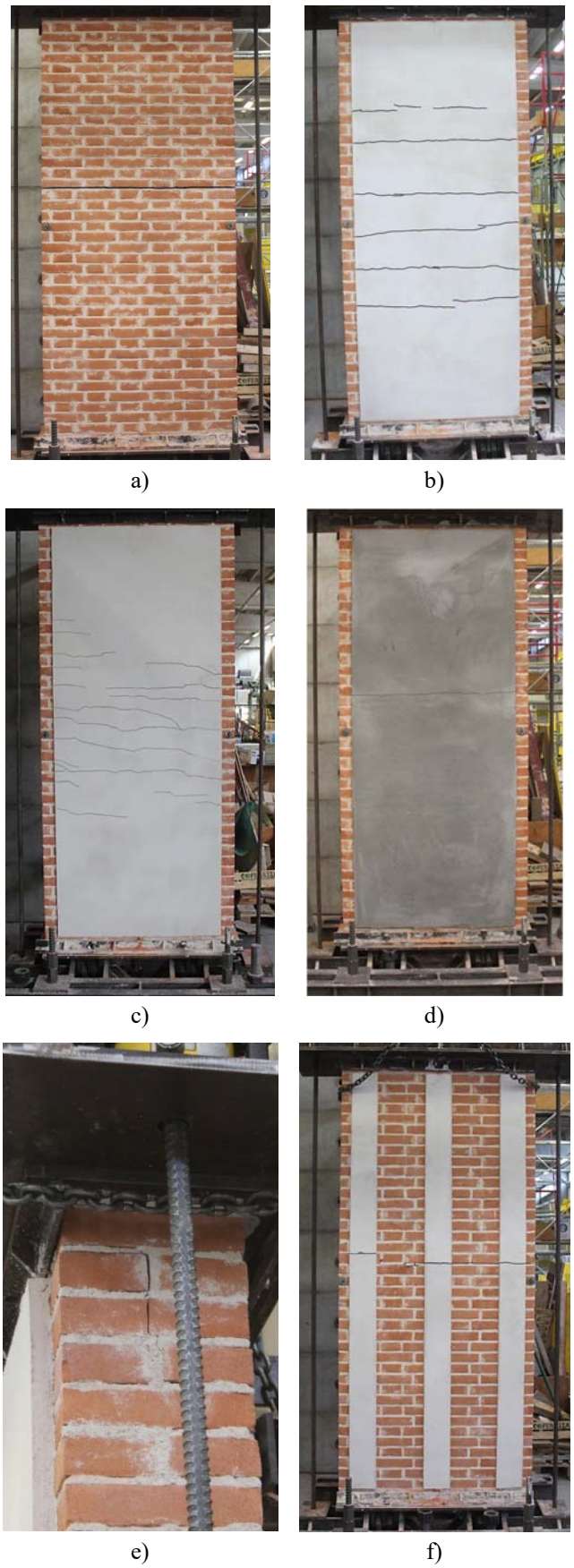


Figura 3. Modalità di rottura individuate: a) OOP_NR; b) OOP_B200; c) OOP_B400: d) OOP_G185; e) OOP_G315; f) OOP_S650.

La fessurazione, per tutti i campioni testati, si è originata inizialmente in mezzeria del campione e poi si è via via propagata verso le estremità, con un quadro diverso a seconda della tipologia di rinforzo: più diffuso per le reti in basalto e in vetro a maglia stretta (B200, B400, G185) e per l'acciaio (S650), meno diffuso per il sistema in fibra di vetro G315, caratterizzato da una rete con maglia di ampiezza maggiore e da uno spessore sensibilmente maggiore della matrice.

I risultati riportati in Tabella 4, in termini di momento flettente massimo, mostrano notevoli aumenti di capacità, variabili da un minimo del 31.7% per il sistema in fibra di basalto B200 ad un massimo del 152.3% per il sistema in acciaio S650.

Il comportamento dei campioni, in termini di diagrammi momento-freccia, viene mostrato in Figura 4, dove si evidenzia un tipico comportamento bilineare, con una prima fase più rigida dove il rinforzo è in fase non fessurata, una perdita di linearità in corrispondenza dell'inizio della fase di fessurazione e un secondo ramo a pendenza ridotta che termina al sopraggiungere della crisi del campione, che si origina in tutti i casi, ad eccezione del sistema G315, per rottura a trazione della rete o del tessuto di rinforzo, senza che si siano manifestati preventivamente significativi distacchi del rinforzo dal substrato o tra rete e matrice. Come evidenziato in altri studi sperimentali sul tema (Bellini et al. 2016b, 2017, 2018), va notato come il quadro fessurativo che si origina durante il corso della prova abbia origine principalmente in corrispondenza dei letti di malta del substrato in muratura, per poi diffondersi all'interno del sistema FRCM e attenuarsi grazie alla capacità redistributiva data dalla rete di rinforzo.

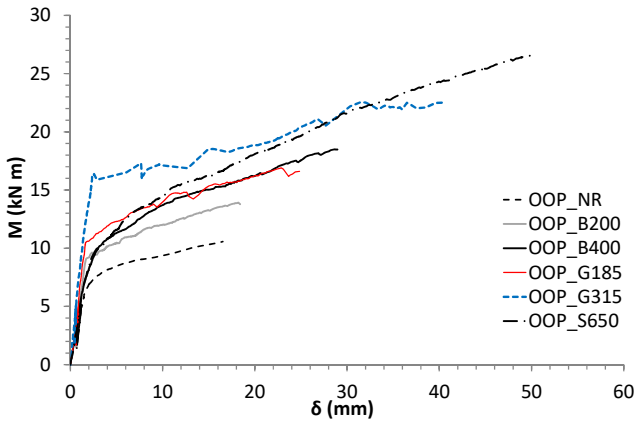


Figura 4. Diagrammi momento-freccia.

Tabella 4. Risultati delle prove di flessione fuori piano.

Campione	Modalità di rottura	$M_{max,sperimentale}$ (kN m)	Differenza (%)
OOP_NR	A	10.57	-
OOP_B200	B	13.92	+31.7
OOP_B400	B	18.49	+74.9
OOP_G185	B	16.90	+59.9
OOP_G315	C	22.52	+113.1
OOP_S650	B	26.67	+152.3

4 VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ: CONFRONTO CON FORMULE PREDITTIVE

La valutazione della capacità di muri rinforzati con materiali compositi FRCM può essere condotta secondo diverse modalità espresse in ricerche scientifiche e Linee Guida italiane ed internazionali (De Santis et al. 2018, CNR-DT 215/2018, ACI 549.4R-13, Linea Guida FRCM, 2018). Le formule predittive indicate, basate sulla formulazione classica della flessione fuori dal piano per un elemento in muratura rinforzato con elementi resistenti a trazione, hanno sostanzialmente una forma comune e differiscono essenzialmente per la metodologia adottata per le prove di caratterizzazione meccanica dei materiali.

La Linea Guida ACI 549.4R-13 propone una metodologia basata sul processo di qualificazione indicato all'interno della AC434 (AC 434, 2016) con alcune limitazioni per il calcolo e la progettazione.

Le Istruzioni CNR-DT 215/2018, invece, si basano sull'approccio classico adottato in ambito italiano ed europeo, che è incentrato sull'esecuzione di prove di trazione e aderenza su campioni in piccola scala da cui ottenere i parametri sperimentali e di qualifica necessari all'implementazione delle formule predittive proposte (Linea Guida FRCM, 2018). La valutazione della capacità riportata nel seguito si riferisce a questo secondo approccio.

In accordo con (Ascione et al. 2015, Linea Guida FRCM, 2018), l'esecuzione di prove di trazione su fibra secca permette di determinare la tensione ultima $\sigma_{u,f}$, il modulo elastico del tessuto secco E_f e la deformazione ultima a trazione $\varepsilon_{u,f}$, mentre la prova di aderenza consente di determinare la tensione limite convenzionale $\sigma_{lim,conv}$, intesa qui come valore medio. I risultati ottenuti eseguendo le prove di distacco dal supporto in accordo con l'attuale Linea Guida (Linea Guida FRCM, 2018) sono indicati in Tabella 5. A partire dalla tensione limite convenzionale $\sigma_{lim,conv}$ e noto il valore del modulo elastico del tessuto secco E_f, è possibile

calcolare la deformazione limite convenzionale $\varepsilon_{lim,conv}$, espressa come:

$$\varepsilon_{\mathrm{lim},conv} = \frac{\sigma_{\mathrm{lim},conv}}{E_f} \quad (1)$$

Nelle verifiche governate da fenomeni di distacco intermedio, come nel caso delle prove di flessione fuori piano condotte nel corso della presente campagna sperimentale, è necessario impiegare un valore maggiorato della deformazione limite convenzionale, pari a:

$$\varepsilon^{(\alpha)}_{\mathrm{lim},conv} = \alpha \cdot \varepsilon_{\mathrm{lim},conv} \quad (2)$$

adottando un valore pari ad $\alpha = 1.5$.
La corrispondente tensione agente sul sistema di rinforzo è quindi valutata come:

$$\sigma^{(\alpha)}_{\mathrm{lim},conv} = E_f \cdot \varepsilon^{(\alpha)}_{\mathrm{lim},conv} \quad (3)$$

con la limitazione $\sigma^{(\alpha)}_{\mathrm{lim},conv} \le \sigma_u$ (Tabella 5).

Tabella 5. Parametri necessari all'implementazione delle formule predittive.

Rinforzo	$\sigma_{lim,conv}$ (MPa)	$\varepsilon_{lim,conv}$ (-)	$\sigma^{(\alpha)}_{lim,conv}$ ($\le \sigma_u$) (MPa)
B200	1190	0.0149	1505
B400	1090	0.0136	1415
G185	1170	0.0172	1190
G315	1085	0.0155	1209
S650	2429	0.0121	2806

Noti i valori dei parametri sperimentali richiesti per l'implementazione delle formule predittive, nell'ipotesi di rottura per crisi del rinforzo, è possibile calcolare la posizione dell'asse neutro x e il momento resistente M_R in accordo con (De Santis et al. 2018, CNR-DT 215/2018) secondo le formule seguenti:

$$x = \frac{w_f \cdot n_f \cdot t_f \cdot E_f \cdot \varepsilon^{(\alpha)}_{\mathrm{lim,conv}} + N}{\beta \cdot \gamma \cdot f_{mu} \cdot L} \quad (4)$$

$$M_R = L \cdot \beta \cdot \gamma \cdot f_{mu} \cdot x \cdot \frac{t - \beta \cdot x}{2} + w_f \cdot n_f \cdot t_f \cdot E_f \cdot \varepsilon^{(\alpha)}_{\mathrm{lim},conv} \cdot \frac{t}{2} \quad (5)$$

dove w_f, n_f, t_f ed E_f indicano rispettivamente la larghezza, il numero di strati, lo spessore equivalente e il modulo elastico del rinforzo, N lo sforzo assiale agente, f_{mu} la resistenza a compressione ultima della muratura, L e t rispettivamente la larghezza e lo spessore del muro rinforzato.

I risultati così ottenuti sono riportati in Tabella 6, dove viene mostrato un confronto tra i valori sperimentali e quelli forniti dalle formule predittive. Come si può osservare, i valori risultano comparabili per l'acciaio e a favore di sicurezza per il vetro (con una lieve sottostima), mentre risultano non cautelativi per i rinforzi in fibra di basalto.

Occorre tuttavia aggiungere che l'implementazione della condizione aggiuntiva espressa nelle Istruzioni CNR-DT 215/2018:

$$M_{Rd} = M_{0d} + 0.5 \cdot \left(M_{1d} - M_{0d} \right) \quad (6)$$

essendo M_{0d} il momento resistente della parete non rinforzata e M_{1d} quello della parete rinforzata, garantisce comunque un margine di sicurezza in fase di progettazione.

Tabella 6. Valutazione della capacità: formule predittive a confronto con risultati sperimentali.

Campione	$M_{max,sperimentale}$ (kN m)	$M_{teorico}$ (kN m)	Differenza (%)
OOP_B200	13.92	16.90	+21.4
OOP_B400	18.49	23.58	+27.5
OOP_G185	16.90	15.18	-10.2
OOP_G315	22.52	20.97	-6.9
OOP_S650	26.67	26.09	-2.2

5 CONCLUSIONI

Lo studio sperimentale condotto su pareti in muratura di laterizio rinforzate con diverse tipologie di materiali compositi FRCM sollecitate da azioni orizzontali fuori dal piano ha mostrato in generale l'ottima efficacia dei sistemi di rinforzo testati, con modalità di crisi simili, tutte riconducibili alla rottura a trazione della fibra in corrispondenza di una sezione caratterizzata dal massimo valore di momento flettente e localizzata nella parte centrale della parete, senza prematuri distacchi del sistema di rinforzo.

Unica eccezione il rinforzo in fibra di vetro a maglia larga e con spessore della matrice maggiore (G315), dove si è verificata una rottura a taglio della parete in sommità, prima di raggiungere la massima capacità a trazione del sistema di rinforzo.

Il comportamento dei muri rinforzati, in termini di diagrammi momento-freccia, ha

mostrato un andamento peculiare, con un tipico comportamento bilineare: un primo ramo elastico lineare con il rinforzo ancora in fase non fessurata, una evidente perdita di linearità in corrispondenza dell'inizio della fase di fessurazione e infine un secondo ramo pressoché lineare a pendenza ridotta rispetto al ramo iniziale, che termina con la crisi del rinforzo.

I momenti massimi registrati, se confrontati con il campione non rinforzato di riferimento, hanno mostrato incrementi rilevanti, quantificabili da un minimo del 31% ad un massimo del 152%, confermando l'efficacia dei sistemi di rinforzo FRCM testati.

La valutazione della capacità delle pareti rinforzate è stata condotta confrontando le formule predittive proposte dalle recenti Istruzioni e Linee Guida italiane (CNR-DT 215/2018) con i risultati sperimentali, dopo aver caratterizzato meccanicamente i sistemi di rinforzo seguendo le indicazioni delle Linee Guida di Qualificazione (Linea Guida FRCM, 2018). Il confronto tra formule predittive e valori sperimentali ha mostrato come la capacità, determinata analiticamente, risulti piuttosto simile o leggermente a favore di sicurezza per i rinforzi FRCM in fibra di vetro e acciaio. La stessa metodologia di qualifica e le stesse formule applicate ai rinforzi in fibra di basalto, invece, hanno portato ad una sovrastima della reale capacità a flessione delle pareti rinforzate con questa tipologia di FRCM. A tal fine, sono in corso ulteriori prove per la valutazione della capacità dei muri rinforzati mediante l'impiego di diverse fibre in basalto a uno o più strati di rinforzo.

L'esteso database di prove di caratterizzazione meccanica, eseguite sia sui componenti dei sistemi di rinforzo sia sul sistema FRCM stesso (prove di trazione e di aderenza sull'intero pacchetto), ha consentito di valutare compiutamente l'attendibilità dei dati sperimentali ricavati da campioni in piccola scala quando riportati a campioni in scala reale. È stato così possibile ottenere dati utili alla verifica di formule predittive già presenti e all'eventuale calibrazione di future formule modificate di progetto . In questa ottica, le formule proposte e già presenti nelle Istruzioni CNR-DT 215/2018 sembrano adeguate e capaci di previsioni accurate per la quasi totalità dei sistemi di rinforzo testati, ma si segnala la necessità di ottenere ulteriori dati sperimentali per ampliare il database a disposizione per quanto riguarda i rinforzi FRCM in fibra di basalto.

REFERENCES

AC 434, 2016. Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fiber-reinforced cementitious matrix (FRCM) and steel reinforced grout (SRG) composite systems, *ICC-Evaluation Service*, Whittier, CA, USA.

ACI 549.4R-13, 2013. Guide to design and construction of externally bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for repair and strengthening concrete and masonry structures, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI, USA.

Ascione, L., de Felice, G., De Santis, S., 2015. A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems, *Compos Part B* **78**, 497-506.

Babaeidarabad, S., De Caso, F., Nanni, A., 2014. Out-of-plane behavior of URM walls strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite*, J Compos Constr* **18**(4), DOI 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000457.

Bellini, A., Mazzotti, C., 2016. Bond behavior and tensile properties of FRCM composites applied on masonry panels. *10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions.* 13-15 September, Leuven, Belgium.

Bellini, A., Incerti, A., Mazzotti, C., 2016b. Out-of-plane behavior of masonry walls strengthened by FRCM composites. *10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions.* 13-15 September, Leuven, Belgium.

Bellini, A., Incerti, A., Mazzotti, C., 2017. Out-of-plane strengthening of masonry walls with FRCM composite materials, *Key Engineering Materials* **747**, 158-165.

Bellini, A., Incerti, A., Bovo, M., Mazzotti, C., 2018. Effectiveness of FRCM reinforcement applied to masonry walls subject to axial force and out-of-plane loads evaluated by experimental and numerical studies, *International Journal of Architectural Heritage* **12**(3), 376-394.

Bellini, A., Bovo, M., Mazzotti, C., 2019. Experimental and numerical evaluation of fiber-matrix interface behaviour of different FRCM systems, *Compos Part B* **161**, 411-426.

Bellini, A., Kahangi Shahreza, S., Mazzotti, C., 2019b. Cyclic bond behavior of FRCM composites applied on masonry substrate, *Compos Part B* **169**, 189-199.

Caggegi, C., Carozzi, F.G., De Santis, S., Fabbrocino, 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, *Compos 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, *Compos Part B* **128**, 100-119.

CNR-DT 215/2018, 2019. Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica, *Consiglio Nazionale delle Ricerche*, Roma.

de Felice, G., De Santis, S., Garmendia, L., Ghiassi, B., Larringa, P., Lourenço, P.B., Oliveira, D.V., Paolacci, F., Papanicolau, C.G., 2014. Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry, *Mater Struct* **47**(12), 2021-2037.

De Santis, S., Casadei, P., De Canio, G., de Felice, G., Malena, M., Mongelli, M., Roselli, I., 2016. Seismic performance of masonry walls retrofitted with steel reinforced grout, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **54**(2), 229-251.

De Santis, S., Ceroni, F., de Felice, G., Fagone, M., Ghiassi, B., Kwiecień, A., Lignola, G.P., Morganti, M., Santandrea, M., Valluzzi, M., Viskovic, A, 2017. Round Robin Test on tensile and bond behavior of Steel Reinforced Grout systems, *Compos Part B* **127**, 100-120.

De Santis, S., Bellini, A., de Felice, G., Mazzotti, C., Meriggi, P., 2018. Design of the out-of-plane strengthening of masonry walls with textile reinforced mortar composites. *9th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering - CICE 2018.* 17-19 July, Paris, France.

EN 1015-11, 2007. Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.

Harajli, M., ElKhatib, H., Tomas San-Jose, J., 2010. Static and cyclic out-of-plane response of masonry walls strengthened using textile-mortar system, *J Mater Civil Eng* **22**, 1171-1180.

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, *Compos Part B* **127**, 196-214.

Lignola, G.P., Caggegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Krajewski, P., Lourenço, P.B., Morganti, M., Papanicolaou, C., Pellegrino, C., Prota, A., Zuccarino, L., 2017. Performance assessment of Basalt FRCM for retrofit applications on masonry, *Compos Part B* **128**, 1-18.

Linea guida per la identificazione, la qualificazione e il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti, 2018, *Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici*, Roma.

Mordanova, A., De Santis, S., de Felice, G., 2016. State-of-the-art review of out-of-plane strengthening of masonry walls with mortar-based composites. *10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions.* 13-15 September, Leuven, Belgium.

Papanicolaou, C.G., Triantafillou, T.C., Papathanasiou, M., Karlos, K., 2008. Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading, *Mater Struct* **41**, 143-157.

Papanicolaou, C.G., Triantafillou, T.C., Lekka, M., 2011. Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels, *Construction and Building Materials* **25** (2), 504-515.

Sassoni, E., Andreotti, S., Bellini, A., Mazzanti, B., Bignozzi M.C., Mazzotti, C., Franzoni E., 2017. Influence of mechanical properties, anisotropy, surface roughness and porosity of brick on FRP debonding force, *Compos Part B* **108**, 257-269.

Valluzzi, M.R., Da Porto, F., Garbin, E., Panizza, M., 2014. Out-of-plane behavior of infill masonry panels strengthened with composite materials", *Materials and Structures* **47**(12), 2131-2145.