

COMPORTAMENTO SPERIMENTALE DI MURATURA DI TUFO RINFORZATA CON FRG A BASE DI ECOPOZZOLANA

A. BALSAMO¹, A. PROTA¹, I. IOVINELLA¹; G. MORANDINI²

¹ Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università Federico II di Napoli

² Mapei S.p.A. Milano

SOMMARIO

Le tematiche connesse alla conservazione, al consolidamento ed alla mitigazione della vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio di interesse storico-monumentale, così diffusamente presente in Italia, sono oggetto di crescente interesse presso la comunità scientifica. In tale ambito le necessità del restauro “sostenibile” anche finalizzato alla correzione delle carenze costruttive e delle caratteristiche intrinseche della muratura stessa, generano l'esigenza di studiare materiali e tecnologie innovative di rinforzo strutturale che siano meglio compatibili con le caratteristiche fisico-meccaniche della muratura e con la sua intrinseca durabilità. I recenti sviluppi del sistema normativo nel nostro paese con l'adozione delle Norme Tecniche per le Costruzioni e la recente Direttiva del P.C.M. per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, prevedono, tra l'altro, anche la possibilità di interventi con materiali innovativi per fronteggiare eventuali carenze che dovessero emergere dalla valutazione della struttura. Tra essi è prevista anche la tecnica di rinforzo basata sull'utilizzo di materiali compositi. Tali materiali offrono una serie di vantaggi (elevate prestazioni meccaniche, basso impatto architettonico, alta durabilità, facilità di applicazione e reversibilità degli interventi) rilevanti in presenza di un patrimonio edilizio di carattere storico-monumentale. La loro applicazione consente di sopperire alla carenza di resistenza a trazione delle murature e di conferire maggiore duttilità al comportamento globale delle strutture. In questo ambito si colloca il sistema di consolidamento tecnologicamente innovativo con materiali compositi a matrice inorganica sviluppato dalla Mapei S.p.A., esso prevede l'applicazione di materiali compositi a matrice inorganica ed è costituito da una rete a maglia quadrata in fibra di vetro alcali-resistente (A.R.) pre-apprettata, posta in opera mediante una malta premiscelata bicomponente ad elevata duttilità a base di calce idraulica (NHL) ed Eco-Pozzolana. Nell'articolo sono illustrati le modalità applicative del sistema di rinforzo e presentati i risultati di una campagna sperimentale di prova condotta su un numero di 4 campioni costituiti da pannelli in muratura di tufo giallo napoletano sottoposti a prove di compressione diagonale. Dei quattro campioni, ciascuno di dimensione 1000x1000x250 mm, due sono stati testati senza alcun rinforzo e due sono stati testati previa applicazione del sistema di rinforzo. Le prove, condotte in controllo di spostamento, sono state precedute da vari test per la caratterizzazione dei materiali utilizzati per il confezionamento dei pannelli di prova: il tufo giallo, la malta di allettamento ed il sistema composito di rinforzo. I risultati dei test discussi nel presente articolo, indicano che il sistema di rinforzo presenta notevoli benefici in termini di incremento della resistenza a taglio e della duttilità godendo di diffusa capacità ridistributiva in grado di limitare comportamenti post-picco estremamente fragili per l'elemento rinforzato e ciò con significativi vantaggi in caso di evento sismico.

1. INTRODUZIONE

L'area mediterranea è ricca di edifici di grande interesse storico e monumentale realizzati in muratura di tufo la cui edificazione è avvenuta in un ampio periodo che abbraccia circa 2000 anni estendendosi dall'epoca romana fino alla metà del secolo scorso. La presenza di manufatti di epoche costruttive così differenti fa sì che nello stessa area siano presenti

edifici realizzati con tecniche e materiali sensibilmente diversi conferendo al patrimonio edilizio italiano una straordinaria varietà. Tuttavia spesso questi edifici versano in cattive condizioni di conservazione a causa di fenomeni di degrado ed errori di progettazione. Inoltre essi hanno subito vari eventi sismici e spesso sono stati sottoposti a restauri ed ampliamenti ben più calamitosi di qualsiasi evento naturale. Il rinforzo sismico delle strutture in muratura è stato eseguito in passato con varie tecniche e con risultati alterni. Le maggiori difficoltà sono imputabili al particolare comportamento della muratura come materiale costruttivo e, in relazione ai temi moderni, alla scarsa conoscenza che di esso si ha in un periodo storico dominato dal calcestruzzo. Tali difficoltà sono ancora maggiori se gli edifici oggetto del rinforzo sono sottoposti a vincolo da parte di enti preposti al controllo e alla salvaguardia dei beni storici e monumentali. In tal caso infatti la scelta dei materiali e delle tecniche di rinforzo si riduce ulteriormente, dovendo, quelli utilizzati per il rinforzo, possedere determinate caratteristiche. Come esempio basti pensare alla impossibilità di utilizzare, per tali rinforzi, prodotti a base cementizia che risultano storicamente e chimicamente incompatibili con i materiali a base di calce degli edifici originari. Una tecnologia di recente implementata prevede l'utilizzo di materiali compositi ovvero di materiali costituiti dall'unione di una struttura in fibre ad alta ed altissima resistenza ed una matrice in resina epossidica (FRP) o malta (FRG). Tali materiali, soprattutto nella variante realizzata con malte, sono stati spesso utilizzati anche per il rinforzo degli edifici in muratura con ottimi risultati ([1]; [2]).

Lo sviluppo recente di materiali compositi in cui la matrice è costituita da malta a base di pozzolane ecocompatibili ha permesso di poter utilizzare tali materiali anche in relazione ad edifici sottoposti a vincolo.

L'efficacia di tali malte in relazione ad edifici in muratura di tufo è stata valutata attraverso una campagna sperimentale nella quale una serie di 45 muretti in tufo giallo napoletano sono stati testati con prove di compressione diagonale presso il dipartimento di Ingegneria Strutturale di Napoli. Tre dei quattro muretti confezionati sono stati rinforzati con malte ecocompatibili e rete in fibra di vetro mentre i restanti due sono stati testati senza alcun rinforzo. I risultati delle prove, in termini di resistenza e duttilità vengono discussi nel presente lavoro.

2. PROGRAMMA SPERIMENTALE

Il programma sperimentale prevede 4 test di compressione diagonale su altrettanti pannelli in tufo giallo napoletano di dimensione 1000x1000x250 mm confezionati con malta pozzolanica. Ciascun pannello è stato realizzato con l'utilizzo di 12 blocchi di tufo ciascuno di dimensione (360mm x 250mm x 115 mm) disposti secondo 8 file parallele come mostrato in Figura 1. La tessitura muraria adottata nella costruzione dei pannelli è di tipo compatta ad una testa, con giunti di malta grossolanamente regolari di spessore variabile tra i 10 e i 15 mm al fine di assorbire la non costanza delle misure delle pietre di tufo. Per agevolarne la movimentazione, i pannelli sono stati poggiati su appositi profilati metallici.

I quattro pannelli sono stati testati in due diverse configurazioni; un primo set di prove è stato eseguito su due muretti non rinforzati al fine di ottenere un riferimento rispetto al quale confrontare il comportamento dei campioni rinforzati, un secondo set di prove è stato eseguito su due campioni rinforzati con eco pozzolana e rete in fibra di vetro di maglia quadrata di dimensione 25x25 mm.

In Tabella 1 è riportato per ciascun campione confezionato la diversa configurazione.

CAMPIONE	RETE
P1	-
P2	-
PR_G1	VETRO
PR_G2	VETRO

Tabella 1. Definizione e nomenclatura dei test eseguiti

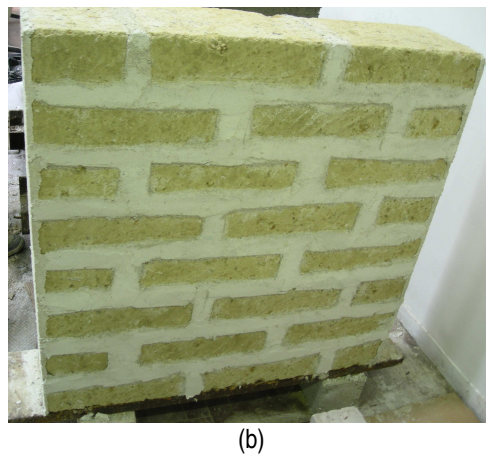
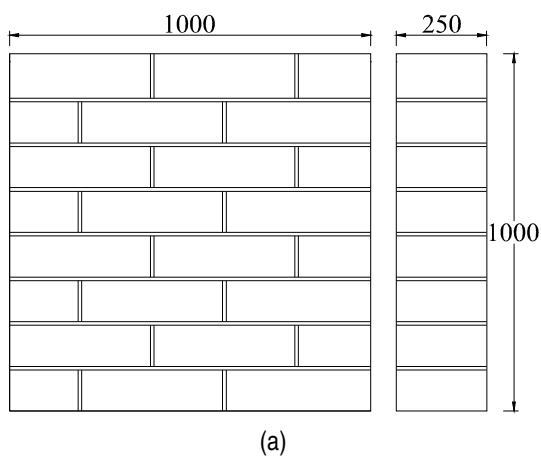


Figura 1. Schema dei muretti confezionati

Il rinforzo è stato eseguito, come illustrato in Figura 2, applicando un primo strato di malta fibrorinforzata dello spessore di circa 6 mm (a), la rete in vetro ed un secondo strato di malta dello spessore di circa 6 mm.

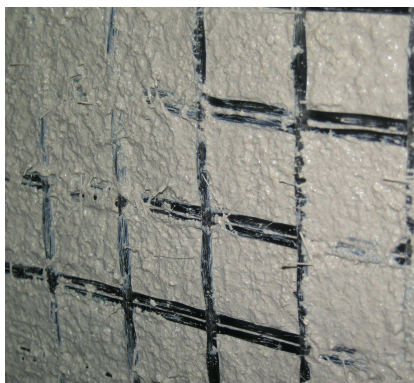


Figura 2. Fasi esecutive del rinforzo

2.1. Caratterizzazione dei materiali

A monte dei test principali eseguiti sui manufatti in tufo una serie di prove di laboratorio sono state eseguite per testare il tufo con il quale sono stati realizzati i muretti, la malta utilizzata per l'allettamento degli stessi e la malta utilizzata per il rinforzo in FRG.

Per determinare le caratterizzazione del tufo sono stati confezionati una serie di campioni tagliando con una lama metallica pietre di tufo di dimensioni 370x250x115 mm. Da tale operazione sono stati ottenuti otto campioni di dimensione 360x60x90 mm che, testati secondo lo schema three point bending mostrato in Figura 3b, hanno fornito una resistenza a flessione di 3.45 MPa. Inoltre altri 6 cubetti in tufo di lato 60 mm hanno fornito, in seguito alla prova di compressione eseguita come mostrato in Figura 3a un valore della pressione di schiacciamento pari a 4.0 MPa.

La malta per la realizzazione dei giunti è stata appositamente confezionata per riprodurre le caratteristiche meccaniche delle malte a base di pozzolana impiegate nel costruito storico dell'area campana. Le sue caratteristiche sono state accertate grazie a prove su 4 elementi prismatici di dimensioni 40x40x1600 mm che in seguito alle 4 prove di flessione e alle 8 prove

di compressione, eseguite sulle metà risultanti, hanno fornito una resistenza a compressione pari a 3.72 MPa ed una resistenza a flessione di 1.3 MPa. Le medesime prove sono state eseguite sulla malta utilizzata per il rinforzo fornendo un valore della resistenza a compressione pari a 16 MPa ,della resistenza flessione pari a 8 MPa ed un valore del modulo elastico pari a 8000 MPa.

Tale malta a base di calce ed eco pozzolana rinforzata con l'aggiunta di fibre di vetro, viene prodotta e commercializzata dalla Mapei S.p.A. come Planitop HDM Restauro, ed è appositamente studiata per applicazioni a strutture murarie.

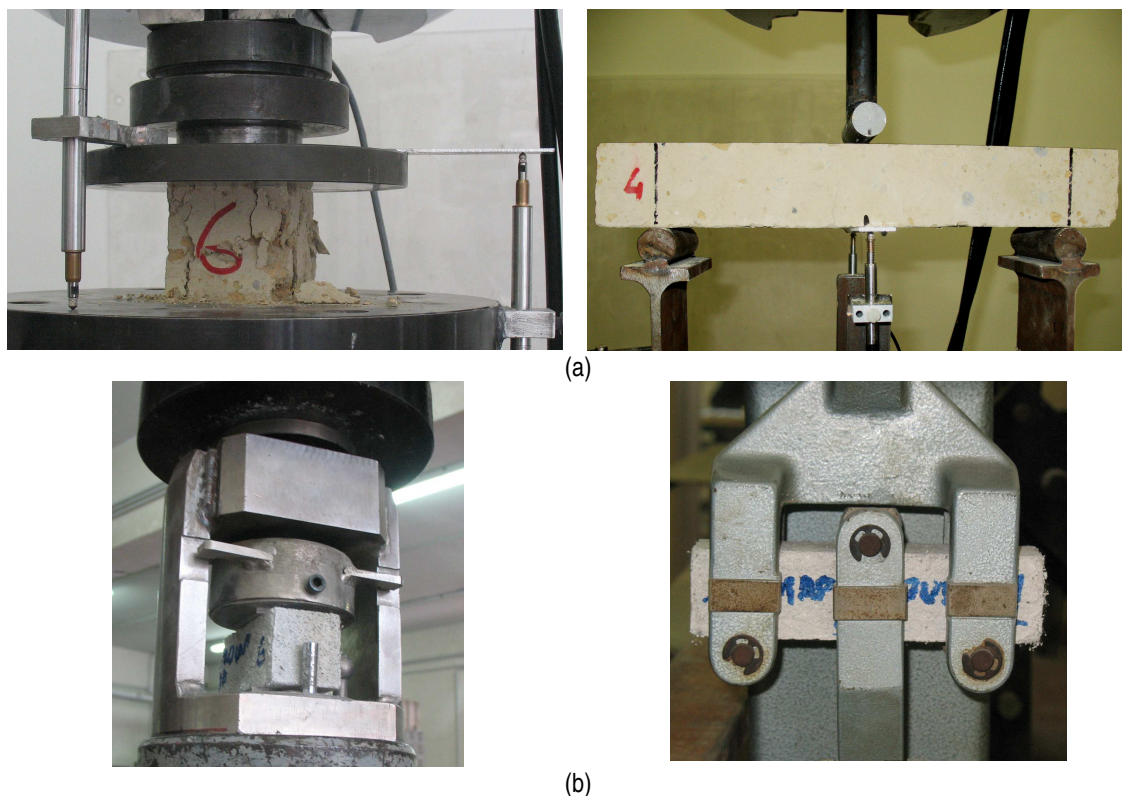


Figura 3 . Test di compressione e flessione eseguiti sul tufo giallo (a) e sulle malte (b)

Per il rinforzo dei campioni PR_G1, PR_G2, è stata utilizzata una rete a maglie quadrate di dimensione 25X25 mm in fibra di vetro alcali resistente commercializzata dalla Mapei S.p.A. con il nome di Mapegrid G220 del peso di 220 gr/mq e con una resistenza a trazione di 45 kN/m.

Il carico viene applicato alla muratura attraverso due scarpe metalliche, posizionate in corrispondenza di due spigoli opposti del pannello. Le scarpe sono state progettate secondo le specifiche ASTM E 519-81 [3]. La fase di posizionamento delle scarpe di acciaio è stata meticolosamente seguita per ridurre al minimo le eccentricità tra la direzione di applicazione del carico e l'asse geometrico verticale dei muretti.

Il corretto posizionamento della scarpa di carico all'estremità superiore del pannello è stato facilitato da un sistema di viti di regolazione distribuite sulle superfici interne della scarpa stessa. Tra le piastre metalliche e la superficie libera del pannello è stato realizzato un letto di malta a presa rapida antiritiro, per evitare rotture fragili locali della muratura. A presa avvenuta, il pannello è stato ruotato di 45° per assumere la configurazione di prova.

Le fasi di rotazione e di sollevamento dei campioni sono state effettuate adottando specifici accorgimenti che impedissero l'insorgere di una prematura rottura per fessurazione della muratura. Ciò è stato reso possibile imprimendo al

pannello un moderato stato di compressione pluridirezionale, tramite la tesatura di una coppia di barre metalliche poste ai lati dei pannelli, e di due coppie di funi circuitanti i campioni stessi.

Lo stato di compressione valutato in corrispondenza del baricentro del pannello corrisponde a circa l'1% della resistenza a compressione della muratura. Per bilanciare il provino durante la fase di sollevamento è stato predisposto un profilato in acciaio superiormente al pannello, analogo a quello disposto inferiormente. Il pannello, una volta centrato al di sotto del telaio di prova, viene liberato dal sistema di precompressione, e previa disposizione della strumentazione di misura, viene sollecitato da una forza di compressione monotona, contenuta nel piano medio e diretta lungo una delle due diagonali.

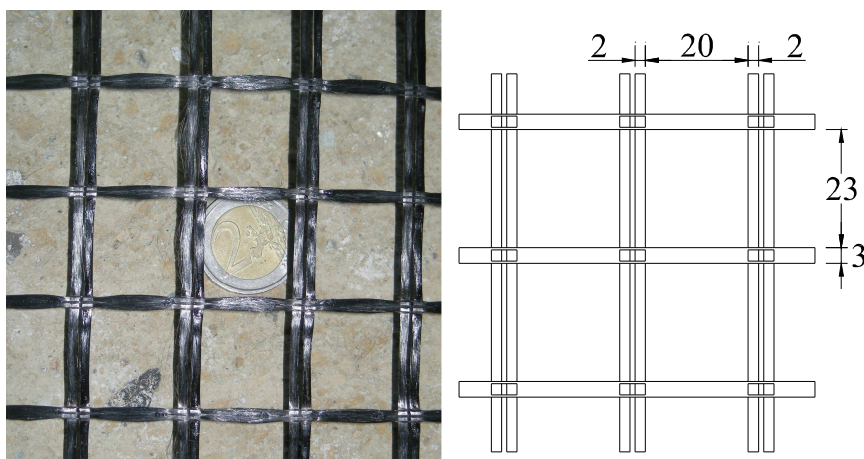


Figura 4 Rete in fibra di vetro

Per conseguire la rotazione della sommità del pannello ed ottenere la verticalità del carico, tra la piastra di carico dell'attuatore ed la scarpa superiore del pannello è stata interposta una cerniera sferica.

Il telaio di prova è dotato di una traversa mobile superiore e di una base fissa a pavimento lunga 4000 mm e larga 1000 mm. La luce verticale tra la traversa mobile e la base superiore è di 4000 mm. La traversa superiore è in grado di scorrere verticalmente lungo quattro colonne poste ai vertici di un quadrato con interasse di 900 mm, ed è predisposta per l'alloggiamento di un'attuatore idraulico a bassa frequenza (max 1Hz), con una capacità nominale in trazione di 2500 kN e di 3000 kN in compressione.

Il sistema è inoltre dotato di:

- due servovalvole (S/V) Moog a due stadi (flusso nominale: 57 l/min), ad alte prestazioni per prove statiche, quasi statiche, e per prove dinamiche
- un trasduttore di corsa incorporato e calibrato (corsa massima $\pm 75\text{mm}$)
- una cella di carico capace di controllare e leggere il carico applicato

La strumentazione di prova ha consentito la misurazione del carico applicato, degli spostamenti lungo le quattro diagonali, ed il controllo della deformazione fuori piano dei pannelli. L'acquisizione dei dati relativi ai trasduttori di spostamento è avvenuta in simultanea con l'acquisizione del carico applicato.

In dettaglio sono stati acquisiti: la forza di reazione del pannello, determinata rilevando sia la pressione del circuito idraulico di alimentazione dell'attuatore, sia tramite una cella di carico da 500 kN interposta tra la scarpa di carico superiore e la piastra della pressa idraulica. Il confronto delle due misurazioni consente di stimare la deformabilità del sistema di carico; gli spostamenti e quindi le deformazioni orizzontali e verticali, misurati su entrambi i lati dei pannelli tramite quattro trasduttori di spostamento elettroinduttivi lineari (LVDTs), posti lungo le diagonali dei pannelli stessi (base di lettura 400mm); lo spostamento fuori piano dei pannelli misurato in corrispondenza della mezzeria mediante un LVDT.

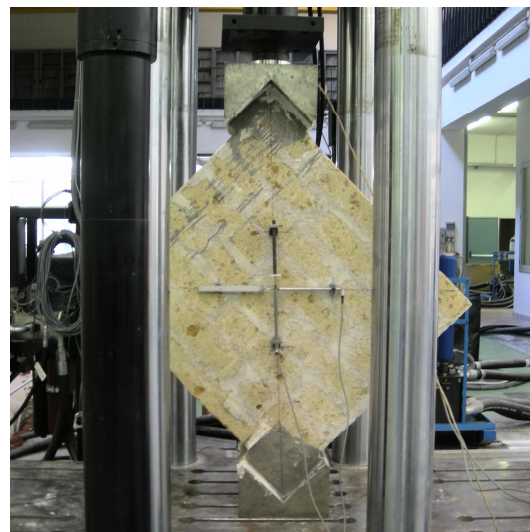
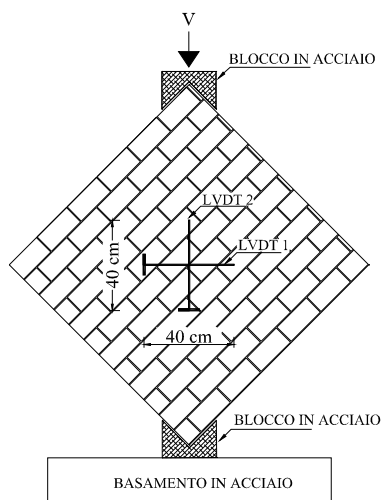


Figura 5 Test setup

3. ANALISI DEI RISULTATI

Il comportamento dei pannelli non rinforzati è essenzialmente dominato dalla crisi per scorrimento all'interfaccia pietra-malta.

Per ciascun pannello non rinforzato lo stato tensionale indotto tendeva a generare fessure prevalentemente lungo le superfici di interfaccia tufo-malta piuttosto che lungo la direzione di applicazione del carico. In particolare, le modalità di rottura sono state caratterizzate dallo scorrimento dei letti di malta rispetto alle pietre di tufo. Nonostante l'elevata concentrazione di sforzi alle estremità dei muretti, imputabile al set up di prova, i carichi impressi non hanno mai indotto lo schiacciamento locale degli spigoli dei muretti. La presenza del rinforzo su entrambi i paramenti ha sostanzialmente modificato le modalità di rottura dei pannelli, spostando la rottura a taglio per scorrimento lungo i letti di malta, ad una rottura per taglio caratterizzata da una fessurazione diffusa lungo l'isostatica di compressione, con lesioni di piccola e media ampiezza che intercettavano sia i giunti di malta che le pietre di tufo. Il rinforzo su entrambi i paramenti ha realizzato, quindi una diversa ripartizione delle tensioni sull'intera superficie muraria. L'impegno a trazione del sistema di rinforzo è stato visivamente denunciato da microfessure diffuse sullo strato di malta più esterno, e distribuite su entrambi i paramenti con andamento sub-verticale lungo le diagonali compresse.

I risultati delle prove sono stati analizzati in termini tensionali e deformativi ossia analizzando i valori della tensione agente nonché delle deformazioni raggiunte dal pannello.

Per l'analisi dei risultati si sono utilizzati i seguenti indici:

- $\tau_{\max}$, tensione massima applicata al pannello calcolata come $\tau = 0.707 \frac{V}{A_n}$ con A_n area della sezione trasversale, $A_n = 0.250 \text{ m}^2$ e V sforzo applicato al muretto
- ε_v and ε_h , deformazioni medie rispettivamente verticali ed orizzontali valutate come media dei valori forniti dai due LVDTs
- γ deformazione da taglio calcolata come $\gamma = \varepsilon_v + \varepsilon_h$
- μ fattore di duttilità calcolato come $\mu = \frac{\gamma_u}{\gamma_{\max}}$ con γ_u pari al valore che γ assume all' 80% del carico massimo e $\gamma_{\max}$ pari al valore che γ assume per lo sforzo di compressione massimo

- G modulo di rigidezza calcolato $\mu = \frac{\tau(30\% V_{\max})}{\gamma(30\% V_{\max})}$

Camp.	FRP											
Tipo	rete	$V_{\max}$	$\Delta V_{\max}$	$\tau_{\max}$	$\varepsilon_{v\cdot\max}$	$\varepsilon_{h\cdot\max}$	$\tau_{\max}$	τ_u	$\gamma_{\max}$	γ_u	G	μ
		[kN]	[%]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[%]	[%]
P1	-	50	-	0.14	0.05	-0.05	0.14	0.11	0.10	0.53	258	5.5
P2	-	60	-	0.17	0.13	-0.14	0.17	0.14	0.27	0.46	296	1.7
PR_G1	Vetro	157	186	0.44	0.13	-0.11	0.44	0.36	0.23	1.12	654	4.8
PR_G2	Vetro	188	241	0.53	0.29	-0.23	0.53	0.42	0.53	1.91	799	3.6

Tabella 2 Risultati dei test eseguiti

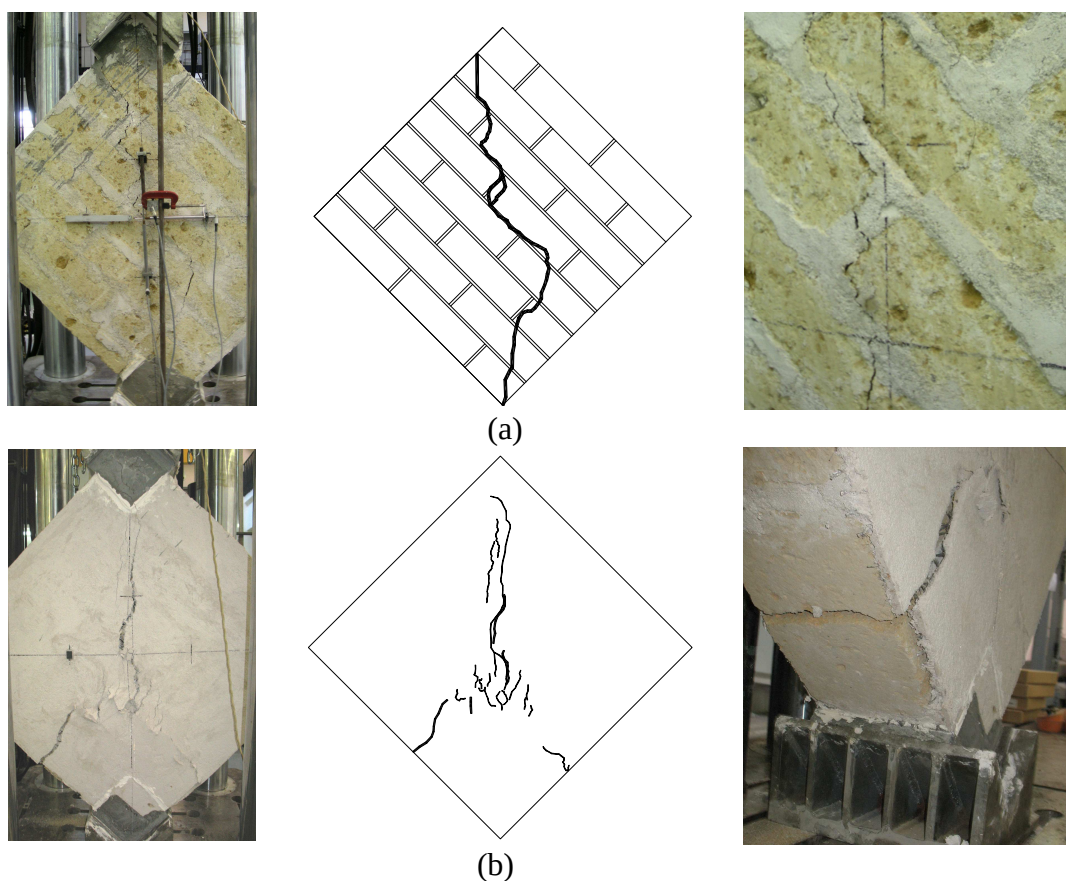


Figura 6 Quadro fessurativo rilevato sui campioni (a) non rinforzati, (b) rinforzati con rete in fibra di vetro

Dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, in cui sono riportati i risultati dei test, è immediato notare come la tensione massima ($\tau_{\max}$) raggiunta dai provini rinforzati è sensibilmente superiore a quella raggiunta dai campioni non rinforzati con una differenza che raggiunge anche il 230%. Tale differenza è evidente anche nei riguardi delle tensioni al

limite ultimo (τ_{ult}), ovvero le tensioni raggiunte nella fase post-picco quando il campione ha perso il 20% della sua capacità resistente. È interessante inoltre notare come l'applicazione del rinforzo genera, nella fase post-picco (γ), sempre un notevole incremento della capacità deformativa nei confronti delle sollecitazioni taglienti.

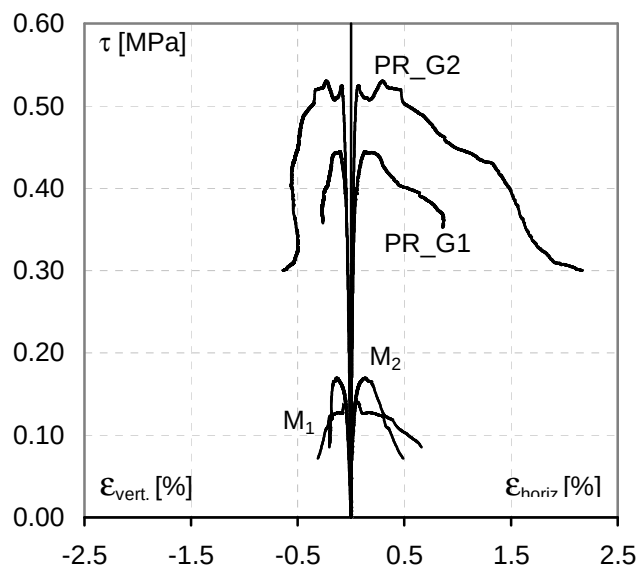


Figura 7. Diagramma $\tau - \epsilon$ di tutti i campioni testati

In Figura 8a è riportato il comportamento tenso-deformativo di ciascun campione dal quale è evidente, oltre al considerevole incremento della tensione massima, la capacità dei campioni rinforzati di raggiungere deformazioni sensibilmente più alte rispetto quelle raggiunte dai campioni non rinforzati. L'effetto positivo che il rinforzo esercita sulla muratura è ancora più evidente se si confrontano le aree sottese alle relative curve tensione-deformazione come mostrato, relativamente ai soli campioni P2 e PR_G2, in Figura 8b. Tale confronto evidenzia la maggiore capacità dei campioni rinforzati di dissipare energia, capacità che risulta fondamentale in caso di evento sismico. Tale capacità è ascrivibile al diverso quadro fessurativo che si è osservato durante i test e che è già stato illustrato in precedenza. Infatti la formazione di una serie di piccole lesioni, come osservato nel caso dei pannelli rinforzati, consente al pannello murario di dissipare maggiore energia e raggiungere deformazioni elevate senza perdere la propria capacità resistente. Inoltre la propagazione di tali lesioni all'interno dei blocchi di tufo e non solo all'interno della malta come avviene per i campioni non rinforzati, permette di sollecitare un elemento, il tufo, sicuramente più resistente della malta di allettamento all'interno della quale si propagano le lesioni dei provini non rinforzati.

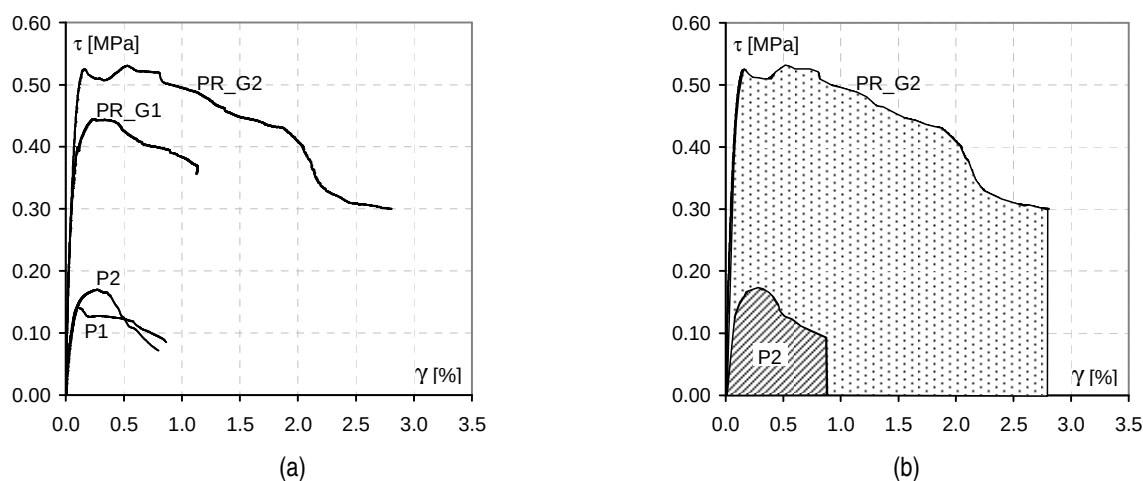


Figura 8 Legame τ – γ dei campioni testati (a) e individuazione delle aree sottese ai grafici dei campioni P2 e PR_G2 (b)

4. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti e sinteticamente descritti nel presente lavoro dimostrano che l'applicazione del sistema di rinforzo genera un netto miglioramento delle capacità resistenti e deformative della muratura. Tale miglioramento è ampiamente visibile nella fase di post-picco, nella quale il sistema di rinforzo ha consentito di mantenere, in tutti i casi, resistenze elevate (notevolmente superiori alla resistenza di picco media dei pannelli non rinforzati) per un intervallo sufficientemente esteso di deformazioni di taglio. E' inoltre degno di nota come la presenza del rinforzo abbia ritardato l'insorgere della fessurazione spostando verso l'alto la tensione al limite di elasticità dei pannelli.

Complessivamente si può affermare che il sistema di rinforzo rappresentato dall'intonaco armato con reti in GFRP comporta grossi incrementi di resistenza a taglio senza, però, produrre altrettanto grandi variazioni di rigidità a taglio: ne consegue che l'intervento di rinforzo non altera in maniera significativa lo schema statico della struttura né determina forti redistribuzioni di rigidità in pianta nell'edificio. Il rinforzo, inoltre, migliora sensibilmente anche la capacità deformativa globale in campo anelastico.

Tali considerazioni assumono particolare valore in considerazione della possibilità di utilizzare tali compositi nel rinforzo di edifici storici per i quali la natura dei materiali esistenti impongono criteri ben precisi per la scelta dei materiali da utilizzare come rinforzo. Inoltre la natura non cementizia della malta Planitop HDM Restauro le consente di raggiungere, a maturazione avvenuta, un'elevata permeabilità necessaria per consentire la naturale traspirazione della muratura.

Dunque il sistema proposto si configura come una valida alternativa alle tecniche di rinforzo tradizionali delle strutture in muratura, viste le alte prestazioni meccaniche ottenute con tale metodologia di intervento nonché la semplicità di esecuzione e il modesto livello di specializzazione richiesto per la realizzazione dell'intervento stesso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Marcari G., Manfredi G., Prota A., and Pecce M. (2007). "In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP." *Composites Part B: Engineering*, 38(7-8), 887-901.
- [2] Prota A., Marcari G., Fabbrocino G., Manfredi G., Aldea C. "Experimental in plane behavior of tuff masonry strengthened with cementitious matrix-grid composites" *Journal of Composites for Construction - ASCE*, May-June 2006.
- [3] ASTM E 519-81. 1981. Standard test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages. American Society for Testing Materials