

Indagini sperimentali su sistemi di rinforzo di murature con intonaco, rete in GFRP e trefoli metallici inseriti nei giunti di malta



Antonio Borri, Romina Sisti

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia. Via G. Duranti, 93
06125 Perugia.*

Natalino Gattesco

*Dipartimento di Ingegneria e Architettura. Università degli Studi di Trieste. Piazzale Europa, 1 34127
Trieste.*

Allen Dudine

Fibre Net s.r.l. Via Zanussi, 311 Z.I.U. 33100 Udine.

Keywords: rinforzo muratura, materiali compositi, sperimentazione, prove a taglio.

ABSTRACT

Nel presente lavoro si riportano i risultati di una campagna di indagini sperimentali condotta al fine di valutare il comportamento di murature rinforzate mediante intonaco armato con rete in GFRP e ristilatura armata dei giunti di malta con trefoli in acciaio inox. Le indagini hanno riguardato sia campioni rinforzati con ristilatura armata su entrambe le facce, sia campioni rinforzati con un sistema ibrido, ossia intonaco armato su una faccia e ristilatura armata sull'altra.

Sono state eseguite prove di compressione diagonale su pannelli di tre diverse tipologie murarie: pietrame grossolanamente squadrato, ciottoli di fiume e mattoni pieni a due teste. È stato considerato uno spessore di 400 mm nei primi due casi e di 250 mm per i campioni in mattoni pieni.

Queste indagini hanno fornito utili informazioni sul comportamento meccanico dei campioni rinforzati e hanno evidenziato l'efficacia delle tecniche proposte.

1 INTRODUZIONE

La risposta di un edificio tradizionale in muratura alle azioni statiche e a quelle dinamiche causate dagli eventi sismici è primariamente legata alla qualità muraria degli elementi resistenti, la cui carenza rappresenta un elemento di grave vulnerabilità che spesso rende inefficaci anche quegli accorgimenti costruttivi intesi a limitare i meccanismi di collasso locali. In questi casi, il conseguimento di un adeguato livello di sicurezza è legato all'adozione di interventi capaci di assicurare un miglioramento delle proprietà meccaniche degli elementi murari.

Alcune tecniche di rinforzo, quali ad esempio le iniezioni di miscele di boiaccia di cemento o a base calce e l'intonaco armato con rete elettrosaldata, particolarmente diffuse nelle ricostruzioni seguenti gli eventi sismici di Friuli (1976), Irpinia (1980) ed Umbria-Marche (1997), hanno mostrato, con il passare del tempo, criticità

in termini di efficacia e durabilità. Le più recenti sperimentazioni sono quindi state rivolte verso tecniche diverse quali, ad esempio, quelle che prevedono il placcaggio con compositi a base di fibre unidirezionali o la realizzazione di un intonaco armato con rete in FRP (Fiber Reinforced Polymer).

La necessità di mantenere la finitura facciovista dei paramenti murari, frequente nel caso di interventi su edifici di carattere storico-monumentale, limita fortemente la scelta delle metodologie di rinforzo. In precedenti lavori (Borri et al. 2009) è stato proposto un sistema, denominato "Reticolatus", consistente nell'inserimento nei giunti di malta di una maglia continua di sottili funi in acciaio inox, la cui flessibilità consente la realizzazione di una ristilatura armata anche per le murature irregolari.

Le sperimentazioni qui presentate, oltre che approfondire lo studio del rinforzo con "Reticolatus" su entrambe le facce, hanno

consentito di valutare l'efficacia di un rinforzo di tipo ibrido ottenuto effettuando la ristilatura armata dei giunti su una faccia della muratura e realizzando un intonaco armato con rete in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) sull'altra. Tale tecnica si propone come risolutiva nei casi in cui debba essere conservata una delle due superfici murarie ma non si possa rinunciare a sensibili incrementi di resistenza.

2 TECNICHE DI RINFORZO

2.1 Rinforzo con "Reticolatus" su entrambe le facce

Come accennato, la tecnica di rinforzo chiamata "Reticolatus" consiste nell'inserimento nei giunti di malta, scarniti per una profondità di 50-60 mm, di una maglia continua realizzata con funi in acciaio inox, i cui nodi, generalmente uno ogni due, sono fissati al paramento murario mediante barre trasversali, anch'esse in acciaio inox, previste nel numero di 5 a m² secondo uno schema a quinconce irregolari (Figura 1).

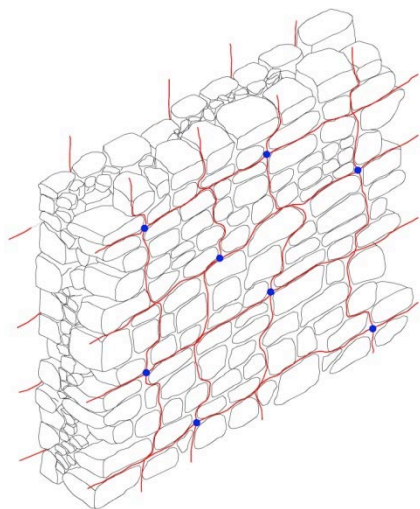


Figura 1. Schematizzazione del rinforzo con "Reticolatus" su entrambe le facce della muratura; sono anche evidenziate le posizioni delle connessioni trasversali.

I trefoli metallici vengono disposti secondo traiettorie sub-verticali e sub-orizzontali a formare maglie approssimativamente quadrate le cui dimensioni, normalmente comprese fra i 300 e i 500 mm, dipendono dalla grandezza degli elementi lapidei e di regola non devono essere superiori allo spessore della muratura su cui si interviene.

Le funi sono trattenute dai connettori senza essere ad essi solidali di modo che sia possibile applicare loro una modesta pretensione, capace di rendere la maglia immediatamente "attiva".

Quando le dimensioni degli elementi lapidei sono tali da impedire l'adozione di connessioni trasversali passanti, il collegamento può essere effettuato con barre di lunghezza pari a circa 2/3 dello spessore murario ancorate attraverso un'iniezione di malta antiritiro o resina (Figura 2, Figura 3)

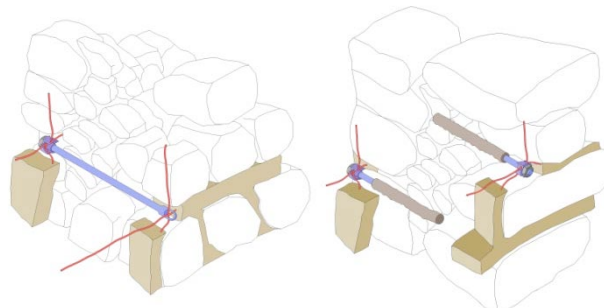


Figura 2. Applicazione del rinforzo simmetrico con "Reticolatus" a murature con elementi lapidei di dimensioni piccole (sinistra) e dimensioni medio-grandi (destra).

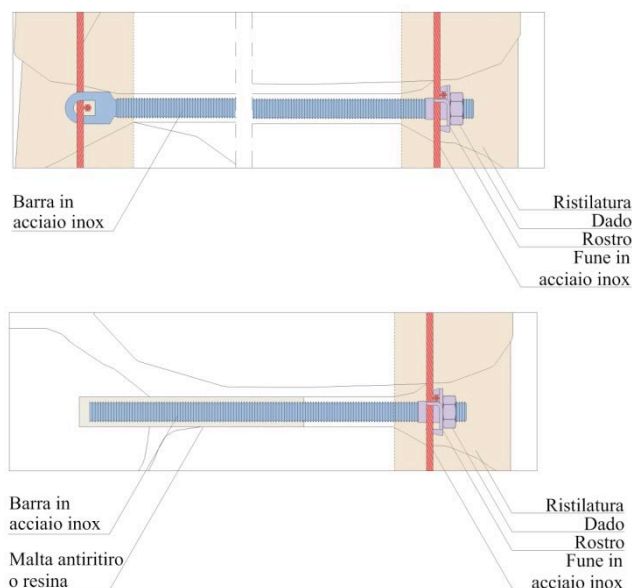


Figura 3. Connettori trasversali passanti (in alto) e non passanti (in basso).

L'applicazione finale di malta, che ricopre completamente sia i trefoli metallici che le teste delle barre trasversali, permette di conservare la finitura faccia-vista della muratura.

2.2 Rinforzo ibrido con "Reticolatus" e intonaco armato con rete in GFRP

Questa tecnica di rinforzo accoppia il sistema "Reticolatus" su una faccia muraria all'applicazione di uno strato di intonaco di circa 30-35 mm rinforzato con una rete in GFRP (maglia 99x99 mm) sull'altra.

Le due facce rinforzate sono fra loro collegate attraverso dei connettori trasversali costituiti da barre filettate in acciaio inox del diametro di 8 mm. I trefoli metallici vengono fatti passare attraverso un anello posto all'estremità del connettore, cosicché, serrando il dado presente sull'estremità opposta, è possibile applicare una leggera pretensione alla rete in acciaio inox (Figura 4).

Nel caso di applicazione su murature regolari di laterizio, il "Reticolatus" viene realizzato disponendo delle funi nei ricorsi orizzontali di malta (tipicamente ogni tre). I trefoli orizzontali possono essere collegati fra loro da coppie di funi verticali disposte ad una distanza di circa 800 mm l'una dall'altra. In corrispondenza delle intersezioni fra i rinforzi verticali ed orizzontali sono previsti dei connettori trasversali aventi caratteristiche analoghe a quelli utilizzati in applicazioni su murature irregolari (Figura 5).

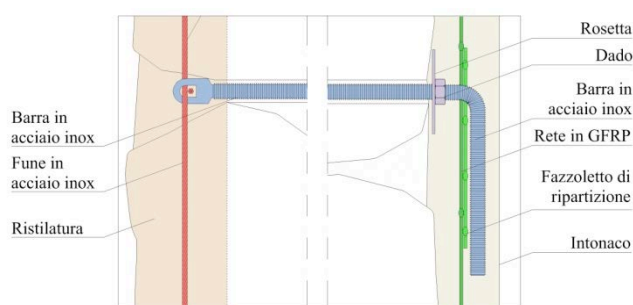


Figura 4. Connettore trasversale adottato nel rinforzo ibrido.

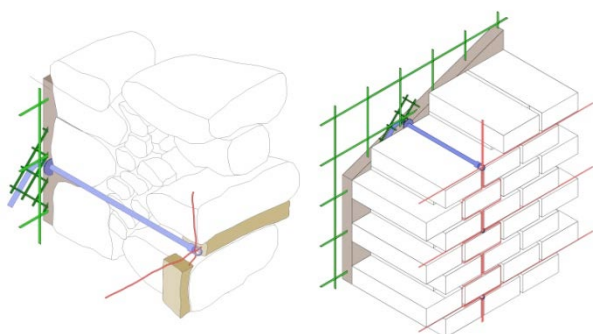


Figura 5. Schematizzazione del rinforzo ibrido con "Reticolatus" e intonaco armato con rete in GFRP su murature irregolari (sinistra) ed in laterizi (destra).

3 SPERIMENTAZIONI

3.1 Descrizione dei campioni

Sono state eseguite 23 prove di compressione diagonale su campioni con dimensioni di 1200 x 1200 mm circa, che differivano fra loro per

tipologia muraria e configurazione di rinforzo. In particolare sono stati sottoposti a prova:

- 8 campioni di muratura in pietra grossolanamente squadrata di spessore 400 mm;
- 7 campioni di muratura in mattoni pieni a due teste con tessitura di tutti diatoni;
- 8 campioni di muratura in ciottoli di spessore 400 mm.

Al fine di verificare la ripetibilità dei risultati, sono stati previsti due campioni per ogni combinazione tipologia muraria-configurazione di rinforzo.

Per valutare le possibili differenze di comportamento legate al numero di connettori trasversali sui nodi della maglia di "Reticolatus", sia per le murature di pietrame che di ciottoli, sono state realizzate due coppie di campioni: la prima caratterizzata dalla presenza di connessioni passanti l'intero spessore murario affiancate a connessioni non passanti sulla faccia rinforzata con "Reticolatus", la seconda con le sole connessioni passanti. Le due configurazioni di rinforzo sono mostrate in Figura 6

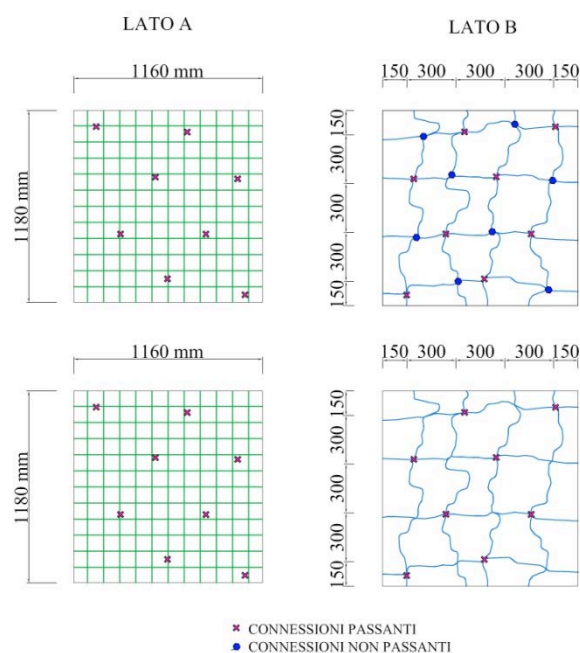


Figura 6. Configurazioni di rinforzo ibrido dei pannelli in muratura di pietrame e ciottoli: in alto con connessioni passanti e non passanti; in basso con sole connessioni passanti.

Per quantificare l'apporto fornito dalla presenza di armatura nei giunti verticali dei campioni in muratura di laterizio, una coppia di campioni è stata rinforzata disponendo le funi in acciaio inox nei soli giunti orizzontali e l'altra inserendo i trefoli anche nei giunti verticali, come riportato in Figura 7.

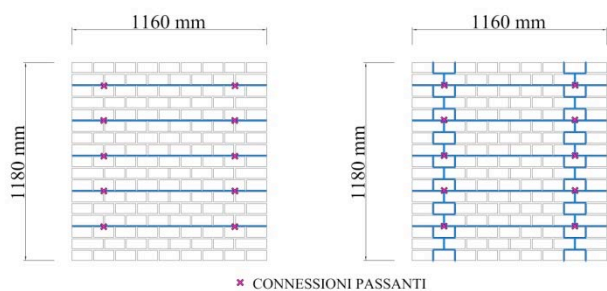


Figura 7. Configurazioni di rinforzo dei pannelli in muratura di laterizi: a sinistra “Reticolatus” con trefoli solo orizzontali, a destra con trefoli orizzontali e verticali.

In Tabella 1 sono mostrate le caratteristiche dei campioni di prova. I pannelli sono stati identificati da una sigla composta da quattro indici in cui il primo individua la tipologia muraria (MP = muratura in pietrame, MD = muratura in laterizi a due teste, MC = muratura in ciottoli), il secondo l'indice del campione (1 o 2), il terzo il tipo di rinforzo (I = ibrido, R = “Reticolatus” su entrambe le facce), il quarto la configurazione di rinforzo (P = “Reticolatus” con connessioni trasversali passanti; N = “Reticolatus” con connessioni trasversali passanti e non; O = “Reticolatus” su muratura di laterizi con funi solo orizzontali; V = “Reticolatus” su muratura di laterizi con funi sia orizzontali che verticali).

Il campione non rinforzato MD-1, una volta testato, è stato riparato con l'intervento ibrido e quindi nuovamente sottoposto alla prova di compressione diagonale. I risultati relativi all'applicazione del rinforzo come riparazione sono quindi presentati come relativi al campione indicato con la sigla MD-1rip-I-V.

I campioni in muratura di pietrame e di laterizi sono stati costruiti con una malta di allettamento denominata “AA” e rinforzati con un intonaco realizzato, quando previsto, utilizzando una malta pre-miscelata a base di calce idraulica naturale identificata dalla sigla “NHL6”.

Per i campioni in muratura di ciottoli è invece stata adottata una malta di allettamento più debole, indicata come “AB”, in modo da riprodurre più fedelmente le caratteristiche reali di questa tipologia muraria. Anche per l'intonaco si è preferito applicare una malta confezionata in opera a base calce idraulica naturale con caratteristiche meccaniche modeste così da minimizzare la differenza di rigidità fra l'intonaco applicato e la muratura di supporto (malta NHL5).

Per tutti i campioni è stata utilizzata un'unica malta da ristilatura pre-miscelata a base di calce idraulica indicata con la sigla “M8”.

Tabella 1. Caratteristiche dei campioni testati con prove di compressione diagonale.

Campione	Malta allettamento	Malta intonaco	Malta ristilatura
MP-1	AA	-	-
MP-2	AA	-	-
MP-1-I-N	AA	NHL6	M8
MP-2-I-N	AA	NHL6	M8
MP-1-I-P	AA	NHL6	M8
MP-2-I-P	AA	NHL6	M8
MP-1-R-N	AA	-	M8
MP-2-R-N	AA	-	M8
MD-1	AA	-	-
MD-2	AA	-	-
MD-1-I-V	AA	NHL6	M8
MD-2-I-V	AA	NHL6	M8
MD-1-I-O	AA	NHL6	M8
MD-2-I-O	AA	NHL6	M8
MD-1rip-I-V	AA	NHL6	M8
MC-1	AB	-	-
MC-2	AB	-	-
MC-1-I-P	AB	NHL5	M8
MC-2-I-P	AB	NHL5	M8
MC-1-I-N	AB	NHL5	M8
MC-2-I-N	AB	NHL5	M8
MC-1-R-P	AB	-	M8
MC-2-R-P	AB	-	M8

La composizione e le caratteristiche meccaniche medie delle malte impiegate nella sperimentazione sono riportate nelle Tabella 2, 3 e 4. Le prove di compressione (UNI EN 1015-11:2007 Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita) e trazione indiretta (UNI EN 12390-6:2010 Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 6: Resistenza a trazione indiretta dei provini) sono state eseguite su campioni cilindrici di 100 mm di diametro e 200 mm di altezza.

Tabella 2. Malte di allettamento: dosaggio di legante per m³ di impasto e resistenza media a compressione f_{cm} .

Sigla	Dosaggio		Resistenza
	calce idraulica	cemento	f_{cm}
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[MPa]
AA	260	-	1.87
AB	200	-	0.96

Tabella 3. Malta per ristilatura: composizione e resistenza media a compressione f_{cm}

Sigla	composizione	f_{cm} [MPa]
M8	premiscelata	8.90

Tabella 4. Malte per intonaci: composizione e caratteristiche meccaniche medie (resistenza a compressione f_{cm} , modulo elastico E e resistenza a trazione f_{tm}).

Sigla	composizione		f_{cm} [MPa]	E [MPa]	f_{tm} [MPa]
	calce idraulica [kg/m ³]	cemento [kg/m ³]			
NHL5	300	-	4.24	14529	0,55
NHL6	premiscelata		4.71	15089	0.77

L'intonaco applicato è stato rinforzato con una rete a maglia quadrata di dimensioni 99x99 mm (tipo FB MESH 99X99T96AR Fibre Net S.r.l.), costituita da fibre di vetro AR (resistente agli alcali o Alkali Resistant) inglobate in una resina termo-indurente di tipo vinilestere-epossidica.

Le funi metalliche utilizzate nel sistema "Reticolatus" sono funi di acciaio inox AISI 316 del diametro di 3 mm, ciascuna costituita da 49 fili (\varnothing filo = 0.33 mm) con configurazione 7x7 e caratterizzata da un carico di rottura minimo di 5,54 kN.

3.2 Descrizione delle prove

Il carico di prova è stato applicato mediante un attuatore che agisce tra due elementi metallici. L'elemento interno è appoggiato allo spigolo del pannello mentre quello esterno, con funzione di contrasto, è collegato tramite quattro barre in acciaio all'elemento metallico disposto sullo spigolo opposto del campione. Si è realizzato in tal modo un sistema chiuso in cui il martinetto, azionato tramite pompa idraulica manuale, sollecita il pannello lungo la diagonale con una forza la cui entità è acquisita mediante un trasduttore di pressione. Le prove sono state effettuate eseguendo cicli di carico e scarico crescenti fino alla rottura del pannello.

I campioni sono stati strumentati con due trasduttori potenziometrici su ciascuna faccia, disposti lungo le diagonali del pannello ed aventi una base di misura di circa 1100 mm. Nelle prove sui campioni con rinforzo ibrido l'effetto della dissimetria è stato monitorato controllando gli spostamenti fuori piano del campione. Come

schematizzato in Figura 8, sono infatti stati acquisiti gli spostamenti fuori dal piano del pannello dei punti centrali delle due facce e dello spigolo superiore non caricato della faccia rinforzata con intonaco armato.

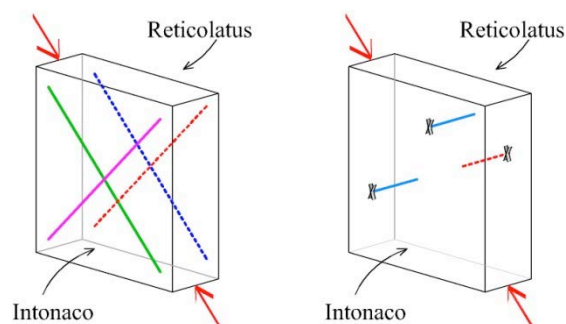


Figura 8. Schematizzazione delle grandezze acquisite durante le prove su campioni con rinforzo ibrido.

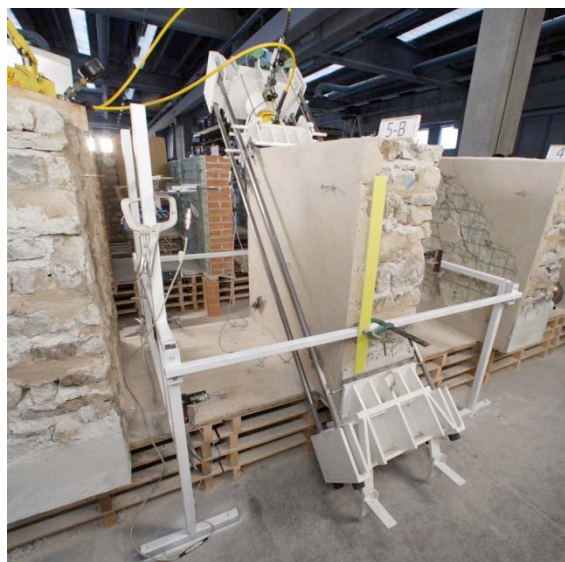


Figura 9. Apparato di prova utilizzato per l'esecuzione delle prove di compressione diagonale su pannelli con rinforzo ibrido.

3.3 Analisi dei risultati

Ipotizzando di poter studiare il sistema come un problema elastico di una lastra caricata nel suo piano con due forze P agenti su due spigoli opposti di una diagonale, a partire dal carico P registrato dal trasduttore di pressione è stata determinata la resistenza a trazione della muratura:

$$f_t = \alpha \frac{P_{\max}}{A} \quad (1)$$

dove A è l'area della sezione orizzontale del campione considerata al netto dell'incremento di spessore dovuto all'applicazione dell'intonaco. Per tutti i campioni testati il parametro α è stato assunto pari a 0,5, in accordo con le indicazioni della normativa RILEM (1994). La scelta di non

differenziare il valore di α in base alla tipologia muraria, diversamente da quanto proposto in (Brignola et al. 2009), scaturisce dalla necessità di determinare la resistenza a trazione di murature rinforzate per le quali non è possibile estendere le considerazioni presentate nel citato articolo.

Il valore di resistenza a taglio τ_0 è stato valutato in accordo con il criterio di resistenza formulato di Turnsek–Cacovic:

$$\tau_0 = \frac{f_t}{1.5} \quad (2)$$

In Tabella 5 sono riassunti i risultati ottenuti dalle prove eseguite riportando il carico massimo (P_{max}), la resistenza a trazione (f_t), la resistenza a taglio (τ_0) ed il rapporto tra la resistenza a taglio del campione rinforzato e la media di quelli non rinforzati ($\tau_{0,R}/\tau_{0,NR}$).

Tabella 5. Risultati delle prove di compressione diagonale .

Campione	P_{max} [kN]	f_t^* [MPa]	τ_0^* [MPa]	$\tau_{0,R}/\tau_{0,NR}$
MP-1	161.58	0.176	0.117	-
MP-2	107.03	0.121	0.081	-
MP-1-I-N	246.22	0.262	0.175	1.76
MP-2-I-N	273.68	0.298	0.198	2.01
MP-1-I-P	233.26	0.254	0.169	1.71
MP-2-I-P	284.27	0.296	0.197	1.99
MP-1-R-N	162.38	0.175	0.117	1.18
MP-2-R-N	158.51	0.171	0.114	1.15
MD-1	120.60	0.209	0.139	-
MD-2	108.22	0.187	0.124	-
MD-1-I-V	135.29	0.222	0.148	1.12
MD-2-I-V	197.61	0.332	0.222	1.68
MD-1-I-O	192.03	0.318	0.212	1.61
MD-2-I-O	162.44	0.266	0.178	1.35
MD-1rip-I-V	127.14	0.216	0.144	1.04
MC-1	46.66	0.052	0.034	-
MC-2	49.77	0.055	0.037	-
MC-1-I-P	132.49	0.131	0.088	2.47
MC-2-I-P	109.08	0.110	0.074	2.07
MC-1-I-N	108.48	0.105	0.070	1.97
MC-2-I-N	107.54	0.104	0.069	1.96
MC-1-R-P	63.79	0.070	0.047	1.32
MC-2-R-P	69.73	0.077	0.051	1.44

*I valori della resistenza a trazione f_t e a taglio τ_0 sono stati determinati facendo riferimento all'area della sezione orizzontale della sola muratura, senza considerare lo spessore dell'intonaco di rinforzo eventualmente presente.

Indicando con L la lunghezza iniziale della base di misura del potenziometro lineare sulla generica diagonale e con ΔL la relativa variazione di lunghezza acquisita, la dilatazione diagonale media a compressione ε_c e a trazione ε_t e la dilatazione angolare γ sono così definite:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L_{c,latoA}}{L_{c,latoA}} + \frac{\Delta L_{c,latoB}}{L_{c,latoB}} \right) \quad (3)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L_{t,latoA}}{L_{t,latoA}} + \frac{\Delta L_{t,latoB}}{L_{t,latoB}} \right) \quad (4)$$

$$\gamma = |\varepsilon_c| + |\varepsilon_t| \quad (5)$$

Per i campioni con rinforzo ibrido in Tabella 6 sono mostrati i valori dello spostamento fuori dal piano del pannello del vertice superiore della diagonale tesa della faccia rinforzata con intonaco armato al raggiungimento del carico massimo ed al termine della prova.

Tabella 6. Spostamenti fuori dal piano del pannello del vertice superiore della faccia rinforzata con intonaco armato in corrispondenza del raggiungimento del carico massimo ed al termine della prova.

	P_{max} [kN]	Spostamento a P_{max} [mm]	Spostamento a fine prova [mm]
MP-1-I-N	246.22	7.00	34.30
MP-2-I-N	273.68	7.20	37.00
MP-1-I-P	233.26	8.90	16.60
MP-2-I-P	284.27	5.00	31.40
MD-1-I-V	135.29	1.00	11.90
MD-2-I-V	197.61	0.50	2.70
MD-1-I-O	192.03	0.80	9.40
MD-2-I-O	162.44	0.20	8.20
MD-1rip-I-V	127.14	19.40	16.70
MC-1-I-P	132.49	9.40	22.50
MC-2-I-P	109.08	7.10	32.20
MC-1-I-N	108.48	10.90	45.00
MC-2-I-N	107.54	9.10	31.50

Per i campioni in muratura di pietrame e di ciottoli con rinforzo ibrido sono state riscontrate letture non omogenee degli strumenti sulle diagonali corrispondenti delle due facce, tuttavia, si è ritenuto di poter considerare un comportamento medio e quindi trattare i dati acquisiti secondo le formulazioni (1-5) in ragione del fatto che lo spostamento fuori dal piano del pannello dello spigolo libero della faccia rinforzata con intonaco armato non è rilevante fino al raggiungimento del carico massimo e al termine della prova presenta valori comunque contenuti. Per i campioni in muratura di laterizio sempre con rinforzo ibrido, la risposta eccentrica è stata trascurabile in quanto la rigidità della muratura e quella dell'intonaco applicato sono confrontabili.

I campioni non rinforzati di ciascuna tipologia muraria hanno presentato una fessurazione diagonale che interessa i giunti di malta (Figura 10). Alla rimozione del carico al termine della

prova i pannelli in ciottoli hanno perso completamente la propria integrità (Figura 11), evidenziando l'incoerenza tipica di questa tipologia muraria. Le prove sui campioni rinforzati con "Reticolatus" su entrambe le facce dimostrano che l'intervento, trattenendo assieme le varie parti che compongono il campione, è in grado di risolvere tale problematica (Figura 12). Anche i pannelli con rinforzo ibrido sono caratterizzati dalla presenza di una fessurazione diagonale, che tuttavia, risulta maggiormente diffusa (Figura 13, Figura 14).

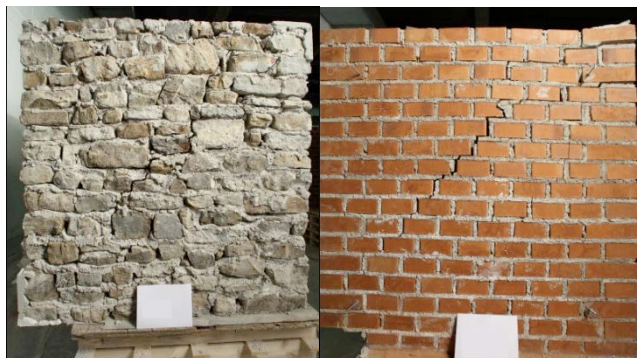


Figura 10. Campioni non rinforzati in muratura di pietrame (sinistra) e di laterizi (destra).



Figura 11. Campione non rinforzato in muratura di ciottoli: a sinistra durante l'esecuzione della prova, a destra dopo la rimozione del carico applicato.



Figura 12. Campioni in muratura di pietra (sinistra) e ciottoli (destra) rinforzato con "Reticolatus" al termine della prova.



Figura 13. campione in muratura di laterizi con rinforzo ibrido.

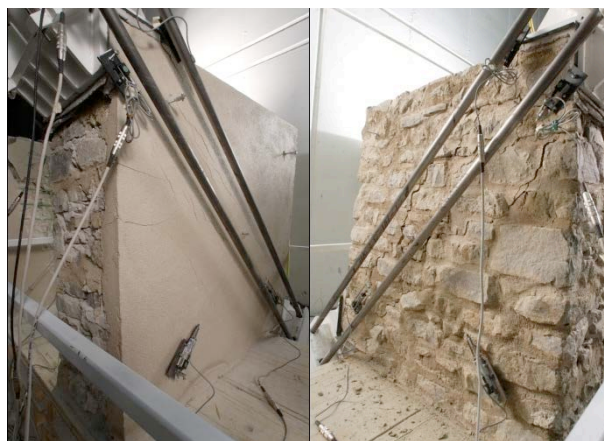


Figura 14. Campione in muratura di pietrame con rinforzo ibrido

Nelle Figura 15-16-17 sono presentate le curve inviluppo dei diagrammi sperimentali carico vs deformazione tangenziale relativi alle tre tipologie murarie testate.

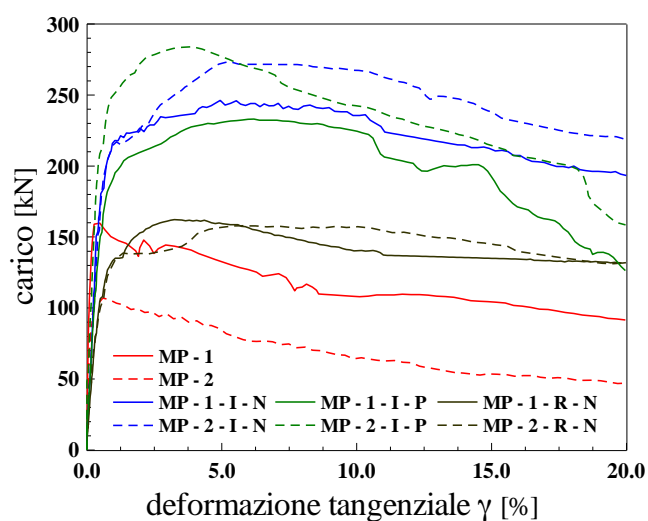


Figura 15. Muratura in pietrame: curve inviluppo dei diagrammi sperimentali carico-deformazione tangenziale.

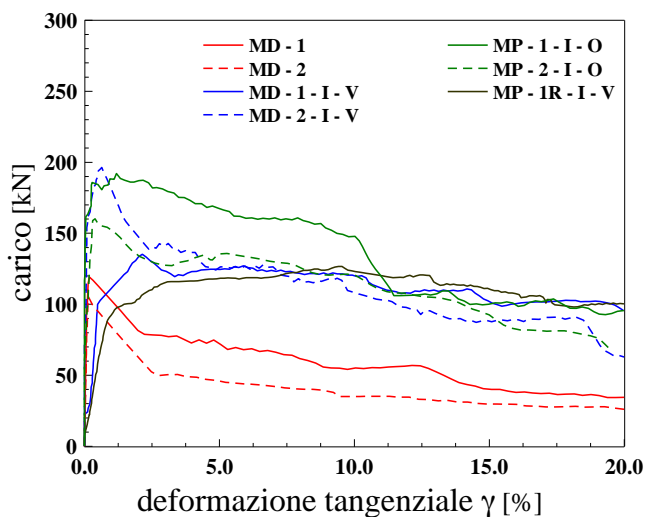


Figura 16. Muratura di laterizi: inviluppo dei diagrammi sperimentali carico-deformazione tangenziale.

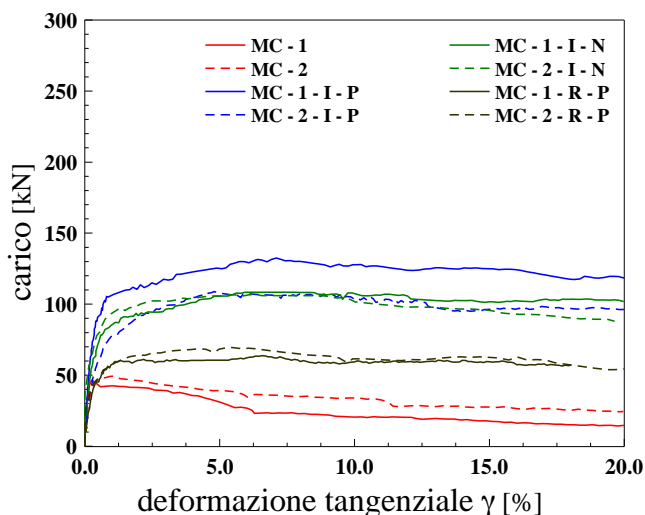


Figura 17. Muratura di ciottoli: inviluppo dei diagrammi sperimentali carico-deformazione tangenziale.

Il rinforzo con “Reticolatus” su entrambe le facce determina un incremento di resistenza del 17% sulla muratura di pietrame e del 40% sulla muratura di ciottoli. Gli incrementi determinati dal rinforzo ibrido risultano, invece, dell’87%, 44% e 112% rispettivamente per muratura in pietrame, laterizi e ciottoli. È evidente quindi che l’aumento di resistenza conseguente all’applicazione delle tecniche di rinforzo proposte dipende dalle caratteristiche meccaniche della muratura sulla quale si interviene, diventando più apprezzabile al diminuire della resistenza di partenza, come nel caso della muratura in ciottoli.

Per quantificare il miglioramento del comportamento post-rottura dei campioni rinforzati si è valutata, attraverso il parametro Λ , l’aliquota di carico massimo che il pannello è in

grado sopportare al raggiungimento di una prefissata deformazione:

$$\Lambda = \frac{P_{10\gamma_y}}{P_{\max}} \quad (6)$$

dove $P_{10\gamma_y}$ è il carico residuo corrispondente ad una deformazione tangenziale pari a dieci volte la deformazione γ_y individuata dall’intersezione fra la tangente orizzontale al grafico P- γ nel punto di carico massimo e la secante la curva al 70% del resistenza ultima (Figura 18).

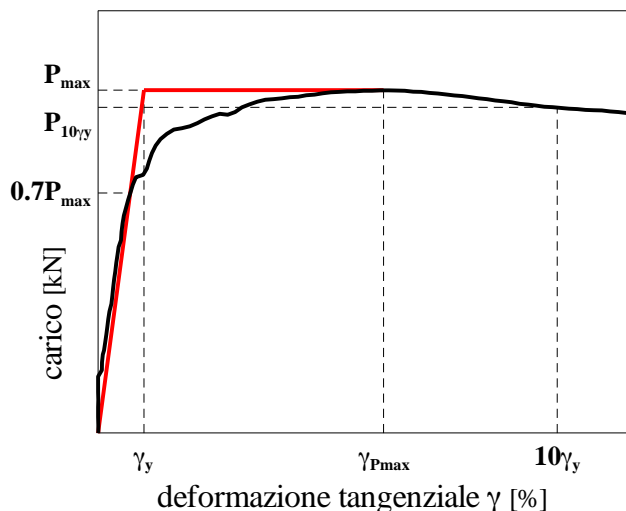


Figura 18. Valutazione dei parametri necessari nel calcolo di Λ .

Come è possibile osservare dai grafici precedenti e dai valori di Λ riportati in Tabella 7, nei campioni non rinforzati il calo di resistenza seguente la formazione della fessura è consistente per la muratura in mattoni mentre risulta più contenuto per le altre due tipologie che mostrano una buona capacità dissipativa. Sia i campioni rinforzati simmetricamente che in modo ibrido evidenziano un netto miglioramento del comportamento post-picco mantenendo quasi inalterato il valore del carico ultimo al crescere della deformazione tangenziale.

Nei campioni con rinforzo ibrido su murature irregolari l’aggiunta di connessioni non passanti nei nodi della maglia di “Reticolatus” non determina differenze significative né in termini di incrementi di resistenza né di miglioramento del comportamento post-picco. La stessa cosa avviene per le due tipologie di rinforzo ibrido considerate sulle murature regolari di mattoni. Si ritiene tuttavia opportuno verificare l’influenza di queste connessioni aggiuntive in prove sperimentali che chiamino in causa il comportamento flessionale della muratura.

Tabella 7. Comportamento post-picco.

Campione	$\gamma_{P_{max}}$ [%o]	$\gamma_{0,7}$ [%o]	γ_y [%o]	$P_{10,y}$ [kN]	Λ [-]
MP-1	0.324	0.105	0.150	144.01	0.89
MP-2	0.580	0.117	0.167	97.92	0.91
MP-1-I-N	4.958	0.484	0.691	243.04	0.99
MP-2-I-N	5.337	0.623	0.889	269.38	0.98
MP-1-I-P	6.102	0.594	0.848	229.74	0.98
MP-2-I-P	3.720	0.421	0.601	269.92	0.95
MP-1-R-N	3.184	0.616	0.879	144.44	0.89
MP-2-R-N	5.646	0.642	0.918	157.37	0.99
MD-1	0.184	0.069	0.099	102.17	0.85
MD-2	0.136	0.081	0.115	79.51	0.73
MD-1-I-V	2.152	0.466	0.665	124.00	0.92
MD-2-I-V	0.601	0.076	0.108	178.57	0.90
MD-1-I-O	1.192	0.024	0.034	185.63	0.97
MD-2-I-O	0.341	0.157	0.224	131.82	0.81
MD-1rip-I-V	9.486	0.864	1.235	120.08	0.94
MC-1	0.270	0.072	0.103	42.61	0.91
MC-2	0.664	0.197	0.281	43.45	0.87
MC-1-I-P	7.093	0.484	0.691	131.49	0.99
MC-2-I-P	4.817	0.930	1.328	98.57	0.90
MC-1-I-N	5.920	0.547	0.781	108.36	1.00
MC-2-I-N	6.193	0.392	0.560	106.45	0.99
MC-1-R-P	6.599	0.395	0.564	61.27	0.96
MC-2-R-P	5.295	0.531	0.758	67.41	0.97

CONCLUSIONI

Le prove di compressione diagonale eseguite in laboratorio hanno evidenziato che la tecnica di rinforzo ibrido con “Reticolatus” e intonaco armato con rete in GFRP determina un incremento di resistenza dell’87%, 44% e 112% rispettivamente per la muratura di pietrame sbizzato, di laterizi a due teste e di ciottoli di fiume. Il comportamento flessionale derivante dall’asimmetria di rinforzo è stato monitorato nel corso delle prove e, pur dipendendo dal rapporto fra le rigidzze dell’intonaco applicato e della muratura di supporto, è risultato in ogni caso contenuto e non ha precluso il miglioramento della resistenza a taglio.

Anche l’aumento di resistenza conseguente all’applicazione del rinforzo con “Reticolatus” su entrambe le facce è risultato dipendere sensibilmente dalle caratteristiche originarie della muratura su cui si interviene, infatti si è osservato un incremento del 17% per la muratura in pietrame e del 40% per quella in ciottoli.

Dal confronto dei valori del parametro Λ (rapporto fra il carico residuo corrispondente al raggiungimento di una prefissata deformazione e il carico massimo di prova) è inoltre emerso che entrambe le tecniche analizzate consentono un

miglioramento del comportamento post-critico della muratura.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro qui presentato è stato condotto con il contributo del progetto ReLUIS (2010-2013) Linea 2.3.1 – Sviluppo e analisi di nuovi materiale per l’adeguamento sismico.

Si ringrazia Fibre Net S.r.l. (UD) per la fornitura e la predisposizione dei pannelli testati.

Si ringrazia l’Ing. Andrea Cernigoi per la collaborazione durante l’esecuzione delle prove.

BIBLIOGRAFIA

- Baronio, G., Binda, L., Modena, C., 1993. Strengthening of masonries by injection techniques. *Proceedings of the Sixth North American Conference*. Philadelphia.
- Binda, L., Modena, C., Baronio, G., Gelmi, A., 1994. Experimental qualification of injection admixtures used for repair and strengthening of stone masonry walls. *Proceedings of the 10th International Brick/Block Masonry Conference*. Calgary.
- Borri, A., Corradi, M., Giannantoni, A., Speranzini, E., 2009. Ristilatura con SRG di Murature Storiche: Nuove Sperimentazioni, *ANIDIS*, 28 giugno-2 luglio 2009, Bologna.
- Borri, A., Castori, G., Corradi, M., Speranzini, E., 2011. Shear behavior of unreinforced and reinforced masonry panels subjected to in situ diagonal compression tests. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 4403-4414
- Brignola, S., Frumento, S., Lagomarsino, S., Podestà, S., 2009. Identification of shear parameters of masonry panels through the in-situ diagonal compression test, *Int. Journal. of Architectural Heritage*, 3, 52-73
- Corradi, M., Borri, A., Vignoli, A., 2008. Experimental evaluation of the in-plane shear behaviour of masonry walls retrofitted using conventional and innovative methods. *J. of the British Masonry Soc.*, 21(1), 29-42.
- Gattesco, N., Dudine, A., 2010. Il rinforzo di murature esistenti con intonaco e rete in GFRP. *Structural* n. 164, Anno XVIII – pag. 16-27. ISSN 1593-3970. Ed. De Lettera, Milano,
- Modena, C., 1994. Repair and upgrading techniques of unreinforced masonry structures utilized after the Friuli and Campania-Basilicata earthquake. *Earthquake Spectra*; 10(1): 171-185
- Parisi F., Iovinella I., Balsamo A., Augenti N., Prota A., 2011, Indagine sperimentale sulla resistenza a taglio della muratura di tufo rinforzata con materiali compositi a matrice inorganica, *XIV Convegno “L’Ingegneria Sismica in Italia”*, ANIDIS, 18-22 Settembre, Bari
- Prota, A., Marcari, G., Fabbrocino, G., Manfredi, G., Aldea, C. 2006. Experimental In-Plane Behavior of Tuff Masonry Strengthened with Cementitious Matrix-Grid Composites *Journal of Composites for Construction*, 10: 3, 223-233.

- RILEM TC., 1994. 76-LUM. Diagonal tensile strength tests of small wall specimens, 1991. In RILEM, Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. London: E& FN SPON, 488–489
- Tunseck, V., Cacovic, F., 1971. Some experimental result on the strength of brick masonry walls. *Preceedings of the 2nd international Brick Masonry Conference*, pp. 149-156, Stoke-on-Trent.
- Valluzzi, M.R , Tinazzi, D., Modena C., 2002. Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Construction and Building Materials* 16 (2002) 409–416