



Un modello per lo studio del comportamento meccanico della muratura rinforzata con la tecnica del Reticolatus

Antonio Borri, Marco Corradi, Emanuela Speranzini

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Università di Perugia. Via Duranti 93, 06125 Perugia.

Andrea Giannantoni

Unilab s.r.l. – Foligno (PG).

Keywords: analisi numerica, murature in pietra, rinforzo di murature, miglioramento sismico, materiali innovativi

ABSTRACT

Il “Reticolatus” è una tecnica di rinforzo di murature storiche rivolta principalmente a costruzioni a tessitura irregolare, quali le murature in pietra, che 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 è quello di una muratura armata, per la quale si ha un incremento della resistenza a compressione, a flessione e a taglio, e un efficace collegamento trasversale tra i paramenti della muratura. Le numerose sperimentazioni, consistenti in prove di compressione e di taglio eseguite su strutture esistenti, hanno mostrato incrementi significativi delle resistenze e delle rigidità ed evidenziato l’efficacia della tecnica. Nel presente lavoro vengono mostrati i primi risultati di un metodo di calcolo semplificato basato sul modello puntone-tirante proposto per un dimensionamento speditivo dell’intervento di rinforzo e per la verifica della muratura rinforzata. L’analisi semplificata è stata tarata facendo riferimento alla risposta sperimentale in sito di murature esistenti rinforzate ed è stata validata confrontando i risultati ottenuti con quelli derivanti da un modello di calcolo agli elementi finiti che simula con precisione il comportamento della muratura rinforzata.

1 INTRODUZIONE

Il sistema di intervento per il miglioramento sismico “Reticolatus”, presentato in precedenti lavori (Borri et al 2008, 2010), consiste nell’inserimento nei giunti di malta di un reticolato continuo di piccoli trefoli in acciaio ad alta resistenza, i cui nodi sono fissati mediante barre metalliche trasversali al paramento murario. Questa tecnica consente di intervenire su murature sia regolari che irregolari, conservando il paramento faccia a vista, si propone sia autonomamente sia ad integrazione di altre tecniche (ad esempio le iniezioni) e può fornire contributi rilevanti nei confronti sia di sollecitazioni dinamiche di tipo sismico, sia di azioni statiche verticali. Il sistema può essere utilizzato sia a livello locale, ad esempio per singoli pannelli murari di edifici esistenti (mura

di cinta, mura urbane, etc.), sia a livello globale, ovvero come sistema di rinforzo di una costruzione in muratura nel suo comportamento di insieme, anche con particolare riferimento al comportamento in presenza di sisma.

Per quanto riguarda la progettazione dell’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. 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 e quelli di trazione dai trefoli.

2 IL RETICOLATUS

2.1 La tecnica

Per il dimensionamento o 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 costituiti da fittoni e barre filettate.

Per uno studio più completo del pannello rinforzato si può ricorrere ad un'analisi agli elementi finiti che considera il reale comportamento della muratura rinforzata ma diventa molto impegnativo nel caso di un dimensionamento speditivo dell'armatura necessaria per realizzare un intervento idoneo a contrastare la formazione di eventuali meccanismi di collasso.

Quanto sopra evidenzia la necessità di individuare un modello semplificato sulla base di ipotesi preliminari, che possa descrivere in modo adeguato il comportamento della muratura rinforzata con Reticolatus.

Per superare la complessità intrinseca del comportamento della muratura, caratterizzata da forti non-linearità nella risposta a compressione e da una resistenza a trazione limitata, si è fatto riferimento ad una schematizzazione basata su un modello reticolare equivalente per l'analisi non lineare delle murature in cui tutte le aste sono bielle che possono essere soggette esclusivamente a sforzo normale di compressione (puntone) e di trazione (tirante).

Il metodo permette la valutazione della risposta delle pareti in muratura per carichi nel proprio piano, prescindendo da eventuali forze e meccanismi derivanti dalla risposta dinamica fuori piano.

L'impiego non è quindi da considerarsi alternativo alle modellazioni agli elementi finiti, ma come aiuto a prefigurare il comportamento di una struttura in modo semplice e chiaro.

L'analisi è stata implementata all'interno di codice di calcolo agli elementi finiti usualmente utilizzato in ambiente tecnico-progettuale ed è stata tarata facendo riferimento ai risultati ottenuti dalle numerose prove sperimentali eseguite in sito su edifici esistenti in muratura rinforzati con la tecnica proposta.

Allo scopo di perseguire un ulteriore criterio di validazione del modello semplificato, è stato costruito un modello di calcolo agli elementi finiti, in grado di considerare tutte le non linearità del problema e descrivere fedelmente il pannello rinforzato, che ha permesso un attento confronto dei risultati con quelli del modello semplificato.

Il "Reticolatus", consiste 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 sono costituiti da barre filettate in acciaio zincato. Ne vengono disposti, tipicamente, in numero minimo di 4 a metro quadro, secondo maglie per quanto possibile regolari. Tale numero, comunque, dipende dalla tipologia muraria, dalle dimensioni degli inerti e dalle necessità progettuali. Se si vuole garantire il solo ancoraggio della maglia al paramento murario, le barre sono inserite fino ad entrare per circa 15 cm nello spessore murario. In questo caso è sufficiente un diametro di 5-6 mm (Figura 1). Nel caso in cui si vuole ottenere anche un collegamento tra i paramenti (tipo diatoni) occorre entrare nel muro per almeno due terzi dello spessore e in questo caso sarà opportuno un diametro più rilevante.

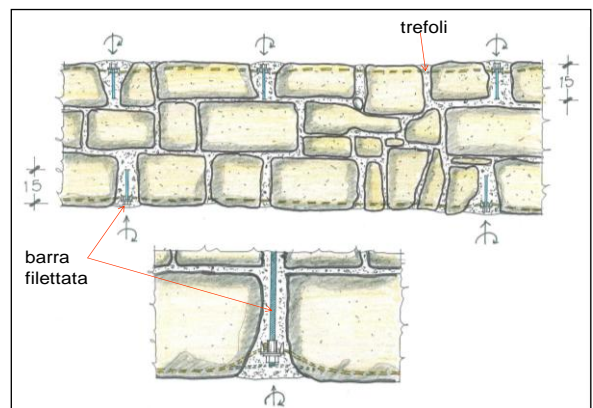


Figura 1: Sezione orizzontale del pannello rinforzato.

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 entrare 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, i trefoli verranno posti leggermente in tensione.

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.

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.

I benefici conseguibili consistono in un miglioramento delle caratteristiche meccaniche della muratura su cui si interviene ed anche della costruzione nel suo insieme (Figura 2). Infatti, 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 completo di rinforzo dell'intera fabbrica muraria, specie se proposta come integrativa di altre tipologie di intervento (iniezioni, diaframi artificiali, etc).

Dal punto di vista meccanico si ottengono incrementi nelle 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. Inoltre si fornisce alla muratura una certa resistenza a trazione ed anche il collegamento trasversale tra i paramenti murari e delle pareti verticali con gli orizzontamenti.

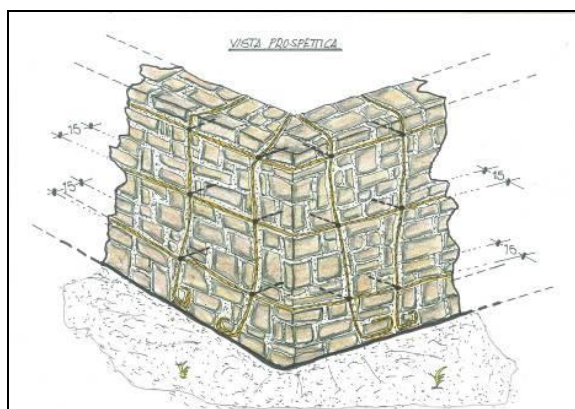


Figura 2: La continuità dei trefoli contribuisce al collegamento tra gli elementi murari.

L'efficacia della tecnica di rinforzo proposta è stata verificata mediante diverse serie di prove sperimentali (prove di compressione con la tecnica dei martinetti piatti doppi, prove di compressione diagonale e prove di flessione) eseguite in sito su edifici esistenti dell'Italia centrale o, per quanto riguarda le prove a flessione, su pannelli appositamente costruiti. I risultati sono stati molto soddisfacenti poiché hanno mostrato che questa tecnica è in grado di incrementare la resistenza e la rigidezza del pannello. Notevole è il miglioramento del comportamento a taglio per il quale si sono registrati incrementi della resistenza a taglio della muratura con Reticolatus rispetto a quella senza rinforzo variabili tra il 129% e 192% (Borri et al. 2011).

3 MODELLAZIONE DELLA PARETE RINFORZATA

Al fine di progettare un intervento di rinforzo di un pannello murario con Reticolatus, è stata implementata un'analisi semplificata basata sul modello "strut and tie" (STM) che permette un agevole dimensionamento del rinforzo ed anche una stima del vantaggio conseguito. Il modello rappresenta una organica riformulazione dell'approccio utilizzato per la prima volta dai pionieri delle costruzioni in calcestruzzo armato alla fine del XIX secolo (Hennebique, Morsch, Ritter, Raush, ecc.).

Questo tipo di modellazione riproduce solo una prima stima del comportamento non potendo prevedere fenomeni rappresentativi dei pannelli murari come l'anisotropia, i contatti per attrito. Il modello, essendo di aiuto a prefigurare il comportamento di una struttura in modo semplice e chiaro, è comunque uno strumento semplice per un dimensionamento speditivo, ma non alternativo al metodo agli elementi finiti.

Allo scopo di testare il modello semplificato, è stato costruito un modello agli elementi finiti che descrive fedelmente il pannello murario rinforzato con Reticolatus e consente il confronto con i risultati del modello semplificato.

3.1 Modellazione semplificata

La schematizzazione semplificata della parete si basa sul modello puntone-tirante costituito da elementi lineari ad asse rettilineo, collegati da cerniere. Tutte le azioni esterne e le reazioni vincolari sono espresse mediante forze applicate ai soli nodi e conseguentemente tutte le aste del

modello sono soggette esclusivamente a sforzo normale.

L'analisi è stata effettuata utilizzando un programma agli elementi finiti di normale uso in ambito tecnico-progettuale.

Nel modello la muratura è stata rappresentata con elementi "frame", assegnandogli un materiale attraverso la scelta di un modulo elastico rappresentativo della muratura, e gli elementi in acciaio sono stati schematizzati con elementi "cable" resistenti solo a trazione e privi di rigidità flessionale.

3.1.1 Dimensionamento delle bielle

Il dimensionamento delle bielle, organizzate in montanti verticali, correnti orizzontali e diagonali incrociate, è stato eseguito assegnando una equivalenza meccanica tra il reticolo e l'elemento murario in questione, nell'ipotesi di comportamento perfettamente elastico, considerando i tre cinatismi – traslazioni orizzontali di piano, rotazioni flessionali del pannello e variazione di lunghezza delle aste per sforzo normale centrato.

Il modello è stato messo a punto e tarato sulla base dei risultati ottenuti dalle prove di compressione diagonale eseguite in sito su murature esistenti. Ciò ha comportato che inizialmente è stato modellato un pannello quadrato di dimensioni 120 x 120 cm e spessore variabile tra 25 e 70 cm soggetto ad una forza di compressione diagonale, in conformità alla norma ASTM E519-81.

L'accuratezza della schematizzazione può essere migliorata introducendo nel modello un numero maggiore di elementi che comporta un raffittimento della discretizzazione. Viene così definito un sistema reticolare che rappresenta con migliore approssimazione il modello continuo anche per quel che riguarda il comportamento in ambito non lineare nel quale le aste tendono progressivamente ad entrare in campo plastico, andando in questo modo a ridurre la rigidità complessiva del sistema. L'adozione di un modello con discretizzazione raffittita permette di aumentare il livello di dettaglio ottenibile dall'analisi, mantenendo nello stesso tempo la semplicità di lettura dei risultati ottenuti.

Per modellare il rinforzo si è scelto uno schema geometrico base costituito da maglie regolari che possano adeguatamente descrivere la disposizione dei trefoli nel Reticolatus (Figura 3).



Figura 3: Foto della disposizione del rinforzo nel Reticolatus

Nel modello la schematizzazione è stata impostata per layer: quello centrale rappresenta la muratura quelli laterali il rinforzo. Gli elementi trasversali filettati sono stati modellati con elementi rigidi a collegamento dei nodi dei layers (Figura 4).

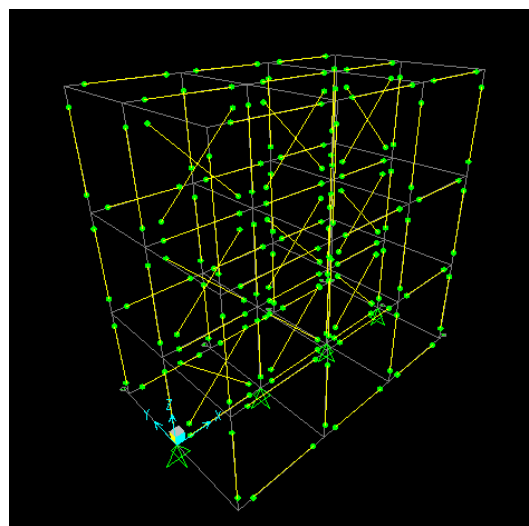


Figura 4: Modello della parete rinforzata

3.1.2 Legami costitutivi adottati

Dovendo assumere per il sistema reticolare equivalente lo stesso materiale del generico pannello murario, è fondamentale definire per le singole aste i legami costitutivi tali da garantire l'affidabilità delle simulazioni effettuate. Nel caso in questione le caratteristiche meccaniche dei materiali sono state desunte dai dati delle numerose prove sperimentali a disposizione.

Per la muratura è stato accettato un comportamento isotropo, che permette di adottare in tutte le aste del modello reticolare, indipendentemente dalla loro giacitura, un unico valore di modulo elastico, assunto pari a quello dalla muratura in direzione normale ai giunti. L'adozione di un materiale equivalente nelle aste

del sistema reticolare che avesse la stessa rigidezza della muratura, è d'altra parte necessario anche alla luce delle ipotesi fatte durante la calibrazione delle aree del modello.

Nelle aste orizzontali e verticali i valori di resistenza a compressione sono stati assunti uguali ai valori medi f_{mk} (bielle verticali) e f_{mkh} (bielle orizzontali). È stata trascurata la resistenza a trazione della muratura, assumendo quindi un comportamento no-tension.

I valori della resistenza delle aste diagonali sono stati invece ottenuti in seguito ad un procedimento di calibrazione, confrontando la risposta globale del modello reticolare con quelle ottenute nelle prove di compressione diagonale eseguite in sito. Il legame adottato è elastico perfettamente plastico, dove i limiti del comportamento elastico sono definiti dai parametri $\alpha \cdot f_{mk}$ ed f_{mt} (Figura 5).

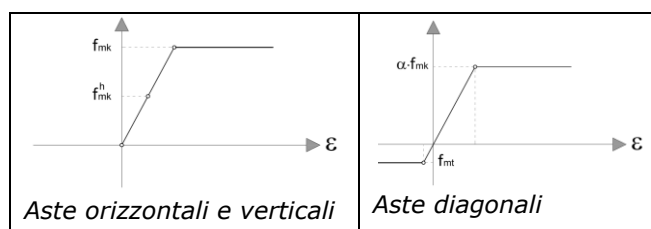


Figura 5: Modelli reticolari della parete rinforzata

L'acciaio è stato modellato a comportamento elastico lineare assumendo le caratteristiche riportate in Tabella 1, desunte dalla scheda tecnica fornita dal produttore.

Tabella 1. Caratteristiche dei singoli trefoli.

Tipo di fibra	3X2
Area effettiva di un trefolo (mm ²)	0.481
Carico di rottura a trazione di un trefolo (N)	1539
Modulo elastico (N/mm ²)	206842
Deformazione a rottura del nastro (%)	1.6

3.1.3 Prima applicazione

La prima applicazione del modello ha riguardato la prova diagonale allo scopo di una verifica dei risultati con quelli ottenuti sperimentalmente dalle prove in sito.

Le bielle verticali sono schematizzate con elementi frame aventi

$$F_c^{(v)} = A_v \cdot f_{mk} \quad F_t^{(v)} = 0$$

e gli elementi orizzontali con elementi aventi

$$F_c^{(h)} = A_h \cdot f_{mkh} \quad F_t^{(h)} = 0$$

Per le bielle diagonali si ricorre all'impiego di link non lineari a comportamento elasto-plastico con i seguenti limiti di resistenza:

$$F_c^{(d)} = A_d \cdot \alpha \cdot f_{mk} \quad F_t^{(d)} = \beta \cdot F_c^{(d)}$$

Sulla base di esperienze già effettuate, per il parametro α è adeguato stimare un valore generalmente compreso tra 0,3÷0,5; nel caso si abbiano a disposizione dei dati desunti da prove sperimentali si può calibrare il valore su questi risultati. Per quanto riguarda il parametro β , invece, data la scarsa o nulla resistenza a trazione delle murature storiche, i valori si aggirano intorno al 3÷5%.

Un primo test per la validazione del modello è stato eseguito simulando prove a compressione diagonale dalla quale è stata calcolata la resistenza a taglio della muratura. I risultati, confrontati con i valori di letteratura o con quelli sperimentali ottenuti dalle prove a compressione diagonale, hanno dato esito soddisfacente.

Successivamente sono stati considerati tre sistemi costituiti da maglie regolari che si diversificano per la loro di cm 60x60, 40x40, 30x30 e su cui poi verrà impostato il rinforzo (Figura 6).

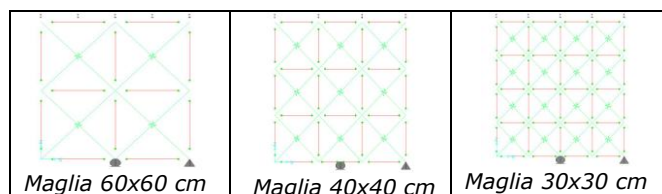


Figura 6: Modelli reticolari della parete rinforzata

Dai risultati del pannello non rinforzato è possibile notare, come era lecito aspettarsi, che le sollecitazioni sono concentrate sulla diagonale principale di compressione, mentre sulla diagonale principale di trazione viene raggiunto lo stato limite (Figura 7).

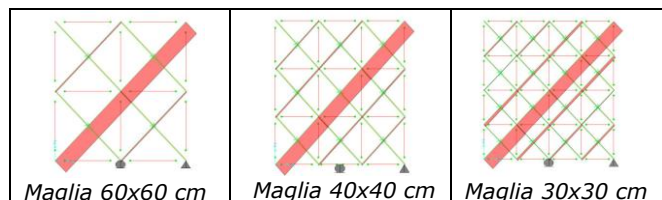


Figura 7: Compressione nei pannelli murari non rinforzati

I risultati ottenuti dal modello di muratura con Reticolatus, grazie alla resistenza a trazione del rinforzo, mostrano una redistribuzione degli sforzi di compressione dalla diagonale principale alle diagonali secondarie da cui si evince che il

pannello è quindi in grado di sopportare azioni di maggiore entità (Figura 8).

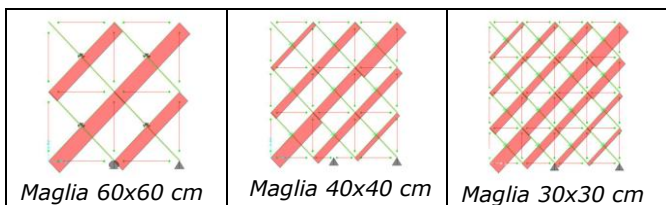


Figura 8: Compressione nei pannelli murari rinforzati

Dal diagramma di Figura 9, che riporta le curve $\tau - \gamma$ ottenute dalla simulazione delle prove diagonali di compressione per i tre diversi schemi con 4 trefoli, si evince che la maglia di rinforzo $60 \times 60 \text{ cm}$ ha scarsa efficacia rispetto alle altre.

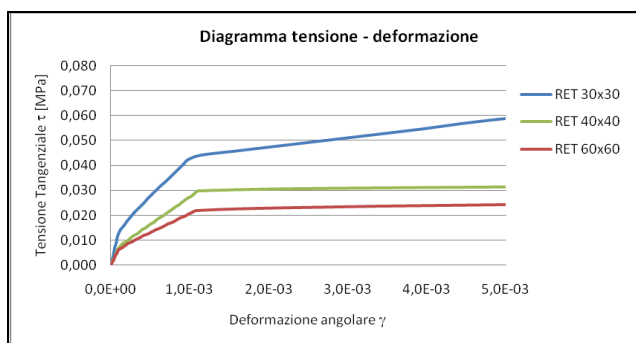


Figura 9: Diagramma $\tau - \gamma$ per i tre schemi di rinforzo

E' importante sottolineare che il modello, in questa prima fase, non tiene conto del miglioramento delle caratteristiche della muratura a seguito della scarnitura e della ristilatura del giunto necessari per l'inserimento dei trefoli nell'applicazione del Reticolatus.

3.1.4 Applicazione ad un pannello murario di dimensioni reali

E' stato anche analizzato il comportamento di un pannello murario delle dimensioni di cm 320×320 e cm 50 di spessore, rinforzato con Reticolatus, vincolato alla base e caricato in sommità con una forza orizzontale.

Nel modello della muratura rinforzata è stato considerato il contributo della ristilatura dei giunti che è stato descritto mediante un incremento della resistenza della muratura pari al 30%, stimato sulla base dei risultati sperimentali registrati in sito (Borri A. et al., 2011). La muratura considerata ha le seguenti caratteristiche meccaniche: resistenza caratteristica a compressione $f_{mk} = 1 \text{ MPa}$, modulo elastico normale $E = 690 \text{ N/mm}^2$ e modulo elastico tangenziale $G = 230 \text{ N/mm}^2$. In questa applicazione per la muratura è stata considerata

una piccola resistenza a trazione pari al 5% della resistenza a compressione.

E' stata eseguita un'analisi non lineare per incrementi di carico.

Nelle Figure 10 e 11 è mostrato lo stato tensionale di compressione della muratura e di trazione dei trefoli per pannelli rinforzati rispettivamente con 1 e 4 trefoli, in corrispondenza della forza di collasso.

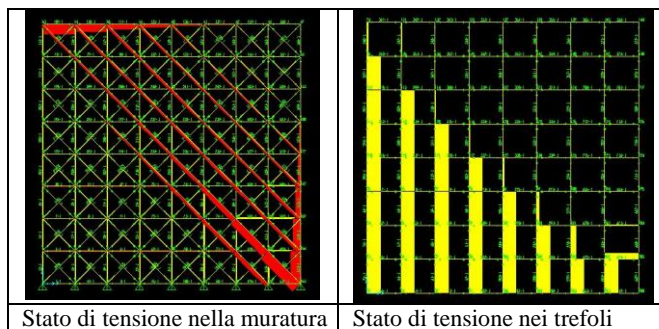


Figura 10: Pannello murario con Reticolatus (n.1 trefoli)

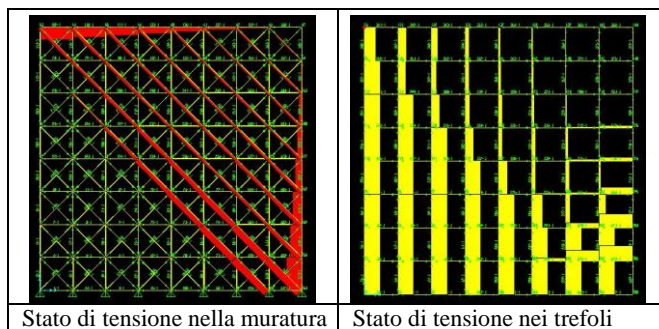


Figura 11: Pannello murario con Reticolatus (n.4 trefoli)

La Figura 12 mostra il valore della forza ultima al variare del numero dei trefoli. In generale si è rilevato che gli incrementi della forza tendono a diminuire con l'aumentare del numero dei trefoli e ciò testimonia che i migliori vantaggi si ottengono per 3-4 trefoli, quantitativo facilmente gestibile nel montaggio in cantiere.

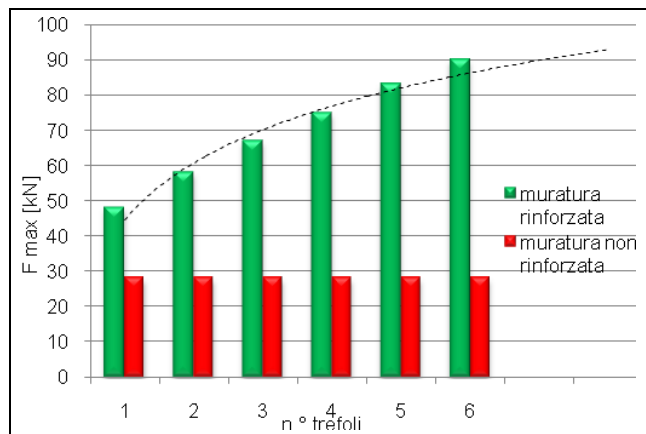


Figura 12: Forza di collasso al variare del numero dei trefoli.

3.2 Analisi numerica agli elementi finiti

L'analisi numerica agli elementi finiti, finalizzata al confronto dei risultati con il modello semplificato, è stata eseguita su un modello delle dimensioni di cm 320x320 e cm 50 di spessore e soggetto in sommità ad una forza orizzontale (Figura 13).

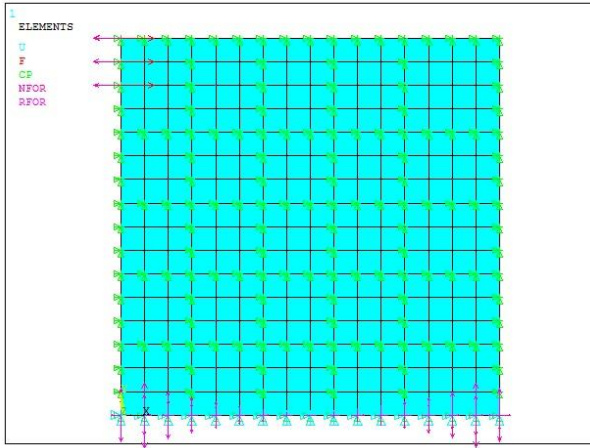


Figura 13: Modello della parete 320x320x50 cm maglia del rinforzo 40x40.

Per la muratura è stato utilizzato un elemento solido isoparametrico ad otto nodi che prevede la possibilità di adottare un modello anelastico a fessurazione diffusa. Il modello costitutivo, oltre ai parametri elastici, modulo di Young $E_w = 690 \text{ N/mm}^2$ e coefficiente di Poisson $\nu = 0.3$, richiede la definizione del dominio di rottura di Willam-Warnke i cui parametri necessari alla definizione del dominio di rottura sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2. Parametri per la superficie di rottura.

f_{wc}	1,00 N/mm^2
f_{wt}	0.05 N/mm^2
β_c	0.65
β_t	0.15

f_{wc} : resistenza a compressione; f_{wt} : resistenza a trazione; β_c e β_t : coefficienti di trasmissione del taglio rispettivamente per fessure chiuse e aperte.

I trefoli costituenti il rinforzo del Reticolatus sono stati modellati con elementi a due nodi con comportamento di trave monoassiale resistenti a trazione. Per gli elementi trasversali in acciaio, che garantiscono il collegamento della maglia in acciaio alla muratura, sono stati utilizzati elementi a due nodi con comportamenti di trave monoassiale di maggiore rigidità rispetto a quella dei trefoli. Per i trefoli sono stati previsti differenti disposizioni: orizzontali e verticali a formare maglie quadrate della dimensione di 60x60 cm, 40x40 cm e 30x30 cm o prevedendo in aggiunta trefoli inclinati.

Relativamente alla dimensione della maglia di trefoli, l'analisi agli elementi finiti conferma il risultato dell'analisi semplificata e cioè che il vantaggio del rinforzo è significativo quando si realizzano maglie non più grandi di 40x40 cm (Figure 14 e 15). Il pannello con trefoli secondo una maglia di 40x40, rispetto ad un rinforzo di 60x60, raggiunge una forza ultima maggiore, ha una tensione limite più alta e a parità di carico presenta una rigidità maggiore.

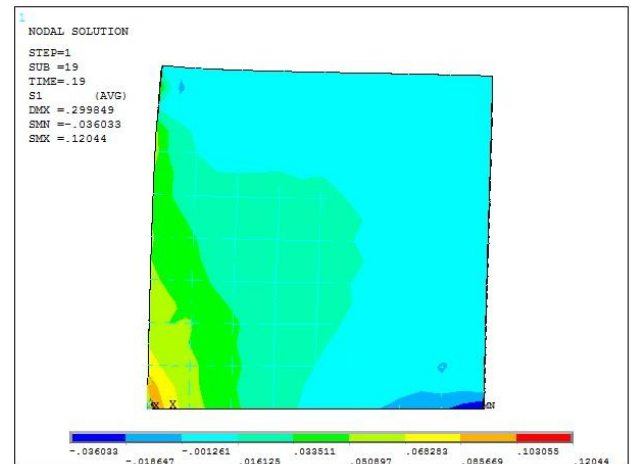


Figura 14: Stati tensionale del pannello rinforzato con maglia 40x40 cm.

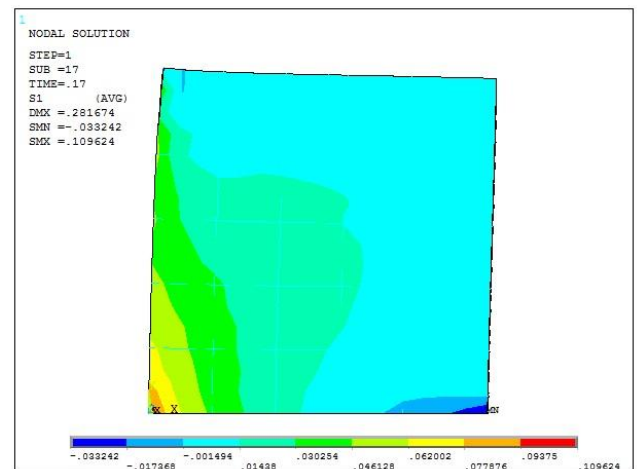


Figura 15: Stati tensionale del pannello rinforzato con maglia 60x60 cm.

Varie analisi sono state eseguite per differenti quantità di trefoli: da 1 a 4 trefoli che sono quelli usualmente utilizzati. I risultati ottenuti sono comparabili con quelli relativi al modello precedente e ciò costituisce un'ulteriore validazione del modello semplificato. La Figura 17 mostra l'incremento percentuale, rispetto al pannello non rinforzato, della forza ultima al variare del numero di trefoli.

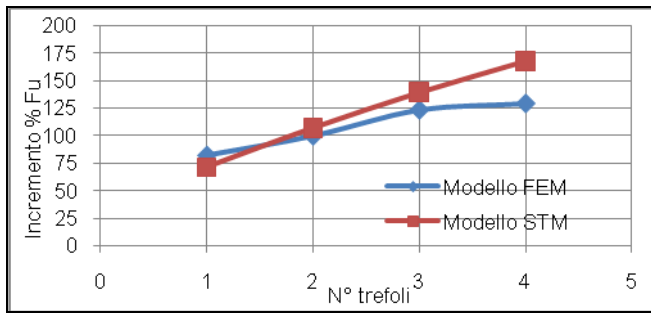


Figura 16: Incremento della forza ultima al variare del numero dei trefoli.

Un'ulteriore modellazione è stata eseguita per testare la validità di una differente distribuzione di trefoli denominato schema stellare, di agevole applicazione, che prevede l'inserimento dei trefoli in orizzontale per seguire i giunti di malta e in diagonale secondo le due direzioni (Figura 17).

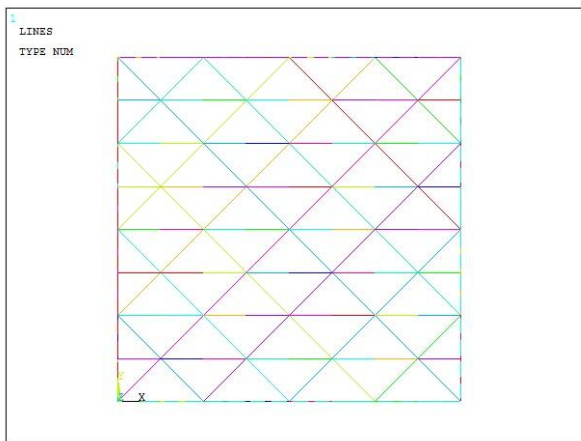


Figura 17: Schema stellare dei trefoli

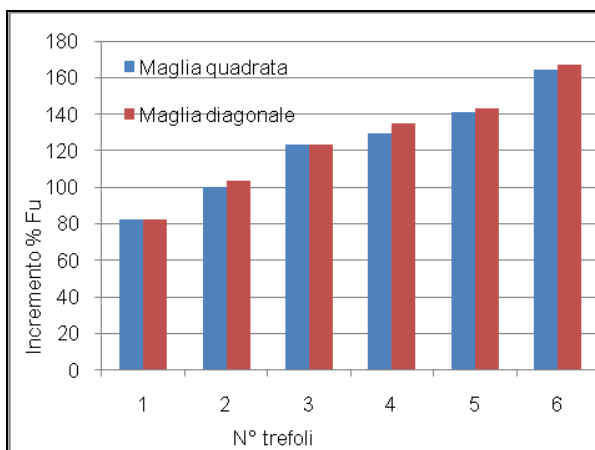


Figura 18: Incremento della forza ultima per trefoli disposti secondo lo schema stellare.

Le analisi eseguite hanno mostrato che, a parità del numero dei trefoli, la forza ultima che si raggiunge con il nuovo schema è superiore a quella relativa alla maglia quadrata. Tuttavia i valori significativi si apprezzano per rinforzi che prevedono almeno quattro trefoli. Tale risultato

porta ad affermare che questa nuova distribuzione è particolarmente idonea nel caso in cui il rinforzo richiede quantità elevate di trefoli.

4 CONCLUSIONI

Nel lavoro sono stati mostrati i primi risultati di un metodo di calcolo semplificato basato sul modello puntone-tirante proposto per il dimensionamento speditivo dell'intervento di rinforzo "Reticolatus" e per la verifica della muratura così rinforzata.

Le analisi presentate, sebbene ancora in fase iniziale, suggeriscono alcune considerazioni conclusive.

Le prove sperimentali precedentemente eseguite su murature esistenti senza rinforzo e con rinforzo hanno permesso di verificare i due modelli appositamente costruiti per descrivere il comportamento meccanico delle murature rinforzate con la tecnica del Reticolatus. Il modello semplificato ha fornito stime ed indicazioni sul dimensionato del rinforzo in acciaio nonché una verifica speditiva del pannello rinforzato e del miglioramento sismico conseguito. Il modello agli elementi finiti ha permesso insieme ai risultati delle prove sperimentali una buona calibrazione del modello semplificato.

Ulteriori analisi sono in corso di realizzazione per ulteriori validazioni del modello semplificato e per ottenere analisi parametriche utili per approfondire lo studio del comportamento meccanico della muratura rinforzata con la presente tecnica di rinforzo.

REFERENCES

- 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.
- Benedetti, A., Pela, L., Ramalho, M., 2010, Non Linear Reticular Models for Unreinforced and Reinforced Masonry analysis, *8th International Masonry Conference*, Dresden, Germany, 593-602..
- Borri, A., Castori G., Corradi, M., Speranzini, E. 2011. Shear Behaviour of Unreinforced and Reinforced masonry panels subjected to in situ diagonal compression tests, *Construction and Building Materials*.
- Borri, A., Corradi, M., Speranzini, E. & Giannantoni, A. 2010. Reinforcement of Historic Masonry with High Strength Steel Cords, *Journal of International Masonry Society, Masonry International*, 23, (3) 79-90.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Tassios, P. T. 1988. Masonry mechanics , *Liguori Publ.*, Napoli, (Italian Translation).
- 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