

Consolidamento e rinforzo di murature storiche mediante un reticolato di ristilature armate

A. BORRI - M. CORRADI - A. GIANNANTONI - E. SPERANZINI

Viene presentata una nuova tecnica di rinforzo, particolarmente adatta per costruzioni murarie irregolari come le murature in pietra, quando sia richiesto la conservazione della muratura faccia a vista. La tecnica, denominata "Reticolatus", consiste nell'inserimento nei giunti di malta di un reticolato continuo di sottili trefoli in acciaio UHTSS, i cui nodi sono fissati mediante barre metalliche trasversali al paramento murario. Il risultato è quello di una muratura armata per la quale si possono ottenere, come già confermato dalle prime sperimentazioni, sia incrementi della resistenza a compressione, a taglio e a flessione che un efficace collegamento trasversale tra i paramenti della muratura. L'intervento risulta poco invasivo, sostanzialmente reversibile, inteso ad integrare la muratura e non a sostituirla, compatibile con la conservazione materica del manufatto e durevole. Viene infine proposta una formulazione per il dimensionamento del rinforzo e per la valutazione della capacità resistente del pannello rinforzato.

1. INTRODUZIONE

Il consolidamento ed il rinforzo degli elementi murari verticali nelle costruzioni in muratura soggette, oltre che al peso proprio, anche alle possibili azioni dinamiche (sisma, vento), rappresenta uno degli interventi più importanti per il raggiungimento di un adeguato livello di sicurezza.

Infatti, la scarsa qualità nelle caratteristiche meccaniche delle murature (resistenza a compressione, resistenza a taglio, etc.), in particolare negli edifici storici, è stata molto spesso la causa di crolli o di gravi dissesti, ad esempio (ma non solo) in occasione di eventi sismici.

Un altro elemento che influisce particolarmente sul comportamento sismico di una costruzione in muratura è il collegamento tra i pannelli murari verticali tra loro ed il collegamento di questi con gli orizzontamenti. Se presenti ed efficaci questi collegamenti possono consentire alla costruzione, attraverso un comportamento di tipo "scatolare", una adeguata risposta alle sollecitazioni dinamiche senza perdita di equilibrio di singole porzioni.

In assenza di questi collegamenti ogni singolo elemento (un muro, un solaio, etc.) risulta più vulnerabile, essendo libero di crollare indipendentemente dal resto della costruzione.

Varie sono le tecniche attualmente impiegate per il rinforzo di costruzioni murarie; per quanto riguarda le tipologie di interventi di rinforzo di pannelli murari, si possono qui ricordare:

A) interventi intesi a ripristinare la continuità interna in solidi murari che hanno subito fessurazioni, come le operazioni di "scuci e cucì" della muratura o di "cucitura" delle lesioni mediante perfori armati con barre metalliche.

B) interventi intesi a collegare tra loro i diversi elementi murari: oltre alle cuciture sopra citate, che possono essere impiegate nei cantonali o nei martelli murari, si possono qui citare le cerchiature mediante nastri di materiale composito (a base di fibre di carbonio o di vetro o altro) particolar-

mente efficaci e, in fondo, poco invasive. Come elemento non positivo è da citare il fatto che l'intervento resta visibile e quindi non molto adatto per murature faccia a vista.

C) interventi volti a rinforzare la muratura. Qui si possono menzionare:

C1) le iniezioni nella muratura di miscele (tipicamente: boiaccia di cemento o a base calce) che hanno lo scopo di riempire i vuoti all'interno del pannello murario, ed anche di ripristinare la malta originaria, spesso di scarsa consistenza. Questa tecnica però risulta poco efficace nel caso di murature con un basso indice dei vuoti (caso peraltro piuttosto frequente), ed inoltre non è semplice verificare la effettiva diffusione della malta iniettata all'interno del pannello.

C2) l'intonaco armato, consistente nella realizzazione di due paretine in c.a. collegate tra loro mediante connettori metallici. Questa tecnica viene spesso utilizzata per rinforzare le murature irregolari e di scarsa qualità; ha indubbiamente una elevata efficacia meccanica, ma è molto invasiva: la muratura interna è, di fatto, "persa" sotto tutti i punti di vista, non solo perché non più visibile, ma soprattutto perché soggetta nel tempo ad un rapido degrado. Un altro aspetto negativo è che il nuovo pannello murario presenta, rispetto a quello originario una rigidità molto superiore (con risvolti spesso negativi sul comportamento strutturale del manufatto).

C3) Altra tecnica utilizzata è quella della ristilatura profonda dei giunti, che consiste nello scarnire i giunti della muratura togliendo la malta originaria di scarsa qualità, per una profondità di qualche centimetro (tipicamente 6-8 cm), e poi ristilare i giunti con una malta di buona qualità. Se l'operazione viene eseguita su entrambe le facce del paramento murario e lo spessore di questo non è eccessivo, l'intervento raggiunge un certo livello di efficacia.

Se la muratura è di mattoni si possono anche inserire nei giunti delle piccole barre metalliche (ristilatura armata) che possono fornire al pannel-

lo un notevole incremento di resistenza. E' chiaro però che anche piccole irregolarità nella tessitura muraria portano a interventi di taglio dei laterizi che possono risultare poco conformi ai principi di conservazione delle costruzioni storiche.

Nel caso di muratura irregolare (pietre di varia forma e dimensione e quindi giunti non rettilinei) la ristilatura armata risulta di fatto improponibile, poiché le barre di armatura, pur se di piccolo diametro, non possono seguire la forma irregolare dei giunti.

C4) Altra tecnica proposta di recente è quella che consiste essenzialmente in un sistema di tirature diffuse nelle tre direzioni ortogonali (sistema CAM - Dolce et al), che possono essere anche messe in tensione. La tecnica ha certamente una elevata efficacia meccanica, migliorando la monoliticità ed il comportamento meccanico del corpo murario, ma è scarsamente proponibile nel caso di edifici storici, dato il forte impatto sulla conservazione della materia storica.

Lo scopo principale della tecnica proposta nel presente articolo è quello di eliminare, o quanto meno ridurre gli inconvenienti sopra citati.

Il sistema proposto può essere utilizzato sia a livello locale, ovvero per singoli pannelli murari di edifici esistenti (come anche per mura di cinta quali, ad es., le mura urbane di una città), 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.

Il sistema consente di intervenire su murature, sia regolari che irregolari, senza l'impatto e l'invasività di altre tecniche, e quindi 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.

I miglioramenti conseguibili non risiedono solo in un miglioramento puntuale delle caratteristiche meccaniche della muratura su cui si interviene. Infatti, lo "scheletro armato" della maglia continua inserita nella muratura (cui è stato dato il nome di "Reticolatus"), 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 completo di rinforzo dell'intera fabbrica muraria.

Le dimensioni ridotte degli elementi di rinforzo ed il loro agevole inserimento nei giunti di malta consentono inoltre di realizzare un intervento diffuso che evita nocive e pericolose concentrazioni di sollecitazioni come invece si hanno, ad esempio, con l'impiego di barre metalliche.

2. DESCRIZIONE DEL SISTEMA

Il "Reticolatus", in sintesi, è costituito da una maglia continua realizzata con piccolissimi trefoli in acciaio UHTSS o in altro materiale composito, perfettamente inserita nei giunti di malta ed inglo-

bata così in modo naturale nella muratura (cioè senza intaccare gli elementi lapidei).

Tale tecnica di rinforzo può essere applicata sia a murature regolari (mattoni di laterizio o blocchi lavorati) sia a murature irregolari (elementi lapidei naturali di varia forma e dimensione); è comunque per questo secondo caso, nel quale spesso si ha anche una maggiore necessità di incrementare le caratteristiche meccaniche della muratura, che la tecnica proposta presenta un maggiore interesse, dato che le possibilità offerte dalle tecniche attuali possono avere scarsa (o dubbia) efficacia (ristilatura non armata o iniezioni in murature poco iniettabili perché compatte) o risultano invasive e inaccettabili dal punto di vista della conservazione (intonaco armato).

Il sistema si basa sull'impiego di materiali facilmente reperibili, e precisamente:

a) trefoli in acciaio UHTSS che si possono ricavare da rotoli presenti sul mercato. I rotoli, larghi circa 30 cm (fig.1) e della lunghezza variabile (da 15 m fino a 1500 m) sono costituiti da una serie di trefoli disposti parallelamente tra loro (fig. 2) e tenuti insieme da una maglia in poliestere.



Figura 1 - Rotolo di trefoli in acciaio UHTSS

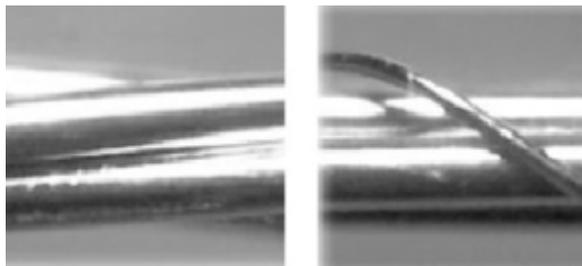


Figura 2 - (a) 3X2 trefolo, (b) 3SX trefolo

Risulta semplice sfilare dal nastro i trefoli di acciaio per poterli quindi utilizzare singolarmente per l'applicazione proposta. È possibile comunque utilizzare anche altri materiali, quale ad esempio i materiali compositi (funi o trefoli) purchè si possa utilizzare come matrice una malta di tipo cementizia o a base calce.

b) dei "fittoni" in acciaio zincato (fig.3), anche questi disponibili sul mercato, normalmente utilizzati nelle "ferrate" (percorsi su roccia) per aggrap-

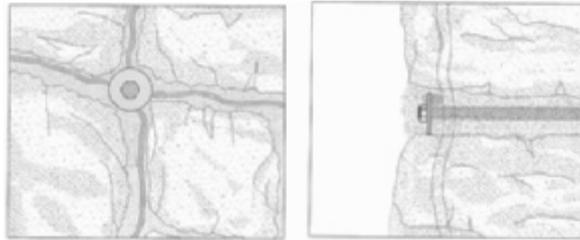
parsi alle pareti rocciose. Si tratta essenzialmente di paletti a punta che possono essere infissi nel paramento, ed hanno all'estremità un gancio o un anello attraverso il quale si può far passare un cavetto.

Figura 3 - Particolare di aggancio dei fittoni in acciaio



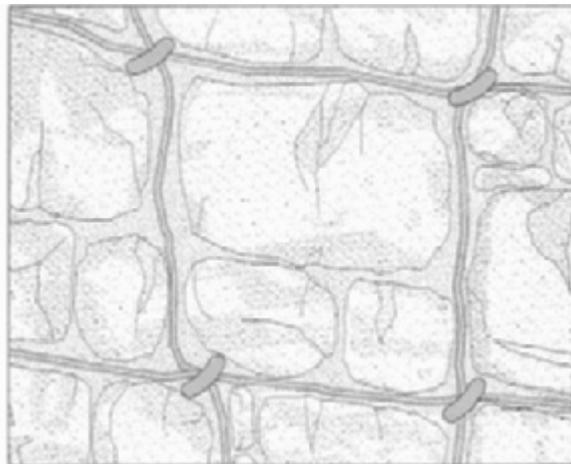
Possono anche essere utilizzate, in alternativa, piccole barre di acciaio zincato che, filettate all'estremità, consentono di bloccare il trefolo mediante una rondella e un dado di chiusura (fig.4).

Figura 4 - Particolare di aggancio delle barre filettate con rondella e dado.



La caratteristica più interessante dei trefoli utilizzati nel sistema proposto risiede nel fatto che la dimensione molto ridotta (diametro medio tipico del trefolo: 1 mm) e la forma stessa dei trefoli, ottenuti avvolgendo tra loro elicoidalmente i singoli cavi di acciaio (tipicamente 3-4 cavi) 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". Inoltre, 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. 5). Caratteristiche analoghe si possono trovare nei trefoli in materiale composito.

Figura 5 - Mutuo sconfinamento "pie-tra-malta-trefoli".



L'utilizzo dei fittoni o delle barre filettate ha un duplice scopo: da una parte consente di poter contare su dei "punti fermi" di ancoraggio dei trefoli nel paramento murario, dall'altro realizza un collegamento tra le due facce del pannello murario, favorendone così un comportamento monolitico.

Per il rinforzo del singolo pannello murario mediante il sistema proposto si attuano le seguenti fasi operative:

- scarnitura dei giunti di malta, per una profondità di 6-8 cm;
- lavaggio dei giunti scarniti;
- prima ristilatura con malta (cementizia o anche a base di calce);
- inserimento dei fittoni, o delle barre, tipicamente in numero di 4 a metro quadro, disposti per quanto possibile in modo regolare secondo una maglia quadrata e conficcati fino da interessare il paramento opposto, lasciando la testa all'interno della faccia su cui si sta lavorando (almeno di 3-4 cm) ;
- inserimento dei trefoli all'interno dei giunti scarniti, passandoli per il gancio del fittone o dietro la rondella della barra, e percorrendo secondo traiettorie orizzontali o 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, sovrapposti tra loro per circa 20 cm;
- se ritenuto necessario, per incrementare ulteriormente la resistenza del pannello si possono passare ulteriori trefoli in diagonale, sia in un senso che nell'altro;
- seconda stilatura con malta dei giunti, andando così a ricoprire completamente sia i trefoli che le teste dei fittoni o delle barre.

Al termine delle operazioni sopra descritte si è ottenuta una maglia reticolare (di forma irregolare), metallica o di materiale composito, perfettamente inglobata nel paramento murario, ma non visibile esternamente, capace di fornire al pannello quelle caratteristiche meccaniche (resistenza a taglio, resistenza a trazione e a compressione) necessarie per rispondere a sollecitazioni sia statiche che dinamiche.

Per comprendere l'efficacia dell'intervento si può fare un parallelo con la tecnica dell'intonaco armato.

Mentre il risultato finale di questa tecnica è quello di racchiudere la muratura tra due nuove pareti in c.a. (i due strati di intonaco di malta cementizia, armati con rete metallica, realizzati sulle due facce della muratura e collegati tra loro), con la tecnica qui proposta si ottiene un risultato di efficacia del tutto comparabile, lasciando però il paramento originario a vista, perfettamente integro, come integra resta la sua possibilità di traspirazione. Infatti, anche qui si hanno due nuove pareti resistenti collegate tra loro (dello spessore di vari centimetri) che racchiudono la muratura al loro interno (fig 6), ma si tratta degli stessi paramenti esterni originali, diventati due veri e propri strati di muratura armata (paramenti murari

armati) grazie alla maglia dei trefoli metallici “discretamente” ma intimamente inserita nei giunti.

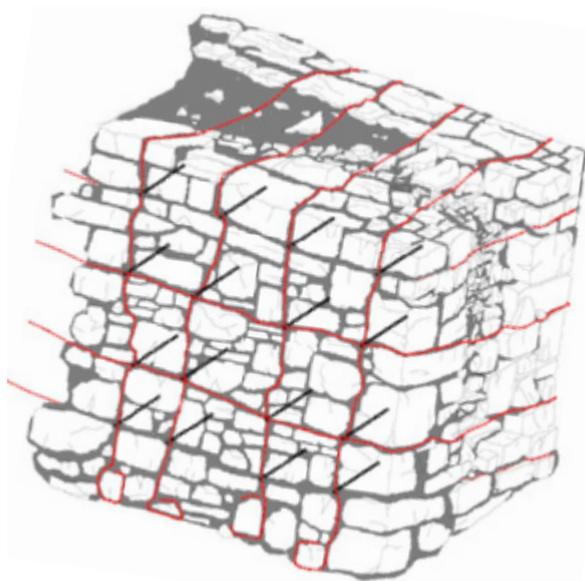


Figura 6 - I due paramenti in muratura armata racchiudono la muratura interna.

Peraltro, tale maglia, oltre a procurare alla muratura un rilevante incremento di resistenza a trazione (e a taglio), fornisce anche una benefica azione di confinamento degli elementi lapidei che vengono racchiusi all'interno dei circuiti dei trefoli.

Per il rinforzo dell'intera fabbrica muraria mediante il sistema proposto si può procedere come segue. Alle estremità del pannello murario i trefoli possono essere risvoltati per andare a interessare l'altra faccia dello stesso pannello, e anche, nel caso di pannello di angolo, risvoltati per interessare il pannello ortogonale (fig 7 e 8), collegando così tra di loro in modo particolarmente efficace (in quanto realizzano un collegamento diffuso) gli elementi verticali ortogonali.

Per quanto riguarda la parte inferiore del pannello (ad esempio in fondazione) i trefoli possono essere efficacemente ancorati girandoli intorno agli elementi lapidei alla base del pannello stesso (fig 7 e 8) 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), o, ad esempio nelle mura di cinta, girati sul coronamento per andare poi ad interessare l'altra faccia del muro.

Alla fine di queste operazioni ogni singolo pannello è stato rinforzato localmente e tutti i diversi elementi sono collegati tra di loro, dando luogo quindi ad una costruzione nella quale il sistema resistente è adesso costituito da una muratura armata in modo diffuso.

In definitiva, il sistema presentato prevede il ricorso ad una struttura a rete a lati flessibili costituiti dai trefoli precedentemente menzionati, posizionabili secondo percorsi corrispondenti ai giunti

tra gli elementi del pannello murario ed ancorabili a punti prestabiliti di quest'ultima mediante fittoni o barre trasversali. Poiché i lati della rete sono flessibili e passano nei ganci o negli anelli degli elementi trasversali senza essere solidali a questi ultimi, è possibile disporli precisamente lungo i giunti (precedentemente scarniti) degli elementi costituenti la muratura, qualunque ne sia l'andamento.

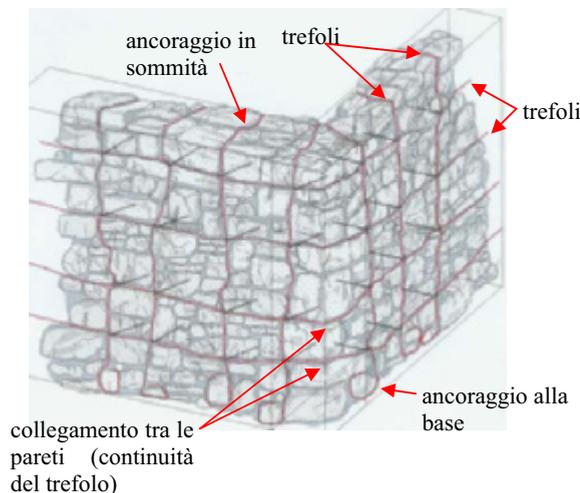


Figura 7 - Particolare della zona d'angolo

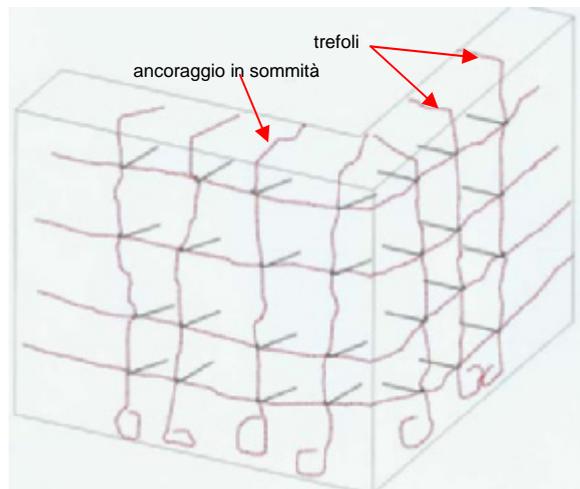


Figura 8 - Risolti e ancoraggio dei trefoli

3. CAMPI DI APPLICAZIONE E BENEFICI ATTESI

Come già accennato la tecnica proposta si presta ad interventi su murature irregolari ove si richieda, per ragioni di conservazione, il mantenimento della muratura faccia a vista e, allo stesso tempo una tipologia di intervento non invasiva, reversibile ed efficace.

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 di contemperare l'esigenza di raggiungere i più elevati livelli di

sicurezza con le istanze della tutela e della conservazione.

L'intervento, infatti, rispetta i principi alla base della tutela di una costruzione storica, risultando:

- "compatibile" con la conservazione materica del manufatto, essendo capace di adattarsi integrandosi perfettamente al manufatto stesso;
- "durevole", avendo i materiali utilizzati una elevata resistenza alle aggressioni chimico-fisiche ambientali;
- inteso ad integrare (senza trasformarla) la struttura;
- non invasivo;
- reversibile (o quanto meno removibile);
- rispettoso del principio del "minimo intervento".

Dal punto di vista meccanico si possono facilmente riconoscere i possibili benefici attesi, che riguardano:

1) gli incrementi nella 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) la capacità di collegare, in modo diffuso, le lesioni, le pareti verticali tra loro e le pareti verticali con gli orizzontamenti;

3) 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) il collegamento trasversale tra i paramenti della muratura, essendo i fittoni o le barre trasversali disposti come diatoni 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).

4. PRIME SPERIMENTAZIONI

Al fine di indagare sulla efficacia della tecnica di rinforzo precedentemente descritta sono state condotte due serie di prove: la prima consistente in prove di compressione con la tecnica dei martinetti piatti doppi e la seconda in prove di compressione diagonale. Le prove sono state eseguite su pannelli di muratura sia non rinforzata che rinforzata o con la tecnica della ristilatura profonda mediante malta di calce idraulica o con Reticolatus.

Per i pannelli rinforzati sono stati utilizzati trefoli in acciaio UHTSS forniti dalla Hardware LLC. Le fibre, le cui caratteristiche tecniche sono riportate in tab 1, sono costituite da filamenti di acciaio di elevata resistenza, ricoperti da uno strato di ossido per evitare l'ossidazione.

Tabella 1

Tipo di fibra	3X2 cord
Diametro del filamento	0.35
Area della sezione trasversale (mm ²)	0.481
Carico di rottura a trazione (N)	1539
Modulo di Young E (N/mm ²)	206842
Tensione di rottura (N/mm ²)	2480
Allungamento a rottura (%)	2.1

4.1. Prove con martinetti piatti

Le prove con martinetti piatti doppi sono state eseguite su pareti di contenimento in muratura di pietra nel Comune di Trevi (Pg). Con i martinetti piatti sono stati sottoposti a compressione uniaxiale fino a rottura porzioni di murature dell'altezza di circa 50 cm (fig. 9). Durante la prova sono

Figura 9 - Una prova con martinetti piatti doppi su una porzione di muratura rinforzata con Reticolatus.

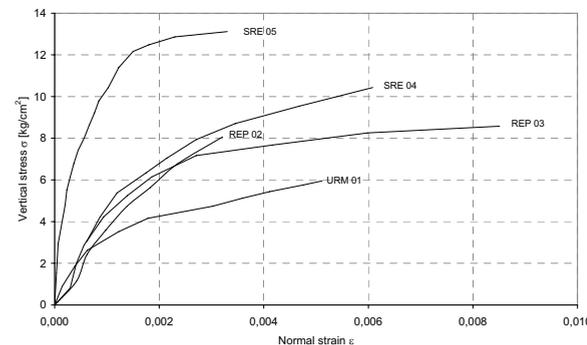


stati registrati i valori della pressione esercitata e della deformazione della muratura ai vari step di carico, che opportunamente elaborati hanno fornito i diagrammi $\sigma - \epsilon$ riportati in fig. 10. Dai diagrammi sono stati ricavati la tensione massima di compressione ed il modulo di elasticità normale calcolato in corrispondenza del 33% della tensione massima e fornito da:

$$E_{1/3} = \frac{0.33\sigma_{\max}}{\epsilon_{1/3}} \quad (1)$$

dove $\epsilon_{1/3}$ è la deformazione normale che corrisponde alla tensione pari al 33% della σ_{\max} .

Fig. 10 - Diagramma $\sigma - \epsilon$ risultante dalle prove con martinetti piatti doppi.



La rottura è avvenuta con il 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 con Reticolatus è stato osservato un numero maggiore di lesioni verticali di dimensioni minori, il che denota un miglioramento del comportamento meccanico della muratura.

I risultati, riportati in Tabella 2 e Figura 10. riguardano la muratura non rinforzata (sigla URM), la muratura rinforzata con sola ristilatura (sigla REP) e la muratura rinforzata con Reticolatus (sigla SRE).

Tabella 2 - Risultati delle prove con martinetti piatti.

	σ_{max} (MPa)	$E_{1/3}$ (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

Dall'analisi dei risultati è possibile osservare che la ristilatura con Reticolatus è in grado di incrementare significativamente la resistenza a compressione della muratura. Confrontando questi risultati con quelli relativi alla muratura non rinforzata ed a quella rinforzata con la sola ristilatura si osserva un incremento della resistenza rispettivamente di 116% e di 40%.

Per quanto riguarda il modulo di elasticità normale, i risultati delle prove con martinetti piatti hanno evidenziato come la sola ristilatura profonda dei giunti non sia in grado di determinare notevoli incrementi del modulo. Ciò in ragione del fatto che la malta utilizzata per la ristilatura è a base di calce idraulica cioè delle stesse caratteristiche di quella esistente come è prassi per tutti i manufatti storici.

4.2. Prove di compressione diagonale

Le prove di compressione diagonale, definite dalla normativa ASTM E 519, sono state eseguite su tre pannelli in muratura di pietra ricavati da un edificio parzialmente soggetto a demolizione nella località di Pale (PG) (Fig. 11). I pannelli, dello spessore di cm 53, erano costituiti da pietrame sbizzato di travertino bugnato e rocce calcaree compatte e da malta a base di calce di scarse proprietà meccaniche. Erano conformati da due paramenti debolmente ammorzati con assenza di diatoni.



Fig. 11 - Elementi murari nell'edificio a Pale (PG)



Fig. 12 - Pannello strumentato per le prove diagonali.

I pannelli sono stati tagliati con filo diamantato ad una dimensione di cm 120x120 e quindi è stata applicata una serie di elementi metallici disposti ai due spigoli di una delle diagonali del pannello e 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 relativo (fig. 13). Durante la prova vengono registrati il carico P applicato e la variazione di lunghezza delle diagonali.

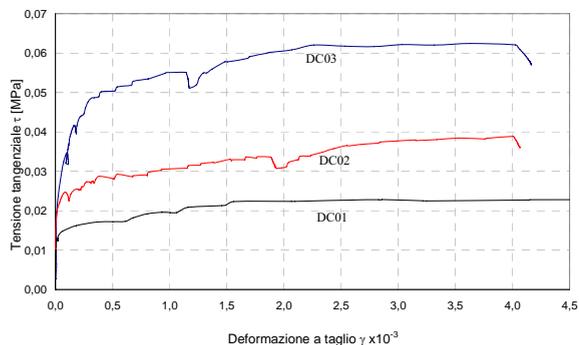


Fig. 13 - Diagramma τ - γ ottenuto dalle prove diagonali.

Lo stato tensionale che si genera in questo tipo di prove è tale che il valore della tensione tangenziale risulta uguale a quello della tensione principale σ_1 , ed esattamente:

$$\tau = \sigma_1 = \frac{P}{A\sqrt{2}} \quad (2)$$

dove P è il carico di compressione diagonale generato dal martinetto e A è l'area della sezione orizzontale del pannello di muratura. Quindi la resistenza caratteristica del pannello può essere ottenuta utilizzando la seguente:

$$f_{vk0,n} \cong \tau_k = \tau_u = \frac{P_{ult}}{A\sqrt{2}} \quad (3)$$

Poiché per tutte le prove il carico è stato applicato ciclicamente, è stato possibile valutare il modulo di taglio $G_{1/2}$ (valore secante del modulo elastico tangenziale ad 1/2 del carico massimo), per i diversi cicli di carico realizzati.

$$G_{1/2} = \frac{\tau_{1/2} - \tau_1}{\gamma_{1/2}} \quad (4)$$

Registrate le variazioni di lunghezza delle due diagonali sono stati calcolati i coefficienti di dilatazioni lineare media a compressione ed a trazione e lo scorrimento angolare γ :

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta 1A}{1A} + \frac{\Delta 1B}{1B} \right) = \frac{\epsilon_{1A} + \epsilon_{1B}}{2} \\ \epsilon_t &= \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta 2A}{2A} + \frac{\Delta 2B}{2B} \right) = \frac{\epsilon_{2A} + \epsilon_{2B}}{2} \\ \gamma &= \epsilon_c + |\epsilon_t| \end{aligned} \quad (5)$$

avendo indicato con 1A e 1B le lunghezze delle diagonali compresse e con 2A e 2B quelle delle diagonali tese.

I risultati di τ_k e $G_{1/2}$ sono mostrati in tabella 3 e in figura 13 dove si evince che le diverse tecniche di rinforzo applicate (ristilatura o "reticolatus") hanno determinato incrementi variabili sia della resistenza a taglio che della rigidità. Per la resistenza a taglio, Reticolatus e la ristilatura profonda hanno fornito rispettivamente un incremento del 117% e del 35% rispetto alla muratura non rinforzata. Si può notare quindi che per la τ_k si mantiene lo stesso incremento registrato per la resistenza a compressione nella precedente serie di prove.

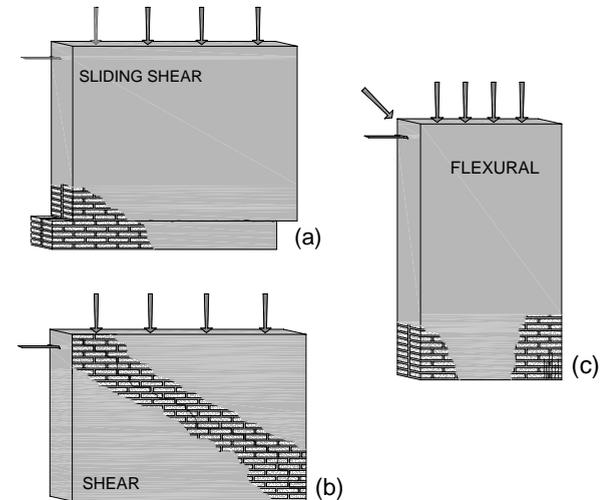
Tabella 3 - Risultati delle prove di compressione diagonale.

Tipo di rinforzo	Indice	τ_k (MPa)	$G_{1/2}$ (MPa)
Non rinforzato	DC 01	0.029	541
Ristilatura profonda	DC 02	0.039	---
Rinf. con Reticolatus	DC 03	0.063	653

Significativi anche gli incrementi del modulo di elasticità tangenziale $G_{1/2}$ del Reticolatus (653 MPa) se confrontato con risultati ottenuti dalla muratura non rinforzata (541 MPa).

5. MODELLAZIONE E VERIFICHE

Al fine di progettare un intervento di rinforzo di un pannello murario con il sistema proposto, si pensi che, sotto carichi verticali e orizzontali, i meccanismi di collasso possono sostanzialmente essere riassunti in: taglio, taglio-scorrimento e flessione per azioni nel piano e fuori del piano del pannello (fig. 14).



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 di collasso. 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 garantita dalla monoliticità che il pannello assume a seguito dell'inserimento degli elementi trasversali, fittoni e barre filettate.

5.1. Pressoflessione

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 $0,85f_{md}$ ed esteso alla porzione di sezione profonda il 60-80% della distanza dell'asse neutro dalla lembo compresso fino ad un limite massimo che dipende dallo spessore della paretina compressa e dalla profondità di scarnitura. Mediamente se la profondità della scarnitura è di 6-8 mm il limite può essere stimato in 10-12 mm.

Nella flessione per azioni fuori del piano del pannello allo sforzo di trazione contribuiscono allo stesso modo tutte le armature disposte sulla parete tesa (fig. 15).

Fig. 14 - Tipici modi di collasso di pareti in muratura non rinforzate: taglio-scorrimento (a), taglio (b), presso-flessione per azioni nel piano e fuori del piano (c).

Per la flessione nel piano, le armature della zona tesa reagiscono in modo diverso secondo la loro posizione (fig. 16); il loro contributo può essere calcolato concentrando l'area dei trefoli reagenti nel loro baricentro.

5.2. Taglio

Per la verifica a taglio, essendo garantita la formazione del traliccio resistente dalla presenza delle armature verticali, la resistenza di progetto è fornita dalla somma del contributo a taglio della muratura $V_{Rd,m}$ e dal contributo a taglio conseguente alla resistenza a trazione dei rinforzi $V_{Rd,t}$ (v. Linee guida CNR-DT 200/2004):

$$V_{Rd} = V_{Rd,m} + V_{Rd,t} = dt \left(\frac{f_{vd}}{\gamma_{Rd}} \right) + 0.6dA_{tw} \left(\frac{f_{td}}{\gamma_{Rd}} \right) \frac{1}{p_t} \quad (6)$$

dove:

d è la distanza tra il lembo compresso e il baricentro dei trefoli a flessione,

t è lo spessore della parete reagente a taglio,

A_{tw} area dei trefoli disposti parallelamente all'azione di taglio,

p_t passo medio di trefoli,

f_{vd} e f_{td} rappresentano la resistenza di progetto rispettivamente della muratura e dei trefoli,

γ_{Rd} è il coefficiente parziale per i modelli di resistenza.

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 $V_{Rd,m}$ e il contributo conseguente alla resistenza a trazione dei rinforzi $V_{Rd,t}$.

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

$$V_{Rd,slid} = 1.3A_{tw} \left(\frac{1}{\gamma_{Rd}} \right) (f_{td} f_{md})^{0.5} \quad (7)$$

dove:

A_{tw} è l'area dei trefoli perpendicolari all'azione di taglio,

f_{md} è la resistenza di progetto a compressione della muratura.

6. CONCLUSIONI

La tecnica proposta per il rinforzo di murature è rivolta principalmente a costruzioni a tessitura irregolare e consiste nell'inserimento nei giunti di malta di un reticolato continuo di piccoli trefoli in

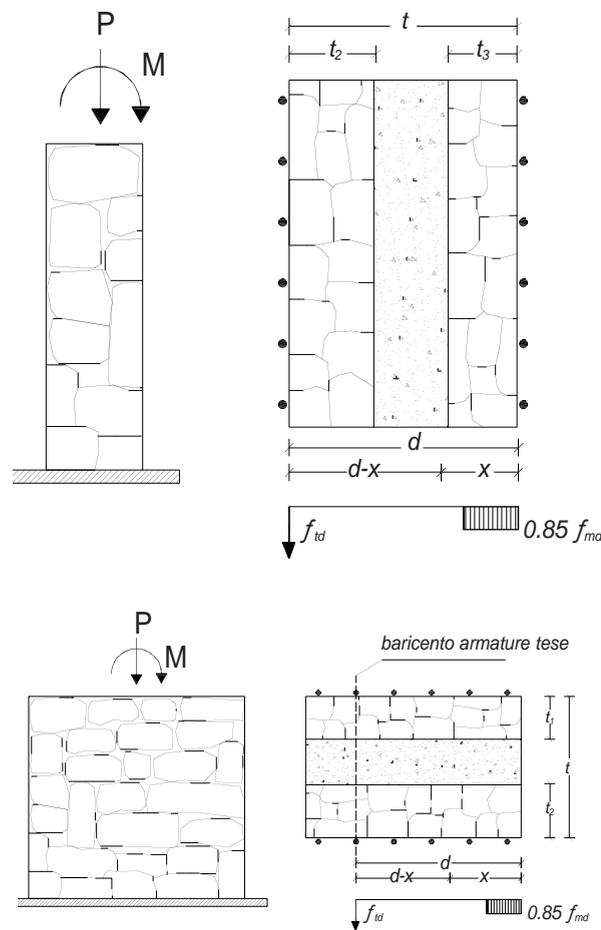


Fig. 15 - Presso-flessione fuori del piano

Fig. 16 - Presso-flessione nel piano

acciaio UHTSS, i cui nodi sono fissati mediante barre metalliche trasversali al paramento murario.

Il risultato è quello di una muratura armata, per la quale si ha un incremento della resistenza a compressione, a taglio e a flessione, e un efficace collegamento trasversale tra i paramenti della muratura.

Il miglioramento non riguarda solo le caratteristiche meccaniche della muratura su cui si interviene, ma interessa l'intera fabbrica muraria poiché 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 costituendo quindi un vero e proprio sistema completo di rinforzo. Inoltre le dimensioni ridotte degli elementi di rinforzo ed il loro agevole inserimento nei giunti di malta consentono di realizzare un intervento diffuso che evita pericolose concentrazioni di sollecitazioni come invece si hanno, ad esempio, con l'impiego di bandelle o barre metalliche.

Il sistema proposto può essere utilizzato sia a livello locale, ovvero per singoli pannelli murari di edifici esistenti o anche per mura di cinta, sia a livello globale, ovvero come sistema di rinforzo di una intera costruzione in muratura nel suo comportamento di insieme.

L'intervento risulta poco invasivo, ampiamente reversibile, inteso ad integrare la muratura e non a sostituirla, compatibile con la conservazione materiale del manufatto, durevole (dato l'impiego di materiali ad elevata durabilità) e quindi risulta particolarmente indicato nel caso di murature faccia a vi-

Antonio BORRI, nato a Firenze nel 1950 laureato in Ingegneria civile. È Professore Ordinario di Scienza delle Costruzioni, in servizio presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia. Presidente del Centro Studi "Sisto Mastrodicasa" per il consolidamento ed il restauro. Direttore del Master universitario in "Miglioramento sismico, restauro e consolidamento del costruito storico e monumentale". V. Presidente del Consiglio Direttivo di AICO - Associazione Italiana Compositi. Membro del Consiglio Direttivo della Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica. È autore di più di 250 pubblicazioni su volumi e riviste scientifiche sia italiane che straniere e di tre brevetti industriali.

Marco CORRADI, nato nel 1971 a Terni laureato in Ingegneria nel 1998 a Perugia; attualmente è Ricercatore universitario presso il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale della Università di Perugia; si occupa di interventi nell'ambito del costruito storico.

Andrea GIANNANTONI, nato a Foligno nel 1965 si è laureato nel 1992 in Ingegneria presso la Facoltà di Ancona. Attualmente si occupa di progettazione e direzione lavori delle strutture. È Docente nel Master in: Miglioramento sismico, restauro e consolidamento del costruito storico e monumentale.

Emanuela SPERANZINI, si è laureata nel 1984 in Ingegneria presso la Facoltà di Ancona, attualmente è docente presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia ai corsi di "Statica", "Scienza delle costruzioni", "Problemi strutturali speciali" e "Sperimentazione di materiali e strutture" al Master di II livello: Miglioramento sismico, restauro e consolidamento del costruito storico e monumentale.

sta di edifici vincolati ai sensi della legge di tutela degli edifici e dei manufatti in genere di interesse storico e architettonico.

Le prove sin qui condotte hanno evidenziato sostanziali miglioramenti del comportamento meccanico della muratura così rinforzata, dimostrando che la ristilatura profonda dei giunti armata con fibre metalliche è in grado di incrementare significativamente sia le resistenze (a compressione e a taglio) sia le caratteristiche elastiche (E, G).

La facilità di esecuzione e il semplice dimensionamento dell'intervento lo rendono utilizzabile per qualsiasi tipo di muratura.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ASCIONE, L., FEO, L. & FRATERALI, F. 2005. Load carrying capacity of 2D FRP/strengthened masonry structures, Composites: Part B, Elsevier, 36, 619-626.
- ASTM D 3039. 1976. Standard test method for tensile properties of fiber-resin composites, approved Aug. 27, 1976, approved 1989.
- 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. & 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 Reinforcing of stone wall using a reinforced repointing grid, 6th International Conference of Structural Analysis of Historical Construction, 2-4 luglio 2008, Bath, England.
- CECCHI, A., MILANI, G. & 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. & 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.
- CHIOSTRINI, S., GALANO, L. & VIGNOLI, A. 2003. In Situ Shear and Compression Tests in Ancient Stone Masonry Walls of Tu-

scany, Italy, Journal of Testing and Evaluation, ASTM, 31, (4), 289-304.

- CORRADI, M., BORRI, A. & VIGNOLI, A. 2003. Experimental study on the determination of strength of masonry walls, Construction and Building Materials, Elsevier, (17), 325-337.
- CORRADI, M., BORRI, A. & VIGNOLI, A. Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the Umbrian-Marche earthquake of 1997-1998, Construction and Building Materials, Elsevier, 16, (4), 229-239, 2002.
- CORRADI, M., TEDESCHI, C., BINDA, L. & BORRI, A. Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: deep repointing, Construction and Building Materials, Elsevier (in press).
- DOLCE, M., MARNETTO R., "Tecnica CAM", brevetto.
- ELGAWADY, M.A., LESTUZZI, P. & BADOUX, M. Analytical model for the in-plane shear behavior of URM walls retrofitted with FRP, Composites Science and Technology, Elsevier, (66), 459-474, 2006.
- ESHANI, M.R. 1997. Strengthening of earthquake damaged masonry structures with composite materials, Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the second international RILEM Symposium FRPRCS-2, L. Taerwe Ed., E & FN Spon, London, England, 681-687. 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. & LEBON, F. 2006. Modelling approaches of the in-plane shear behaviour of unreinforced and FRP strengthened masonry panels, Composite Structures, Elsevier, (74), 277-288.
- SCHWEGLER, G. 1994. Masonry construction strengthened with composites in seismically endangered zone, Proceedings of 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, Austria, A.A. Balkema Publ., Rotterdam, 2299-2303.
- TOMAZEVIC, M. & ALIH, V. 1993. The strengthening of stonemasonry walls by injecting the masonry-friendly grouts. 7th European Conf. On Earthquake Engineering, 1, 10-20.
- TURNSEK, V. & SHEPPARD, P. F. 1980. The shear and flexural resistance of masonry walls, Proc. of the research conf. on earthquake engineering., Skopje.
- VALLUZZI, M.R., TINAZZI, D. & MODENA, C. 2002. Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates, Construction and Building Materials, Elsevier, (16), 409-416.
- VINTZILEOU, E. & TASSIOS, T.P. 1995. Three-leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts, Journal of Structural Engineering, 121, (5), 848-856.