

Rinforzo di murature storiche: la tecnica del “reticolatus”

Antonio Borri, Marco Corradi, Emanuela Speranzini

Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università degli Studi di Perugia, via G. Duranti 93 – 06125 Perugia, Italia.

Andrea Giannantoni

Unilab s.r.l. – spin-off dell’Università di Perugia - Foligno (PG).



(FOTO DI APERTURA)

MURETTO DI PIETRAMME APPENA SBOZZATO, REALIZZATO CON MALTA DI MODESTE QUALITÀ MECCANICHE, RINFORZATO CON LA TECNICA DEL RETICOLATUS, RIBALTATO E MESSO IN ORIZZONTALE SU DUE APPOGGI .

SOMMARIO

Nel presente articolo viene descritta una tecnica di rinforzo denominata “reticolatus”, recentemente proposta dagli autori per il rinforzo di elementi in muratura realizzata con elementi anche irregolari (ad es. in pietrame) per i quali sia richiesto il mantenimento della caratteristica di faccia a vista. La tecnica consiste nell’inserimento nei giunti di malta di un reticolato continuo di piccoli trefoli in acciaio UHTSS, i cui nodi sono fissati mediante barre metalliche trasversali al paramento murario. Il risultato finale dell’intervento è quello di una muratura armata per la quale si ha un incremento delle caratteristiche meccaniche (resistenza a compressione, a taglio e a flessione), un efficace collegamento tra gli elementi murari contigui ed anche tra i paramenti della muratura, se vengono utilizzati adeguati connettori trasversali. L’intervento, che si propone come integrativo delle altre possibili tecniche, risulta sostanzialmente reversibile, inteso a rinforzare la muratura attraverso un presidio e non a sostituirla, compatibile con la conservazione materica del manufatto e durevole. Varie sperimentazioni, qui brevemente presentate, hanno dimostrato in modo convincente l’efficacia strutturale della tecnica in questione.

1 INTRODUZIONE

Il consolidamento ed il rinforzo degli elementi verticali nelle costruzioni in muratura soggette, oltre che al peso proprio, alle possibili azioni dinamiche, rappresenta uno degli interventi più importanti per il raggiungimento di un adeguato livello di sicurezza. Infatti, la scarsa qualità delle caratteristiche meccaniche delle murature e la mancanza di collegamento dei pannelli tra di loro e con gli orizzontamenti sono state molto spesso all'origine di crolli o di gravi dissesti, specie in occasione di eventi sismici.

Le tecniche impiegate per il ripristino o il rinforzo di costruzioni murarie, quali ad esempio lo "scuci e cuci" della muratura, la cucitura delle lesioni mediante perfori armati con barre metalliche, le cerchiature mediante nastri di materiale composito (particolarmente efficaci e, in fondo, poco invasive), le iniezioni nella muratura di miscele di boiaccia di cemento o a base calce, l'intonaco armato etc., presentano alcuni limiti (e qualche problematica) soprattutto nel caso di murature irregolari per le quali si voglia mantenere inalterato il paramento esterno.

Una tecnica che consente di conservare un paramento faccia a vista è quella della ristilatura profonda dei giunti, che consiste nello scarnire i giunti della muratura togliendo la malta originaria, per poi ristilarli con una malta di buona qualità. L'efficacia della tecnica, dal punto di vista dell'incremento delle caratteristiche meccaniche della muratura, risulta però limitata, specie nel caso di spessori murari consistenti.

Il sistema di intervento "reticolatus", di seguito sinteticamente riassunto, consente di intervenire su murature sia regolari che irregolari, con un impatto limitato, almeno rispetto ad altre metodologie, e si propone sia autonomamente sia ad integrazione di altre tecniche (ad esempio le iniezioni) e può fornire contributi rilevanti nei confronti sia di sollecitazioni orizzontali di tipo sismico, sia di azioni statiche verticali.

2 MATERIALI IMPIEGATI E REQUISITI RICHIESTI

Per la applicazione della tecnica sono impiegati i seguenti materiali:

a) trefoli in acciaio UHTSS (Ultra High Tensile Strength Steel), ricavabili da rotoli presenti sul mercato. I rotoli utilizzati, prodotti dalla Hardwire LLC., sono larghi circa 30 cm e di lunghezza variabile, sono costituiti da una serie di trefoli disposti parallelamente tra loro e tenuti insieme da una maglia di poliestere. Risulta semplice sfilare dal nastro i trefoli per poterli quindi utilizzare singolarmente. È possibile comunque servirsi anche di altri materiali, quale ad esempio funi di acciaio zincato o anche materiali compositi (funi o trefoli) purché di piccolo diametro, dotati di una adeguata resistenza a taglio ed applicabili con malta cementizia (se il caso lo consente) o a base calce.

b) barre di acciaio zincato, filettate all'estremità, che, mediante l'aggiunta di dado, rondella ed un "rosto reggi-cavo" (Fig. 1), consentono di trattenere il trefolo all'interno del giunto di malta.

La caratteristica più interessante dei trefoli UHTSS risiede nella dimensione molto ridotta (diametro medio tipico del trefolo: 1 mm) e nella forma stessa dei trefoli, ottenuti avvolgendo tra loro elicoidalmente i singoli cavi di acciaio (tipicamente 3-4 cavi) che portano ad una elevata aderenza e compatibilità tra i trefoli e la malta che li avvolge, garantendo così un ottimo comportamento meccanico dell'insieme "pietra-malta-trefolo". L'aspetto più rilevante, ai fini dell'applicazione qui proposta, risiede però nel fatto che le ridotte dimensioni consentono di curvare agevolmente e a piacimento i trefoli, per farli passare nei giunti tra i vari elementi lapidei costituenti la muratura (Fig. 2).

Per quanto concerne la compatibilità chimica dei materiali sopraelencati, sono state condotte alcune prove di corrosione che hanno fornito risultati positivi, anche in ambienti particolarmente aggressivi.

Comunque, nei casi in cui risulta essenziale avere la garanzia assoluta di durabilità e reversibilità a lungo termine, è opportuno applicare ai trefoli, prima della loro applicazione, una protezione preventiva (ad esempio una guaina plastica o un rivestimento a spruzzo). Del resto, per questo tipo di applicazione l'adesione tra trefolo e matrice, come vedremo, non risulta di fondamentale importanza, potendo contare su un meccanismo di mutuo confinamento tra maglie ed elementi lapidei. Questa soluzione, evidentemente, risolve ogni possibile problematica di conservazione e durabilità.

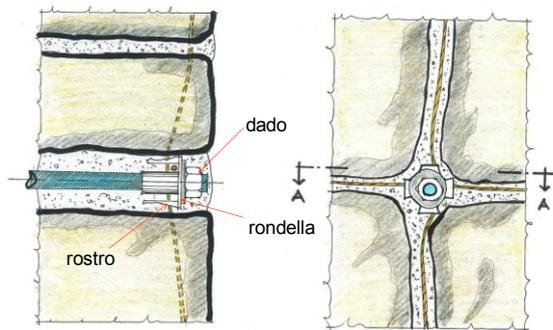


Figura 1: Aggancio delle barre filettate con dado, rondella e rostro reggi-cavo.

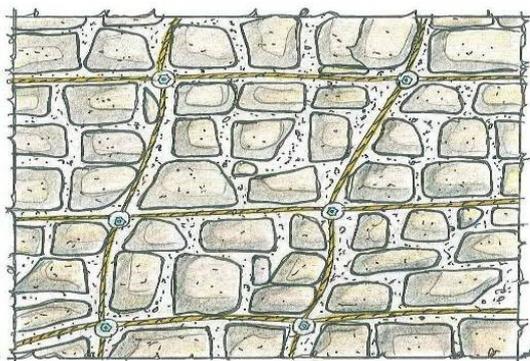


Figura 2: Maglia tipica del “reticolatus”.

3 TECNICA E CAMPO DI APPLICAZIONE

Il sistema di rinforzo “reticolatus”, consiste, in sintesi, nella scarnitura dei giunti di malta per una profondità di 6-8 cm, in una prima ristilatura dei giunti e nel successivo inserimento, negli stessi giunti, di una maglia continua costituita dai piccoli trefoli in acciaio UHTSS, i cui nodi sono fissati mediante le barre metalliche trasversali al paramento murario e nel successivo rabbocco di malta (cementizia o a base di calce) che va a ricoprire completamente sia i trefoli che le teste delle barre.

Gli elementi trasversali (barre filettate in acciaio zincato, tipicamente in numero minimo di 4 a metro quadro, comunque in funzione delle necessità progettuali e delle caratteristiche degli inerti lapidei) sono disposti secondo maglie per quanto possibile regolari. Le barre sono inserite fino ad interessare circa 15 cm di spessore murario, se si vuole garantire solo l’ancoraggio della maglia al paramento murario (ed in questo caso è sufficiente un diametro di 5-6 mm) oppure arrivano ad almeno i due terzi dello spessore del muro nel caso in cui si vuole ottenere anche un collegamento tra i paramenti (tipo diatoni) e in questo caso sarà necessario un diametro della barra più consistente.

L’inserimento della barra sulla faccia su cui si lavora avviene all’interno dei giunti di malta e la testa filettata della barra, comprensiva di dado, rondella e rostro reggi-cavo, deve restare all’interno della faccia su cui si sta lavorando per almeno 3-4 cm, in modo da poter essere efficacemente coperta dalla successiva ristilatura.

Poiché i trefoli sono flessibili e passano tra i rostri reggi-cavo degli elementi trasversali senza essere solidali a questi ultimi, è possibile disporli all’interno dei giunti della muratura, qualunque ne sia l’andamento. Successivamente, stringendo i dadi disposti sulle barre filettate, è possibile metterli anche leggermente in tensione (Fig.3).

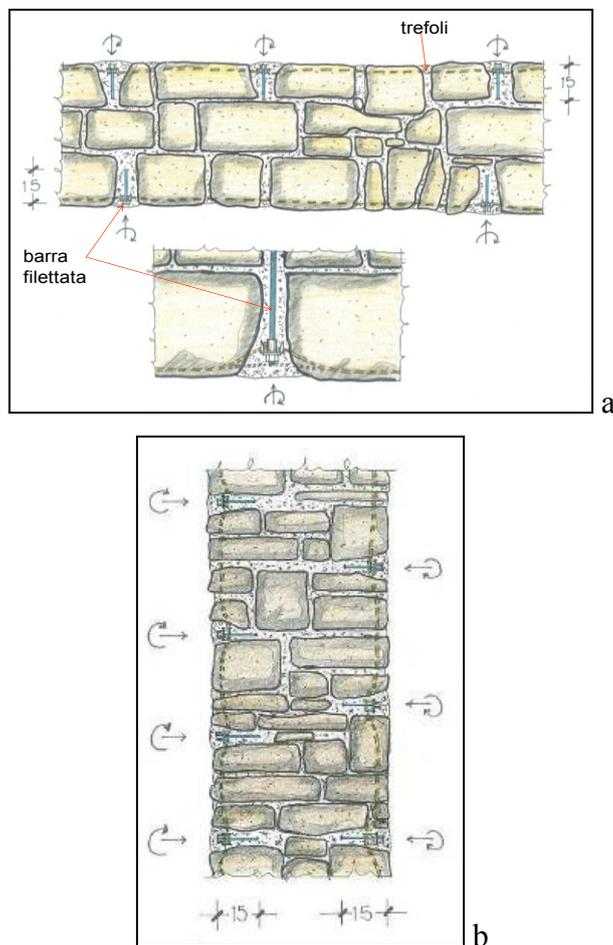


Figura 3a,b: Intervento con “reticolatus”: sezioni orizzontale e verticale del muro rinforzato.

L'ampiezza della maglia dipende dalle dimensioni e dalla forma degli inerti; in generale, comunque, non dovrà essere superiore allo spessore murario. A titolo di esempio, per le murature irregolari tipiche dell'Italia centrale, il passo può essere compreso tra 30 e 50 cm.

Per quanto riguarda la parte inferiore del pannello, i trefoli possono essere efficacemente ancorati girandoli intorno agli elementi lapidei alla base del pannello stesso o collegati alla fondazione (se esistente) attraverso perfori o connettori, a seconda dei casi.

In sommità i trefoli possono essere collegati con il cordolo (se presente) oppure, ad esempio nei muri di cinta, girati per andare ad interessare l'altra faccia del muro (Fig. 4).

Così facendo, lo “scheletro armato” della maglia continua inserita nella muratura, oltre a rinforzare il pannello murario, va a collegare tra loro i diversi elementi murari contigui (pannelli ortogonali adiacenti, orizzontamenti, fondazioni, etc.) costituendo quindi un vero e proprio sistema di rinforzo dell'intera fabbrica muraria, specie se proposto come integrativo delle attuali tecniche “tradizionali” di intervento. Le dimensioni ridotte degli elementi di rinforzo ed il loro agevole inserimento nei giunti di malta consentono di realizzare un intervento diffuso che evita nocive e pericolose concentrazioni di sollecitazioni.

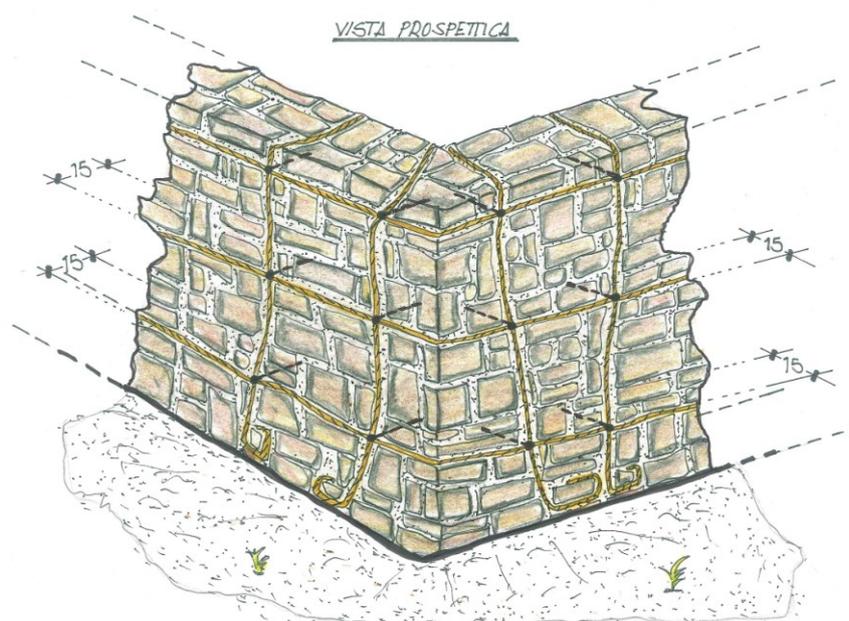


Figura 4: Intervento con “reticolatus”: la continuità dei trefoli può contribuire al collegamento tra gli elementi murari.

Le fasi operative per l’applicazione sono le seguenti:

- scarnitura dei giunti di malta della muratura, per una profondità media di 6-8 cm, avendo cura di non rimuovere la malta originale ove particolarmente resistente;
- idropulizia in pressione dei giunti scarniti, effettuando l’operazione alcune ore prima della successiva applicazione della malta;
- inserimento degli elementi trasversali (barre filettate in acciaio zincato complete di dado, rondella e rostro reggi-cavo);
- fissaggio delle barre alla muratura mediante l’utilizzo di malte antiritiro specifiche o di resine epossidiche;
- esecuzione del primo rabbocco di malta (cementizia o anche a base di calce, a seconda delle prescrizioni e delle indicazioni della committenza);
- inserimento dei trefoli in acciaio UHTSS all’interno dei giunti scarniti, passandoli per i rostri reggi-cavo, percorrendo secondo traiettorie sub-orizzontali o sub-verticali tutto il paramento su cui si interviene. Se non fosse sufficiente la lunghezza dei singoli trefoli, questi possono essere giuntati con resina o semplicemente, sovrapponendoli tra loro per circa 20 cm;
- se ritenuto necessario (ad esempio per incrementare ulteriormente la resistenza del pannello) si possono passare ulteriori trefoli in diagonale, sia in un senso che nell’altro;
- serraggio dei dadi per conferire una leggera pretensione ai trefoli;
- esecuzione del secondo rabbocco di malta dei giunti, ricoprendo completamente sia i trefoli che le teste dei fittoni o delle barre;
- finitura estetica della stilatura dei giunti mediante spazzolatura degli stessi con setole metalliche.

Dal punto di vista meccanico si possono attendere i seguenti possibili benefici:

1. incrementi delle caratteristiche meccaniche: sia della resistenza a compressione, che di quella a taglio, come anche delle capacità flessionali per azioni nel piano e ortogonali al piano della muratura;
2. capacità di collegare, in modo diffuso, le pareti verticali tra loro e le pareti verticali con gli orizzontamenti;
3. possibilità di fornire alla muratura quella resistenza a trazione che nel caso di murature irregolari (dove spesso si hanno giunti verticali allineati) non riesce a beneficiare nemmeno dell’effetto catena presente nelle murature regolari con ortostati e giunti ben sfalsati;
4. collegamento trasversale tra i paramenti della muratura, dimensionando opportunamente le barre trasversali disposte come diafani artificiali, capaci di dare monoliticità al pannello murario, opponendosi al distacco tra i paramenti e fornendo una adeguata resistenza a trazione (necessaria anche in presenza dei soli carichi verticali) e a taglio (necessaria nel caso di azioni che tendano a far ribaltare il pannello murario, e quindi a far scorrere tra loro i paramenti).

Il sistema proposto può essere utilizzato sia a livello locale, ad esempio per singoli pannelli murari di edifici esistenti (mura di cinta, mura urbiche, etc.), sia a livello globale, ovvero come sistema di rinforzo di una costruzione in muratura nel suo comportamento di insieme, con particolare, ma non esclusivo, riferimento al comportamento in presenza di sisma.

4 SPERIMENTAZIONI

Al fine di indagare sulla efficacia della tecnica di rinforzo proposta sono state eseguite tre diverse serie di prove sperimentali: prove di compressione con la tecnica dei martinetti piatti doppi, prove di compressione diagonale, prove di flessione.

4.1 Caratterizzazione delle fibre metalliche

Le fibre utilizzate nella sperimentazione per la realizzazione del composito SRG sono prodotte dalla Hardwire LLC. La particolarità di tali materiali è la loro conformazione a livello macroscopico: le fibre sono costituite da trefoli di filamenti di acciaio ad alta resistenza ricoperti esternamente da uno strato di ottone (Fig. 5) che ha la finalità di aumentare l'aderenza delle fibre alla matrice.

L'affiancamento di tali trefoli metallici ed il loro incollaggio su delle sottili maglie di poliestere permette il confezionamento dei prodotti sottoforma di nastri avvolti su bobine (Fig. 5).



Figura 5: Un rotolo di fibre metalliche ad alta resistenza e particolare dei trefoli metallici utilizzati per la ristilatura armata (tipo 3X2).

4.1.1 Fibra 3X2

La fibra 3X2 è costituita da trefoli in acciaio ad alto contenuto di carbonio rivestite superficialmente da uno strato di ottone. Il trefolo è ottenuto avvolgendo insieme ad elica cinque singoli filamenti: tre di loro sono avvolti esternamente dai rimanenti due. Le caratteristiche geometriche e meccaniche di un singolo trefolo 3X2 sono riportate in tabella 1. Le caratteristiche meccaniche del trefolo 3x2 sono state verificate attraverso prove di trazione realizzate su 8 provini. I risultati hanno sostanzialmente confermato i valori indicati nella scheda tecnica del produttore con piccole variazioni del carico di rottura a trazione (1383 N) e della deformazione a rottura (2.2 %).

Tabella 1. Caratteristiche dei singoli trefoli (dalla scheda tecnica del produttore).

Tipo di fibra	3X2
Area effettiva di un trefolo (mm ²)	0.481
Carico di rottura a trazione di un trefolo (N)	1539
Densità (g/m)	18.45
Deformazione a rottura del nastro (%)	1.6

4.2 Prove di compressione con martinetti piatti doppi

Le prove con martinetti piatti doppi sono state eseguite sulle mura urbiche (muratura di pietra appena sbazzata legata da una debole malta di calce idraulica) di Trevi (Foligno), sottoponendo a compressione uniassiale fino a rottura, porzioni di murature dell'altezza di circa 50 cm. Durante la prova sono stati registrati i valori della pressione esercitata e della deformazione della muratura ai vari step di carico, che opportunamente elaborati hanno fornito i diagrammi tensioni σ - deformazioni ϵ (Fig. 6). Dai diagrammi sono stati ricavati la resistenza a compressione ed il modulo di elasticità normale calcolato in corrispondenza del 33% della tensione massima.

La rottura degli elementi in muratura non rinforzata è avvenuta al formarsi di una serie di lesioni verticali tra i due martinetti piatti. Non si è verificata una sostanziale differenziazione nella modalità di rottura tra la muratura non rinforzata, quella ristilata e quella rinforzata con fibre metalliche. È di interesse rilevare che nel caso della muratura non rinforzata e di quella ristilata, la rottura si è manifestata con poche lesioni verticali di notevole dimensione, mentre nel caso della muratura rinforzata con reticolatus è stato osservato un numero maggiore di lesioni verticali di dimensioni minori, il che denota un miglioramento del comportamento meccanico della muratura per una probabile diminuzione di concentrazione delle tensioni massime all'interno del materiale muratura.

I risultati, riportati in Tabella 2 e Figura 6, riguardano la muratura non rinforzata (sigla URM), la muratura rinforzata con sola ristilatura (sigla REP) e la muratura rinforzata con la tecnica del reticolatus (sigla SRE). È possibile osservare che la tecnica di rinforzo reticolatus, è in grado di incrementare significativamente la resistenza a compressione della muratura: è stato misurato un valore medio di 1.29 MPa con un incremento della resistenza del 116% rispetto alla resistenza a compressione della muratura non rinforzata ($\sigma_{\max} = 0.595$ MPa). Inoltre l'incremento medio di resistenza della muratura rinforzata con sola ristilatura ($\sigma_{\max} = 0.834$ MPa) è di circa 40% rispetto alla muratura non rinforzata.

Tabella 2: Risultati delle prove con martinetti piatti doppi.

	Resistenza a compressione σ_{\max} (MPa)	Rigidezza $E_{1/3}$ (MPa)
URM 01	0.595	480
REP 02	0.807	393
REP 03	0.857	512
SRE 04	1.261	486
SRE 05	1.312	2416

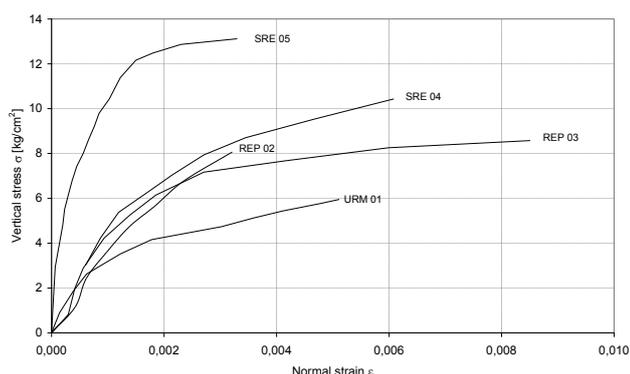


Figura 6: Diagramma $\sigma - \epsilon$ risultante dalle prove con martinetti piatti doppi.

4.3 Prove di taglio

Per valutare l'efficacia del rinforzo nei confronti di sollecitazioni di taglio sono state eseguite prove di compressione diagonale, definite dalla normativa ASTM E 519, su tre pannelli in muratura di pietra ricavati da una cartiera nella frazione di Pale (Foligno). L'edificio risale al XVII secolo. I pannelli, dello spessore di cm 53, costituiti da pietrame appena sbizzato (di travertino bugnato e rocce calcaree compatte) e da malta a base di calce dalle deboli proprietà meccaniche, erano conformati da due paramenti debolmente ammorati con assenza di diatoni.

I pannelli sono stati tagliati ad una dimensione di 120x120 cm e quindi è stata applicata una serie di profilati metallici disposti ai due spigoli di una delle due diagonali del pannello, collegati tramite barre. In uno dei due spigoli è stato applicato un martinetto tale da sollecitare il pannello fino a rottura lungo una delle due diagonali. Le diagonali di entrambe le facce del pannello sono state strumentate con due trasduttori induttivi di spostamento (Fig.7). Durante la prova sono stati registrati il carico applicato e la variazione di lunghezza delle diagonali.

I risultati in termini di resistenza τ_k e rigidezza a taglio $G_{1/2}$ sono mostrati in Tabella 3 e in Figura 8 dove si evince che le diverse tecniche di rinforzo applicate (ristilatura o reticolatus) hanno determinato incrementi significativi della resistenza.



Figura 7: Pannello strumentato per prove diagonali.

In particolare, il reticolatus e la ristilatura profonda hanno fornito rispettivamente un incremento della resistenza a taglio rispettivamente del 117% e del 35% rispetto alla muratura non rinforzata. Si può notare quindi che per la τ_k si ottiene un incremento percentuale simile a quello registrato per la resistenza a compressione nella precedente serie di prove. Meno significativi gli incrementi del modulo di elasticità tangenziale $G_{1/2}$, calcolato in questo caso ad $\frac{1}{2}$ della resistenza a taglio delle muratura: nel caso del reticolatus è stato ottenuto il valore di 653 MPa rispetto al valore di 541 MPa della muratura non rinforzata.

Tabella 3: Risultati delle prove diagonali.

Tipo di rinforzo	Resistenza a taglio τ_k (MPa)	Rigidezza a taglio $G_{1/2}$ (MPa)
DC01 Non rinforzato	0.029	541
DC02 - Ristilatura profonda	0.039	1403
DC03 Reticolatus	0.063	653

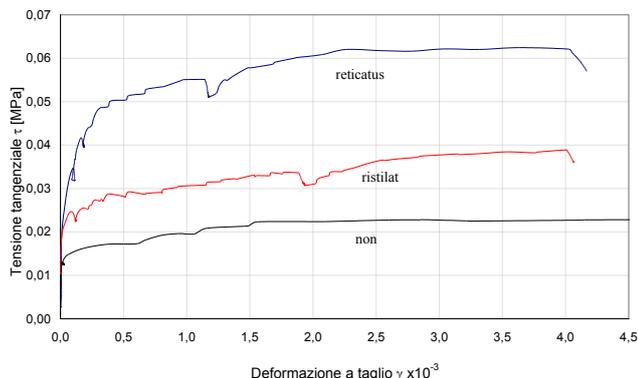


Figura 8: Diagramma $\tau - \gamma$ risultante dalle prove diagonali.

4.4 Prove a flessione su pannelli

Al fine di indagare sull'efficacia del sistema di rinforzo proposto è stata condotta una nuova indagine sperimentale, realizzando due pannelli di muratura di pietrame rinforzati con la tecnica reticolatus.

I due pannelli sono stati successivamente ruotati e disposti in orizzontale, sottoponendoli quindi ad una prova di flessione particolarmente severa, anche solo per l'elevato peso proprio di questa tipologia muraria.

4.4.1 Preparazione dei pannelli

I pannelli sono stati costruiti con pietrame calcareo appena sbizzato proveniente dalla demolizione di murature esistenti e malta bastarda dalle modeste proprietà meccaniche. I pannelli sono costituiti da due paramenti uno (pannello n. 1) senza alcun ingranamento, l'altro (pannello n. 2) debolmente ammortato. A maturazione avvenuta i due pannelli sono stati rinforzati con la tecnica in oggetto, utilizzando gli stessi trefoli tipo 3X2 della Hardwire LLC precedentemente utilizzati, seguendo le seguenti fasi operative:

- inserimento e fissaggio con resina delle barre filettate con dado, rondella e rostro reggi-cavo contenuti all'interno della superficie del pannello (Fig. 9);

- posa in opera dei trefoli in direzione sub verticale e sub orizzontale all'interno dei giunti, passandoli per il reggi-cavo;
- serraggio dei dadi, con conseguente pretensione ai trefoli;
- ristilatura dei giunti, in modo da rivestire completamente i trefoli e ricoprire le rondelle e dadi.



Figura 9: Particolare del passaggio dei trefoli nei nodi del “reticolatus” .

Nel primo pannello (dimensioni: 50 x 268 x 100 cm) sono stati inseriti, secondo la direzione di maggior lunghezza del pannello, 12 trefoli/metro, raggruppati mediamente a gruppi di quattro, disposti con continuità, senza alcuna interruzione, su entrambe le facce (Fig. 10).

Nella faccia che nella prova verrà poi disposta all'intradosso (quindi in zona tesa) sono stati aggiunti nella direzione della maggior lunghezza altri 12 trefoli a metro, sempre mediamente a gruppi di quattro, per un totale di 24 trefoli/m.

Nella direzione trasversale sono stati inseriti, passando ancora per i ganci del rostro reggi-cavo, 68 trefoli (quindi 24 trefoli/metro) disposti in modo da realizzare una maglia reticolare che fascia la struttura.

In sintesi, nella direzione longitudinale sono stati applicati 24 trefoli/metro all'intradosso e 12 trefoli/metro all'estradosso, mentre nella direzione trasversale sono stati inseriti 24 trefoli/metro, per complessivi 324 m di trefoli applicati.



Figura 10: Il pannello n. 1: prospetto e sezione

Il secondo pannello (40 x 180 x 198 cm) è stato rinforzato in modo analogo al precedente, disponendo ancora 12 trefoli/m su entrambe le facce e in entrambe le direzioni, ed integrando la faccia che sarà disposta all'intradosso con un eguale numero di trefoli (Fig. 11), ottenendo quindi 24 trefoli/metro nelle due direzioni all'intradosso e 12 trefoli/metro nelle due direzioni all'estradosso, per un totale di 175 m di trefoli applicati.

In entrambi i pannelli, la ristilatura è stata eseguita con malta bastarda dalle modeste proprietà meccaniche ed ha interessato una profondità media di circa 7 cm. I trefoli sono stati inseriti ad una profondità di 3-4 cm.



Figura 11: Il secondo pannello sottoposto a prova di flessione.

4.4.2 Prima prova

Il primo pannello è stato disposto su un piano orizzontale, appoggiandolo alle estremità. La prova di carico è stata realizzata su quattro punti (*four-point bending*) su una luce di 208 cm con una distanza tra i coltelli di carico di 38 cm. Gli appoggi sono stati realizzati mediante due travi di legno a sezione quadrata di lato 24 cm, mentre per i coltelli di carico sono stati utilizzati murali di legno di lato 10 cm (Fig. 12).

Il pannello è stato sollecitato, oltre che dal peso proprio (valutabile in 2200 Kg/m^3), attraverso l'applicazione di un carico crescente con gradienti di 150 kg, distribuito tra i due coltelli di carico. Gli abbassamenti sotto carico sono stati misurati attraverso sei comparatori centesimali disposti su entrambi i lati del pannello, in mezzzeria, ad $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ della luce. Per non rischiare il danneggiamento dei comparatori, in prossimità della rottura del pannello le attrezzature di misura di cui sopra sono state tolte.



Figura 12: Pannello n.1, disposto in orizzontale, su due appoggi, caricato a flessione.

Il pannello ha raggiunto una situazione critica ad un carico di circa 600 kg (dopo di che, per sicurezza, è stata rimossa la strumentazione di misura) corrispondente ad un momento flettente massimo di 255 kgm, che si aggiungono ai 595 kgm derivanti dal peso proprio (Fig. 13).

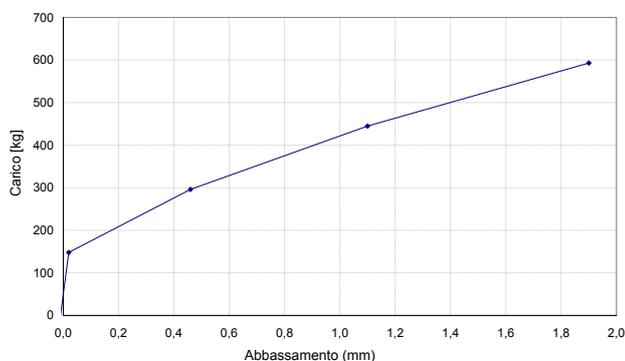


Figura 13: Grafico carico-abbassamento in mezzzeria.

Per quanto riguarda le modalità di rottura del pannello, alcune lesioni parallele agli appoggi si sono aperte in zona tesa a partire dal terzo step di carico (450 kg). Il collasso del pannello si è verificato ad un livello del carico di 650 kg, quando la tensione nei trefoli nella zona intradosale ha portato alla disgregazione e alla espulsione della muratura confinata nelle maglie del reticolatus (in particolare negli

spigoli del pannello) e quindi alla fuoriuscita dei trefoli stessi dai giunti di malta, rendendo a questo punto inefficace il rinforzo (Fig. 14).

Facendo un confronto con una situazione di carico uniformemente distribuito equivalente a quello applicato nel caso in esame, il pannello si è rotto per un carico uniforme (comprensivo di peso proprio) pari a 1610 kg/m.



Figura 14: Rottura del pannello n. 1.

4.4.3 Seconda prova

Anche il secondo pannello (40 x 180 x 198 cm) è stato sottoposto ad una prova di flessione su quattro punti. In questo caso il pannello risulta significativamente più tozzo rispetto al precedente. Il carico, pressoché concentrato in mezzeria determina un'azione di punzonamento sul pannello che mobilita principalmente la resistenza a taglio fuori dal piano.

Il pannello è stato provato su una luce di 124 cm (lungo il lato di 180 cm) mentre il carico è stato applicato mediante due profilati metallici tipo HEA posti ad una distanza di 35 cm con carichi crescenti a step di 100 kg (Fig. 15).

Il risultato della prova appare particolarmente significativo ai fini della dimostrazione dell'efficacia della tecnica di rinforzo proposta. Infatti, il pannello non ha raggiunto la rottura, pur avendo applicato un carico di circa 2000 kg, a cui corrisponde un carico uniforme equivalente (comprensivo di peso proprio) pari a 4100 kg/m (Fig. 16).

Il pannello non è stato portato fino al collasso, sia per la difficoltà di procedere con ulteriori carichi aggiuntivi, sia per lasciarlo disponibile ad una successiva prova.



Figura 15: Prova sul pannello n. 2.

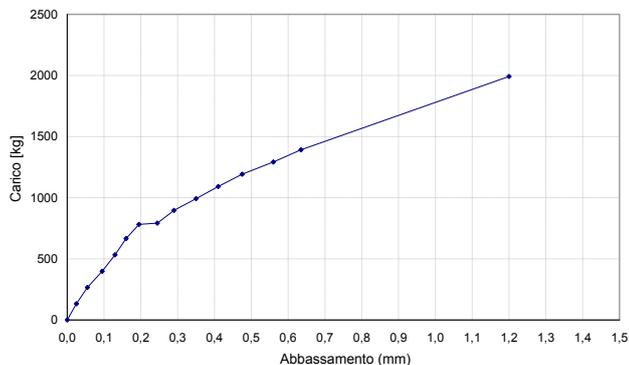


Figura 16: Grafico carico-abbassamento in mezzeria.

4.4.4 Considerazioni sui risultati

Le due prove sperimentali sopra descritte hanno fornito risultati molto brillanti, se si pensa che i pannelli sono stati testati a flessione, situazione molto gravosa per manufatti di questo tipo.

Una valutazione preventiva dei carichi di rottura, basata sulla verifica semplificata a flessione delle due strutture rinforzate, e considerando, per semplicità, i trefoli come se fossero disposti tutti paralleli tra loro nella direzione della sollecitazione flessionale (ovvero come se si trattasse di una trave in muratura armata) avrebbe fornito valori stimabili in circa 1800 kg per il pannello 1 e di 8000 kg per il pannello 2, assumendo per la resistenza a compressione della muratura un valore medio tipico per la tipologia in questione.

Tali valori corrispondono però ad una rottura per crisi a trazione dei trefoli in zona tesa, meccanismo che non è stato raggiunto per il caso esaminato (pannello n. 1) anticipato dalla fuoriuscita e dal disgregarsi della muratura all'intradosso che ha preceduto tale tipologia di collasso. La disgregazione della muratura in zona tesa peraltro è stata agevolata in questa situazione particolare (muratura disposta in orizzontale) dalla pezzatura piuttosto grande dei blocchi che, trovandosi "appesi" all'intradosso tendono a cadere verso il basso scorrendo lungo i giunti di malta, agevolati dal loro peso. Nella realtà (muro disposto in verticale) il comportamento nei maschi murari evidentemente è ben diverso, dato che il peso proprio agisce nel piano del pannello.

Quanto sopra evidenzia comunque la necessità di individuare un modello che possa descrivere in modo più aderente alla realtà il comportamento meccanico della muratura rinforzata con la tecnica qui proposta.

Nel paragrafo che segue il problema viene affrontato in modo ancora semplificato; si prevede comunque di approfondire l'argomento in modo più adeguato in successivi lavori.

5 MODELLAZIONI E VERIFICHE

Nel progettare un intervento di rinforzo di un pannello murario con il sistema proposto, soggetto a carichi verticali e orizzontali, i meccanismi di collasso possono sostanzialmente essere riassunti in: taglio, taglio-scorrimento e flessione per azioni nel piano e fuori dal piano del pannello. I trefoli in acciaio disposti in modo diffuso su entrambe le superfici esterne del pannello contribuiscono a rinforzare la muratura per contrastare il formarsi di tali meccanismi. Si realizza quindi una vera e propria muratura armata dove gli sforzi di compressione sono assorbiti dalla muratura in pietra e quelli di trazione dai trefoli.

Per il dimensionamento/verifica degli elementi di rinforzo, si può ricorrere allo studio della generica sezione avvalendosi dell'ipotesi di sezione piana che è accettabile poiché il pannello assume una maggior compattezza a seguito dell'inserimento degli elementi trasversali.

La verifica a pressoflessione, sia per azioni nel piano che fuori del piano del pannello, può essere condotta come per una qualsiasi sezione eterogenea assumendo un diagramma delle tensioni di compressione pari a $0.85 f_{md}$ ed esteso alla porzione di sezione profonda il 60-80% della distanza dell'asse neutro dal lembo compresso.

Per la verifica a taglio, essendo garantita la formazione del traliccio resistente dalla presenza delle barre verticali, la resistenza di progetto è fornita dalla somma del contributo a taglio della muratura e di quello a taglio conseguente alla resistenza a trazione dei rinforzi.

Il meccanismo di taglio scorrimento diventa di rilievo nelle pareti isolate dove si genera una limitata resistenza di attrito, causa l'esigua entità del carico assiale. In tale meccanismo hanno un ruolo essenziale

i trefoli verticali che impediscono lo scorrimento lungo i ricorsi orizzontali di malta di una parte di muratura rispetto all'altra, quando la spinta orizzontale ha superato la resistenza d'attrito lungo il giunto di malta. La resistenza a taglio-scorrimento del pannello rinforzato deriva dalla combinazione di due meccanismi resistenti: il contributo trasmesso per attrito dalla muratura e il contributo conseguente alla resistenza a trazione dei rinforzi.

Per una verifica cautelativa, la resistenza a taglio-scorrimento può essere valutata utilizzando la seguente relazione (Tassios, 1988):

$$V_{Rd,slid} = 1.3A_{tw} \left(\frac{1}{\gamma_{Rd}} \right) (f_{td} f_{md})^{0.5} \quad (1)$$

dove A_{tw} è l'area dei trefoli perpendicolari all'azione di taglio, γ_{Rd} è il coefficiente parziale per i modelli di resistenza, f_{td} e f_{md} sono rispettivamente la resistenza di progetto a trazione dei trefoli e a compressione della muratura.

6 CONCLUSIONI

Il rinforzo delle murature irregolari con la tecnica proposta fornisce un incremento della resistenza a compressione, a taglio e a flessione e un efficace collegamento trasversale tra i paramenti della muratura, interessando l'intera fabbrica muraria grazie alla maglia continua di trefoli inserita all'interno della muratura. L'intervento, che può essere utilizzato sia localmente per singoli pannelli che globalmente per migliorare il comportamento d'insieme di intere costruzioni, risulta particolarmente indicato per le murature faccia a vista di edifici vincolati ai sensi della legge di tutela degli edifici e dei manufatti in genere di interesse storico e architettonico. Infatti, è poco invasivo, sostanzialmente reversibile, durevole, in grado di integrare la muratura e non di sostituirla, e quindi compatibile con i principi di conservazione del manufatto. Tipicamente, quindi, le costruzioni storiche, ed anche i beni archeologici, possono trovare nel sistema proposto una risposta adeguata ad alcuni dei loro problemi strutturali, capace, in numerosi casi, di contemperare l'esigenza di raggiungere elevati livelli di sicurezza con le istanze della tutela e della conservazione.

BIBLIOGRAFIA

- ASTM E 519-81. 1981. Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages, *American Society for Testing Materials*.
- Binda, L., Modena, C., Baronio, G. and Abbaneo, S. 1997. Repair and investigation techniques for stone masonry walls, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 11, (3), 133-142.
- Borri, A., Corradi, M., Speranzini, E., Giannantoni A. 2008. Consolidation and Reinforcement of Stone Walls using a Reinforcement Repointing Grid”, *6th International Conference of Structural Analysis of Historical Construction*, Bath, England.
- Cecchi, A., Milani, G. and Tralli, A. 2004. In-plane loaded CFRP reinforced masonry walls: Mechanical characteristics by homogenisation procedures, *Composites Science and Technology*, (64), 13-14, 2097-2112.
- Chiostrini, S. and Vignoli, A. 1994. In-situ determination of the strength properties of masonry walls by destructive shear and compression tests, *Masonry International*, 7, (1) 87-96.
- CNR DT 200-2004: Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati.
- Corradi, M., Tedeschi, C., Binda, L., Borri, A. 2008. Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: deep repointing. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 22/4, 463-472.
- Corradi, M., Borri, A., Vignoli, A. 2008. Experimental evaluation of in-plane shear behaviour of masonry walls retrofitted using conventional and innovative methods, *Masonry International*, Vol. 21, No. 1, 29-42.
- Dolce, M. and Marnetto R. CAM technology, patent.
- Elgawady, M.A., Lestuzzi, P., Badoux, M. 2006. Analytical model for the in-plane shear behavior of URM walls retrofitted with FRP, *Composites Science and Technology*, Elsevier, (66), 459-474.
- Eurocode 6. 1995. Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for buildings – Rules for reinforced and unreinforced masonry. ENV 1996-1-1.
- Gabor, A., Bennati, A., Jacquelin, E. and Lebon, F. 2006. Modelling approaches of the in-plane shear behaviour of unreinforced and FRP strengthened masonry panels, *Composite Structures*, Elsevier, (74), 277-288.
- Gregorczyk, P., Lourenço, P.B. 2000. A review on flat jack testing, *Engenharia Civil*, n.9. 39-50.

- Sofronie, R.A., Bolander, J.E. (2001) New Repair and Rehabilitation Technologies for Masonry Buildings, *ASCE Conf. Proc.* 272, 15, DOI:10.1061/40613 (272)15.
- Tassios, P. T. 1988. Masonry mechanics , *Liguori Publ.*, Napoli, (Italian Translation).
- Tomazevic, M., Alih, V. 1993. The strengthening of stone-masonry walls by injecting the masonry-friendly grouts. *7th European Conf. On Earthquake Engineering*, 1, 10-20.
- Turco, V., Secondin, S., Morbin, A., Valluzzi, M.R., Modena C. 2006. Flexural and shear strengthening of un-reinforced masonry with FRP bars, *Composites Science and Technology*, Elsevier, 66, 289–296
- Vintzileou, E., Tassios, T.P. 1995. Three-leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts, *Journal of Structural Engineering*, 121, (5), 848-856.

RICONOSCIMENTI

I pannelli testati a flessione sono stati realizzati dalla Impresa Sepe di Napoli, che ha anche contribuito, insieme alla Unilab srl (spin off della Università di Perugia) alle esecuzioni delle prove di carico. I trefoli in acciaio UHTSS, della Hardwire LLC, sono stati forniti dalla FIDIA srl.

La tecnica del “Reticolatus” è stata oggetto di deposito di brevetto industriale da parte dei loro ideatori (Borri, Giannantoni e Speranzini) con la sola finalità del riconoscimento della “paternità” di tale proposta. Viene lasciata a chiunque piena possibilità di impiego della tecnica del “Reticolatus”, purché, ove adottata, sia citata in modo esplicito.