



HAL
open science

Modelli di pannelli murari rinforzati con fibre naturali : analisi numerica e sperimentale

Assunta Venneri, Paul Taforel, Frédéric Dubois

► To cite this version:

Assunta Venneri, Paul Taforel, Frédéric Dubois. Modelli di pannelli murari rinforzati con fibre naturali : analisi numerica e sperimentale. AIAS, Sep 2011, Palerme, Italy. 10p. hal-00806840

HAL Id: hal-00806840

<https://hal.science/hal-00806840>

Submitted on 2 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MODELLI DI PANNELLI MURARI RINFORZATI CON FIBRE NATURALI: ANALISI NUMERICA E SPERIMENTALE

A. Venneri^a, P. Taforel^b, F. Dubois^b

^a *Università della Calabria - Dipartimento di Strutture,
Via Ponte Pietro Bucci, 87036 Rende (CS), e-mail: assunta.venneri@unical.it*

^b *Laboratoire de Mécanique et Génie Civil – Université de Montpellier2,
Place E. Bataillon, 34095 Montpellier cedex 05,
e-mail: {[paul.taforel](mailto:paul.taforel@univ-montp2.fr),[frederic.dubois](mailto:frederic.dubois@univ-montp2.fr)}@univ-montp2.fr*

Sommario

Lo scopo del lavoro è quello di verificare l'efficacia del rinforzo a taglio di pannelli murari mediante l'impiego di un composito costituito da fibre unidirezionali di canapa e malta idraulica, specifica per interventi di rinforzo. Lo studio affronta la simulazione dell'azione tagliante agente nel piano di setti murari attraverso prove di compressione diagonale su pannelli esternamente rinforzati. I primi risultati sperimentali ottenuti hanno evidenziato un aumento significativo in termini di capacità resistente e di rigidità a taglio rispetto ai campioni testati senza rinforzo. I pannelli sono stati successivamente discretizzati all'interno del codice di calcolo LMGC90. Il modello proposto per le strisce di composito tiene in conto solo della modalità di rottura a trazione delle fibre nell'ipotesi di perfetta adesione al supporto murario. Le analisi numeriche risultano in buon accordo con le risultanze sperimentali, mostrando quindi la validità di questo primo approccio di modellazione numerica per il rinforzo.

Abstract

The present work aims to check for the effectiveness of the shear reinforcement on masonry panels by using a composite made by the union of unidirectional hemp fibers with hydraulic mortar, specific for strengthening interventions on masonry. The study deals with the simulation of in-plane shear action on masonry walls through diagonal compression tests on externally reinforced masonry panels. The first experimental results have already shown a significant increase in shear strength and stiffness compared to the samples tested without reinforcement. The panels have been subsequently discretized in the computer code LMGC90. Particularly, the model proposed for the composite strips takes into account only the fibre tensile failure mode with the hypothesis of perfect adhesion between reinforcement and masonry support. The numerical analysis are in good agreement with experimental data, showing the validity of this first numerical modeling approach for the reinforcement.

Parole chiave: muratura, fibre naturali, rinforzo, modellazione, DEM, LMGC90

1. INTRODUZIONE

Fra i metodi impiegati per migliorare le prestazioni meccaniche di elementi in muratura, uno dei più innovativi e promettenti appare il rinforzo esterno mediante l'uso degli FRP. Gli interessanti risultati della ricerca scientifica in questo specifico settore giustificano pienamente il crescente utilizzo di tali materiali in numerose applicazioni. D'altro canto, i materiali compositi, costituiti più comunemente da fibre di carbonio, di vetro o aramidiche, immerse in resine epossidiche o poliestere, presentano, per loro natura, un notevole impatto ambientale. Per questo motivo, negli ultimi anni è cresciuto l'interesse verso nuovi sistemi di rinforzo che fanno uso di fibre di origine vegetale immerse in

matrici costituite da malte tradizionali. Recenti studi hanno infatti evidenziato proprietà meccaniche delle fibre naturali confrontabili con quelle delle fibre di vetro, nonché una convenienza economica legata ai minori costi di produzione [1].

In tale contesto, nel presente lavoro si è scelto di indagare sul comportamento di pannelli murari rinforzati con fibre di canapa e malta idraulica sotto azioni di taglio agenti nel piano della muratura attraverso prove di compressione diagonale [2,3]. I provini sono stati rinforzati su entrambi i lati con strisce di composito secondo le disposizioni diagonale e a griglia ortogonale. Si è proceduto alla modellazione dei pannelli utilizzando i metodi degli elementi discreti (DEM), che costituiscono un importante strumento per lo studio di sistemi discontinui come i materiali granulari o la muratura. In particolare, nel presente lavoro ci si concentra su un metodo completamente implicito, l'approccio "Non Smooth Contact Dynamics" (NSCD), implementato nel software LMGC90. Si è adottata una modellazione classica agli elementi finiti per ciascuno dei blocchi mentre una legge di danneggiamento coesivo di interfaccia è stata utilizzata per modellare il comportamento della malta fra i mattoni. Cavi elasto-fragili sono stati invece impiegati per descrivere il comportamento a trazione delle strisce di composito, applicate al supporto murario nell'ipotesi di perfetta adesione.

2. INDAGINE SPERIMENTALE

Le prove di compressione diagonale sono state precedute da una serie di prove meccaniche per caratterizzare i materiali costituenti l'apparato murario. Le proprietà meccaniche dei mattoni e della malta sono state determinate effettuando prove di compressione monoassiale e di flessione. I valori più significativi delle caratteristiche meccaniche ed elastiche sono riportati in Tabella 1, dove ρ indica il peso specifico, E il modulo di Young, f_c la resistenza a compressione e f_t la resistenza a trazione. Quest'ultima è stata valutata riducendo del 20% il valore ottenuto da prove di flessione su tre punti.

Tabella 1: Caratteristiche meccaniche ed elastiche dei materiali

Materiale	ρ [Kg/ m ³]	E [MPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]
Laterizio	1780	1286	67.3	3.7
Malta	2090	537	19.6	4.7

Si è proceduto quindi alla realizzazione di prove di scorrimento su triplete (elementi a tre mattoni e due giunti di malta) per l'individuazione delle caratteristiche di interfaccia. In particolare, sono state condotte prove su un numero di 6 campioni in presenza di 3 diversi livelli di compressione ortogonale ai giunti (f_{pi}). Tali livelli di tensioni variano a seconda del valore della resistenza a compressione degli elementi in laterizio. Nel caso specifico, le prove sono state eseguite con valori di confinamento laterale pari a 0.2, 0.6 e 1.0 MPa, applicati ciascuno su un numero di 2 provini. L'interpolazione dei risultati sperimentali secondo il criterio di Mohr-Coulomb ha permesso di individuare i valori della coesione e del coefficiente di attrito, rispettivamente pari a 0.50 Mpa e a 1.0. La presenza, inoltre, di un trasduttore di spostamento posto su ciascun campione a circa metà della lunghezza del mattone centrale, ha consentito di monitorare la deformazione verticale e di tracciare le curve forza-spostamento per i diversi livelli di precompressione. La modalità di rottura manifestata dai campioni a fine prova, classificata nella norma di riferimento come di tipo A1, ha interessato l'area di unione laterizio/malta su una faccia (scivolamento del giunto) o divisa tra due facce del mattone (biforcazione nel giunto) (Figura 3).

Le prove di compressione diagonale sono state condotte su un totale di 8 pannelli murari a una testa, di dimensioni 51x51x12cm ($b \times h \times s$), con giunti di 1 cm. La procedura di prova consente di simulare l'azione tagliante agente nel piano di setti murari allo scopo di determinarne la resistenza e la rigidità. I provini, costituiti da laterizi pieni e malta cementizia, sono stati rinforzati su entrambi i lati con strisce di composito secondo due disposizioni di applicazione: in diagonale e a griglia ortogonale. Alcuni provini murari sono stati testati privi di rinforzo quali termini di riferimento per i successivi pannelli rinforzati. Per valutare l'efficacia delle fibre di canapa e potere eseguire un confronto con le fibre più comunemente impiegate negli interventi di rinforzo strutturale, alcuni provini sono stati testati utilizzando un tessuto costituito da fibre di vetro immerse nella stessa matrice in cui sono state

impregnate le fibre naturali. Inoltre è stata considerata la stessa quantità di rinforzo per le due configurazioni geometriche menzionate in modo da poter eseguire un confronto in termini di capacità tagliante e deformativa e di rigidezza. In particolare, la quantità $E_f \rho_f$ è stata mantenuta costante per tutte le prove eseguite sui pannelli rinforzati. ρ_f rappresenta il rapporto geometrico del rinforzo calcolato come $\rho_f = (b_f t_f) \times \cos \alpha / (h \times b)$, dove b_f e t_f sono la larghezza e lo spessore totale del composito nella direzione ortogonale alla fessurazione diagonale, α è l'angolo tra la direzione delle fibre del tessuto e le linee dei mattoni mentre h e b sono l'altezza e lo spessore del pannello murario. Tutti i campioni murari sono stati strumentati con dei trasduttori induttivi di spostamento (LVDT) posti lungo le diagonali su entrambe le facce del pannello (Figura 4). Ciò ha permesso di valutare le deformazioni sotto carico delle diagonali verticale e orizzontale.

I campioni nella configurazione non rinforzata sono indicati con la sigla URM. La denominazione adottata per le prove con rinforzo indica il tipo di fibra utilizzata (H-hemp, G-glass), la disposizione geometrica adottata (G-grid, D-diagonal), la larghezza b_f della striscia di composito (in cm) e il numero di strati applicati (Figura 1).

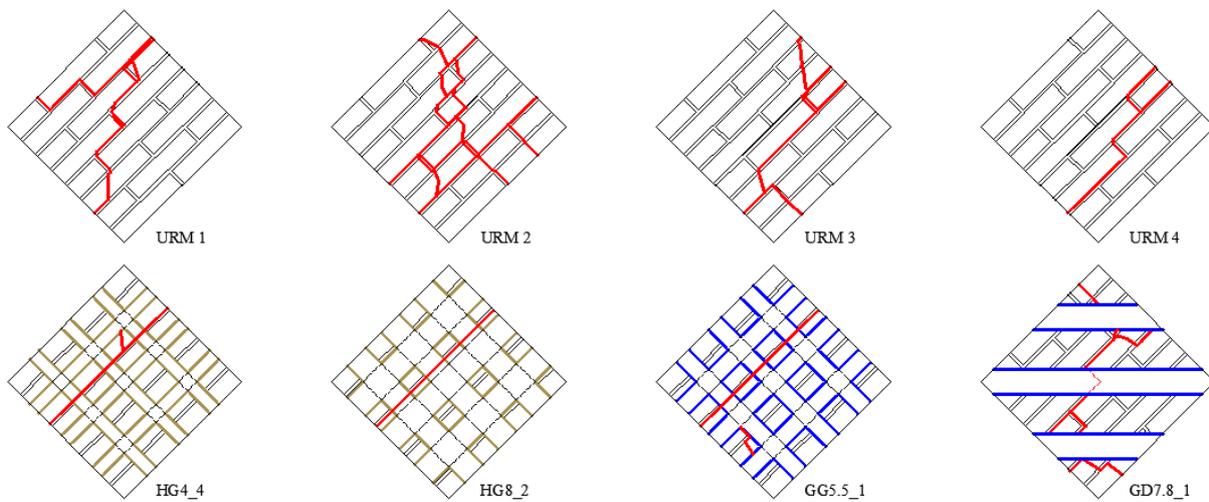


Figura 1: Modalità di crisi dei pannelli con e senza rinforzo

Nella Tabella 2 si riportano i risultati sperimentali ottenuti mentre in Figura 2 sono contenute le curve tensioni di taglio-deformazioni verticali, orizzontali e tangenziali.

Tabella 2: Risultati sperimentali per tipologia di pannello con variazione percentuale rispetto alle medie dei valori riferiti alla configurazione non rinforzata

Pannello	Carico di rottura [kN]	Tensione tangenziale nominale di rottura [MPa]	Variazione di resistenza [%]	Modulo elastico di taglio [MPa]	Variazione modulo elastico [MPa]	Tipo di rottura ^(*)
URM1	98.7	1.14	-	2449	-	DS
URM2	97.0	1.12	-	2265	-	DS
URM3	96.0	1.11	-	2098	-	DS
URM4	80.5	0.93	-	2498	-	SP
HG4_4	116.0	1.34	24.1	3065	31.7	JS
HG8_2	114.3	1.32	22.2	3096	33.0	JS
GG5.5_1	132.4	1.53	41.7	4128	77.3	JS
GD7.8_1	133.3	1.54	42.6	3772	62.0	DS

(*) DS - Diagonal Splitting; SP - Step Pattern; JS - Joint Sliding

I pannelli testati privi di rinforzo hanno manifestato una rottura di tipo fragile che ha interessato sia i ricorsi di malta che gli elementi resistenti in laterizio lungo la diagonale caricata (splitting), a eccezione del provino URM4 che è giunto al collasso con un valore inferiore del carico diagonale, associato a una rottura per scorrimento dei giunti (meccanismo di rottura “a scaletta”). Le prove sui

campioni non rinforzati hanno fornito una tensione media nominale di rottura pari a 1.08 MPa e un modulo di taglio medio di 2328 MPa. Nel caso dei provini rinforzati con le fibre di canapa secondo la disposizione a griglia, la crisi è avvenuta principalmente per scorrimento lungo un letto orizzontale di malta. Le strisce di composito hanno evidenziato un comportamento a flessione che ha evitato la crisi improvvisa del provino. Ciò mostra inoltre una buona resistenza di adesione tra matrice e supporto che, insieme al tipo di disposizione adottata, ha determinato una redistribuzione atipica dello stato tensionale nel pannello fino a giungere allo scivolamento del giunto orizzontale. In entrambi i casi il meccanismo di rottura non è stato penalizzato dal fenomeno della delaminazione.

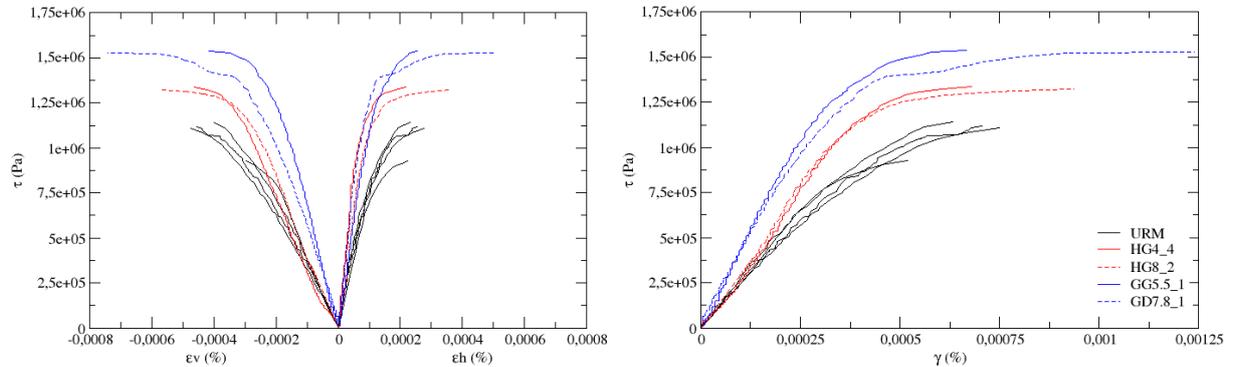


Figura 2: Diagrammi $\tau - \varepsilon_{v-h}$ e $\tau - \gamma$

Per quanto concerne invece l'utilizzo del tessuto in fibra di vetro, la presenza del rinforzo sul pannello ha determinato un incremento di resistenza di circa il 40% rispetto ai campioni di riferimento, il 20% in più rispetto ai provini rinforzati con le fibre di canapa, nonostante il rapporto ρE sia stato mantenuto costante per entrambi i materiali. La rottura del pannello nel caso di rinforzo a reticolo (GG5.5_1) ha interessato lo scivolamento di un giunto orizzontale e la rottura per trazione di alcuni elementi in laterizio lungo la diagonale caricata. Anche in questo caso la crisi del composito ha riguardato la flessione delle fibre, scongiurando la delaminazione. Tuttavia, in analogia ai risultati delle prove con il tessuto di canapa, non si è avuto un cospicuo aumento delle deformazioni ultime. Infine, la curva $\tau - \gamma$ riferita alla prova GD7.8_1 mostra un comportamento pseudo-duttile a rottura, a indicare che la disposizione del rinforzo lungo la diagonale tesa del provino rappresenta la soluzione più vantaggiosa ai fini dell'aumento delle deformazioni ultime. La rottura per contro è avvenuta in maniera più improvvisa e la crisi del rinforzo ha interessato sia la rottura delle fibre in trazione che la delaminazione nelle zone di estremità del campione murario. L'andamento pressoché simmetrico delle lesioni lungo la diagonale compressa evidenzia una distribuzione omogenea degli sforzi nel pannello.



Figura 3: Prove su triplete

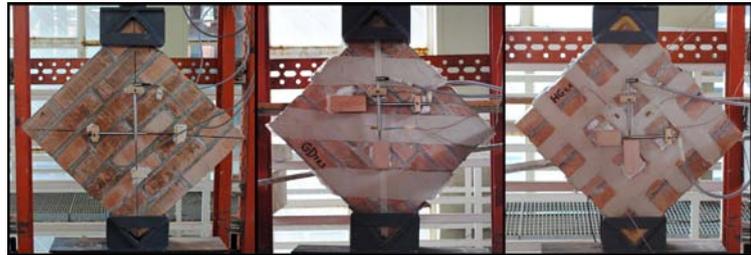


Figura 4: Prove di compressione diagonale

3. MODELLAZIONE NUMERICA

L'analisi numerica presentata di seguito ha lo scopo di fornire dei modelli capaci di rappresentare il comportamento sperimentale esibito dai pannelli murari durante le prove descritte nel paragrafo precedente. La modellazione è partita quindi dall'analisi dei dati sperimentali ottenuti su elementi semplici in muratura non armata fino ad arrivare alla proposta di un primo modello numerico per il tipo di rinforzo utilizzato.

3.1. Il metodo NSCD e il software LMGC90

A livello macroscopico, il comportamento di un materiale discontinuo può essere assimilato a quello di un sistema continuo equivalente. I metodi "classici" di modellazione, come il Metodo degli Elementi Finiti (FEM), possono essere utilizzati con la difficoltà di disporre di modelli reologici capaci di descrivere il comportamento complesso dei sistemi modellati. Per scale più piccole, la modellazione deve tener conto sia del comportamento di ciascun componente della struttura ma anche delle interazioni di ogni elemento con quello adiacente; ed è ciò che il Metodo degli Elementi Discreti (DEM) si propone di descrivere e, in particolare, il metodo NSCD (*Non Smooth Dynamic Contact*) introdotto e sviluppato da J.J. Moreau e M. Jean [4,5,6,7] e implementato nel codice di calcolo LMGC90. Tale programma [8,9,10], dedicato alla modellazione di una vasta collezione di oggetti, permette di gestire i problemi multicontatto. E' utilizzato per modellare il comportamento globale di sistemi discreti (materiali granulari, edifici costituiti da blocchi, ecc.) [11], considerando il comportamento dinamico proprio di ogni componente del sistema in interazione con gli altri elementi. La relazione tra dinamica e interazione, che consente di risolvere questo tipo di problema, si effettua per mezzo degli operatori lineari ${}^T H(q)$ e $H(q)$, costruiti grazie a delle considerazioni cinematiche e di dualità, e permette di collegare velocità relative al contatto U e velocità dei corpi u o, ancora, di calcolare la risultante degli sforzi di contatto r a partire dalle forze di contatto R .

$$H(q) : R = \{R^\alpha\} \rightarrow r = \sum_\alpha H^\alpha(q) R^\alpha \quad \text{e} \quad {}^T H(q) : u \rightarrow U = \{U^\alpha\} = \{{}^T H^\alpha(q) u\}$$

$$u \leftarrow \text{Equazioni della dinamica} \rightarrow r$$

$${}^T H(q) \downarrow \qquad \qquad \qquad \uparrow H(q)$$

$$U^\alpha \leftarrow \text{Leggi di contatto} \rightarrow R^\alpha$$

Il codice di calcolo LMGC90 sembra, quindi, particolarmente adatto per modellare il comportamento di strutture in muratura. La scelta delle leggi di interazione reciproca tra i blocchi (attrito, coesione,...) e dei modelli volumetrici (rigido, deformabile) da assegnare ai vari elementi della struttura, permette di rappresentare il comportamento di questi assemblaggi discreti e le fenomenologie che generalmente si osservano (ribaltamento, scivolamento, comportamento misto).

3.2. Modellazione della muratura

La calibrazione dei modelli volumetrici e delle leggi di interazione è essenziale per rappresentare adeguatamente il comportamento delle strutture modellate. Nel caso di strutture in muratura con giunti di malta, i parametri del modello vengono calibrati in modo da ottenere la rigidezza apparente della struttura nella fase di risposta lineare e lo stesso comportamento a rottura (stima della risposta al picco - forza e spostamento -, superfici di rottura). Nel presente studio è stata utilizzata la prova di taglio su tripletta (Figura 5) sulla quale sono stati applicati i 3 diversi livelli di confinamento laterale. I modelli così ottenuti sono stati poi convalidati mediante la simulazione della prova di compressione diagonale (Figura 6) su una struttura più complessa e che successivamente è stata utilizzata per testare i rinforzi.

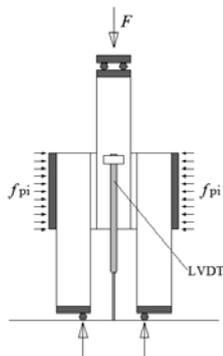


Figura 5: Prova di taglio su tripletta

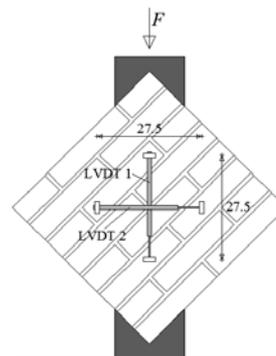


Figura 6: Prova di compressione diagonale

Calibrazione dei modelli volumetrici

La rigidezza apparente della struttura è fisicamente dovuta alle rigidzze apportate dagli elementi componenti (mattoni e malta), descritte dal modulo di Young dei materiali (E_b , E_m) e dal loro coefficiente di Poisson (ν_b , ν_m). Questi parametri, ottenuti sperimentalmente, sono stati utilizzati per una prima validazione numerica. La struttura, costituita da tre mattoni e due giunti modellati in 2D con il metodo degli elementi finiti, è descritta attraverso un'unica mesh per la quale il comportamento dei due materiali è rappresentato localmente da modelli elastici lineari senza danneggiamento (E , ν , ρ). La risposta della struttura, messa a confronto con le prove sperimentali, sembra convalidare la descrizione dei modelli volumetrici proposti. La rigidezza apparente della tripletta è correttamente descritta. La differenza tra la rigidezza apparente modellata e quella ottenuta sperimentalmente è dell'ordine dell'11% (Figura 7).

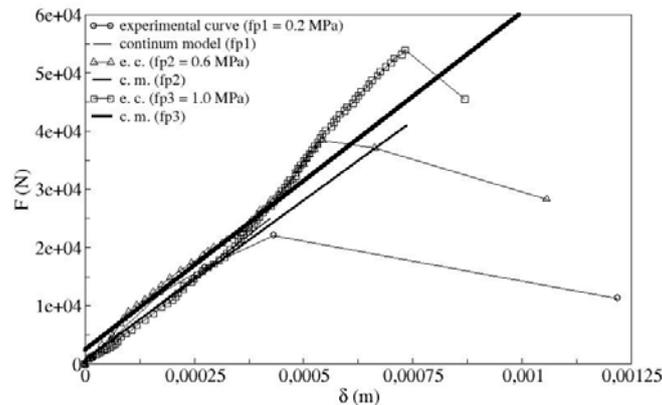


Figura 7: Confronto tra la risposta del modello continuo deformabile e le curve sperimentali ottenute dalle prove sulle triplette

Calibrazione dei modelli di interfaccia e di danneggiamento

La rottura della tripletta è introdotta dal modello coesivo di interfaccia di tipo RCC [12] che considera l'effetto del danneggiamento (Figura 9). Si è scelto di utilizzare tale modello per riprodurre il comportamento della malta e dell'interfaccia malta/mattoni. La rigidezza normale c_N e quella tangenziale c_T del modello sono state calibrate in modo da conservare la rigidezza apparente della struttura e utilizzando dei metodi di omogeneizzazione locale (Figura 8) [13]. Per la rottura, il modello necessita di caratterizzare l'energia consumata. Tale energia di "decoesione" permette di determinare, insieme alle rigidzze di interfaccia, la tensione e lo spostamento critici a rottura.

Modello continuo	
mattoni	$E_b = 1290 \text{ Mpa}; \nu_b = 0,30$
malta	$E_m = 550 \text{ Mpa}; \nu_m = 0,25$
Modello di interfaccia	
elemento	$E_b = 1290 \text{ Mpa}; \nu_b = 0,30$
interfaccia	$C_N = 9,3e+10 \text{ N/m}^3;$ $C_T = 3,6e+10 \text{ N/m}^3$

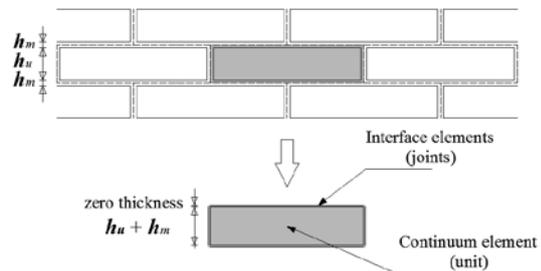


Figura 8: Proprietà dei materiali e descrizione dei modelli continuo e di interfaccia

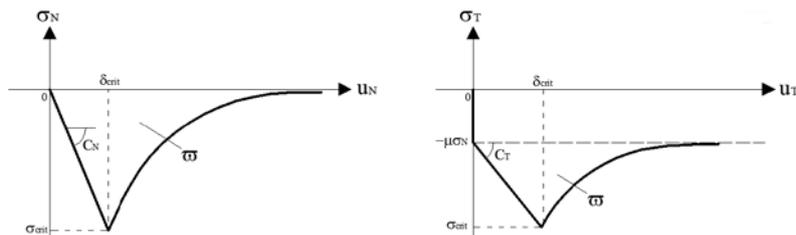


Figura 9: Legge di danneggiamento coesivo

Con il modello di interfaccia adottato si può determinare un gioco di parametri che permette di descrivere adeguatamente la rigidità apparente della struttura e la rottura della tripletta (Figura 10). Per le diverse prove con i livelli di precompressione variabili, la rottura si è verificata per valori forza-spostamento vicini ai risultati sperimentali (Tabella 3). Il regime post-picco si riferisce a un comportamento classico: la risposta della struttura converge verso un valore di soglia corrispondente all'attrito tra i mattoni e proporzionale ai livelli di confinamento applicati alle diverse prove.

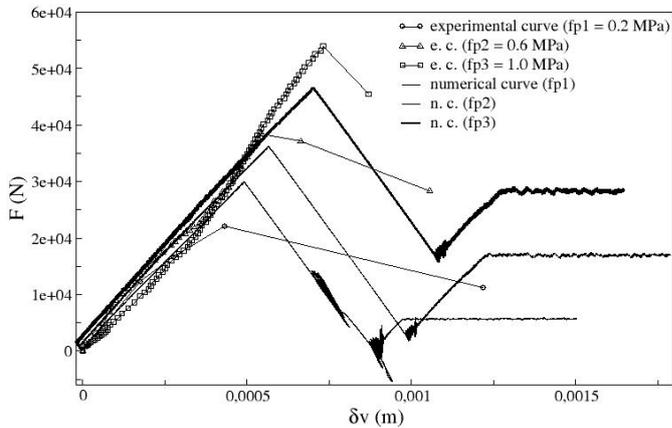


Figura 10: Confronto tra la risposta del modello deformabile discreto e i risultati sperimentali

Tabella 3: Stima delle risposte di picco

Prova	F _{max} (kN)		
	Exp.	Num.	Errore
f _{p1}	22,06	29,95	35,7%
f _{p2}	38,41	36,20	5,7%
f _{p3}	53,94	46,48	13,8%
Prova	δ _{crit} (mm)		
	Exp.	Num.	Errore
f _{p1}	0,440	0,490	11,0%
f _{p2}	0,545	0,560	2,7%
f _{p3}	0,731	0,710	2,8%

Validazione dei modelli volumetrici e di interfaccia su un elemento murario semplice

I modelli volumetrici e di interfaccia sono stati poi convalidati su una struttura più complessa attraverso una prova di compressione diagonale. Il pannello, delle stesse dimensioni dei provini testati sperimentalmente, è stato modellato come in precedenza: i mattoni sono stati modellati per mezzo di corpi deformabili elastici lineari, e i giunti di malta tramite una legge di interfaccia di tipo RCC calibrata sulle prove eseguite sulle triplette. La simulazione numerica conduce a dei buoni risultati riguardanti il comportamento lineare della struttura ma sovrastima significativamente la rottura (coppia forza-spostamento), nonostante si osservi un quadro fessurativo simile a quello osservato sperimentalmente. L'energia di decoesione, che guida la rottura, è stata quindi ricalibrata in modo da descrivere adeguatamente la crisi del pannello (Figura 11). Questa ricalibrazione sembra dovuta alla scelta di voler modellare la presenza della malta direttamente nel modello d'interfaccia. In questo caso non si è in grado di riprodurre alcun effetto strutturale dovuto allo spessore del giunto.

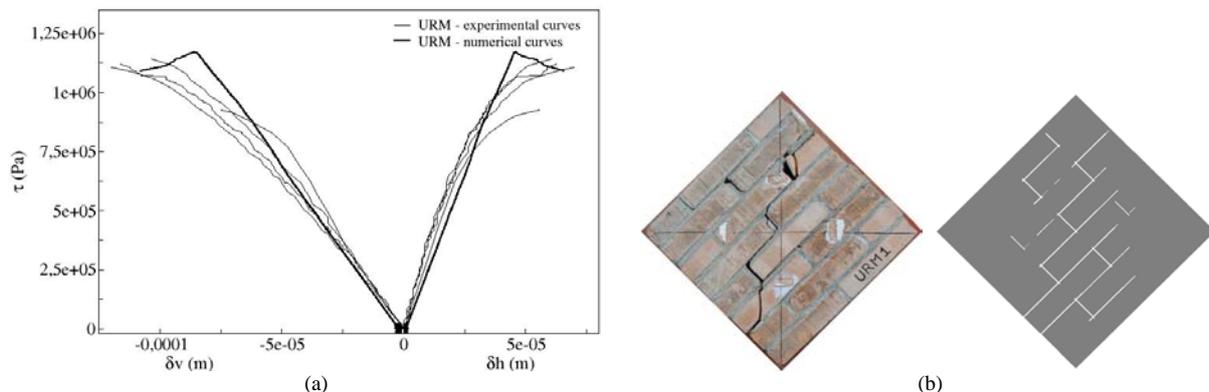


Figura 11: (a) Confronto tra le curve τ - ϵ_{v-h} sperimentali e quelle del modello di interfaccia ricalibrato; (b) Confronto tra la superficie di rottura sperimentale e quella ottenuta dalla simulazione

3.3. Modellazione del rinforzo

Modello proposto

Il modello proposto di seguito vuole rappresentare unicamente, in un primo approccio, la modalità di rottura a trazione delle fibre. Esse sono state modellate per mezzo di cavi collegati agli elementi della muratura mediante un legame perfetto. La modalità di rottura associata al fenomeno della delaminazione, e cioè la perdita di aderenza tra rinforzo e supporto, non è stata quindi inclusa nel modello. I cavi sono stati caratterizzati da una rigidità che traduce quella del complesso fibra/matrice - caratterizzata dal modulo di elasticità E_c - e da una tensione di rottura a trazione. Il cavo agisce come una molla, trasmettendo ai corpi ai quali è collegata una forza di ripristino proporzionale al suo allungamento. Al di là di una forza limite di trazione (F_{max}), definita considerando l'allungamento a rottura della molla, questa è irreversibilmente danneggiata e non riprende più alcuno sforzo (Figura 12).

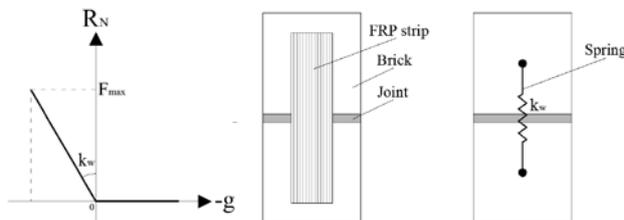


Figura 12: Modellazione del rinforzo

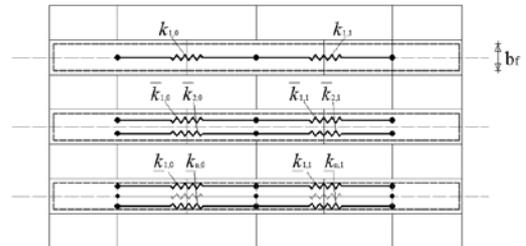


Figura 13: Disposizione delle reti di molle

Per meglio rappresentare la fenomenologia del rinforzo, le strisce non sono state modellate da un unico cavo ma da una serie di cavi che assicurano la continuità del composito, collegando localmente tutti gli elementi in muratura su cui il tessuto è applicato. Diverse disposizioni possono essere considerate per descrivere questa rete di molle: disposizione monoassiale di una serie di molle per tutta la lunghezza della striscia a metà della sua larghezza, disposizione biassiale di due serie in posizione simmetrica rispetto alla larghezza della striscia, ecc. (Figura 13).

3.4. Modellazione del complesso muratura/rinforzo

I modelli adottati per la muratura corrispondono a dei modelli classici, identici a quelli calibrati nel sottoparagrafo 3.2., ai quali è stato aggiunto il composito, ovvero differenti reti di molle, secondo diverse configurazioni.

Configurazione diagonale con tessuto in fibra di vetro

Per motivi di regolarità e di simmetria, il rinforzo diagonale è stato modellato secondo una disposizione monoassiale delle molle e in modo tale che queste abbiano tutte la stessa lunghezza e siano applicate al muro simmetricamente (Figura 14).

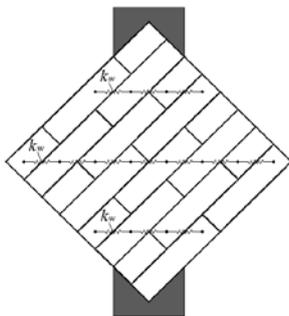


Figura 14: Configurazione diagonale

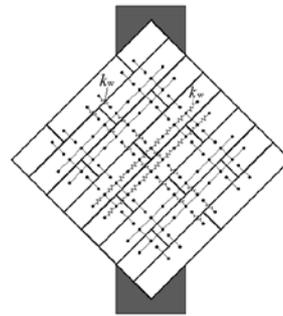


Figura 15: Configurazione a reticolo

La simulazione numerica ha permesso di ritrovare il comportamento della struttura rinforzata (Figura 16(a)). Il composito lavora in trazione e in modo simmetrico. La rigidità apparente della struttura è

modificata per la presenza del rinforzo in modo del tutto paragonabile a quanto osservato sperimentalmente e la struttura viene caricata oltre il carico ammissibile senza rinforzo; la crisi avviene per rottura di un cavo, per delle coppie forza-spostamento e secondo superfici di rottura confrontabili con quelle sperimentali (Figura 16(b)).

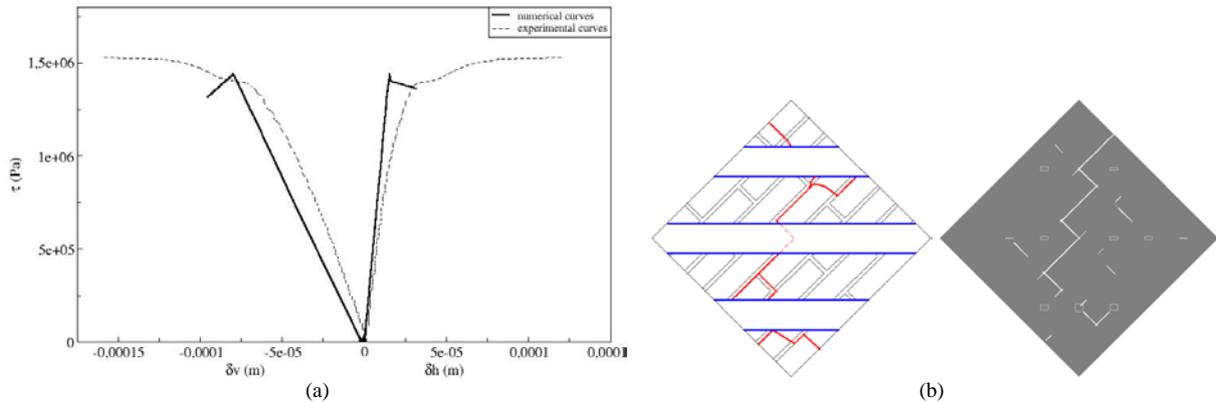


Figura 16: (a) Confronto tra le curve di risposta numeriche e sperimentali del muro rinforzato; (b) Confronto tra la superficie di rottura sperimentale e quella ottenuta dalla simulazione

Configurazione a griglia con tessuto in fibra di canapa

Per quanto riguarda la configurazione reticolare del rinforzo, è stato scelto di modellare il composito secondo una disposizione biassiale delle serie di cavi al fine di sollecitare tutti gli elementi su cui sono fissate le strisce di rinforzo (Figura 15). La disposizione del composito lascia intendere che esso non lavora in trazione pura, e ciò viene convalidato dalla simulazione numerica (Figura 17). Il modello proposto per la modellazione dei rinforzi raggiunge dunque i suoi limiti per disposizioni del composito che portano a sollecitazioni e modalità di rottura più complesse (nel caso in esame, sollecitazione e rottura a flessione).

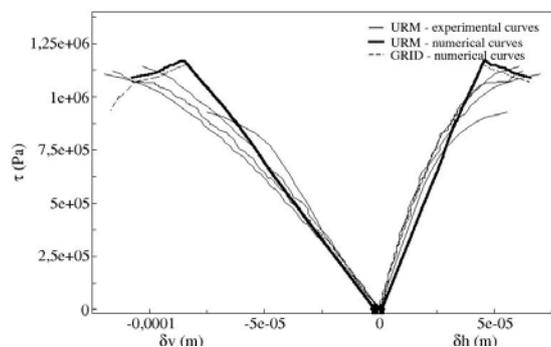


Figura 17: Confronto tra le curve numeriche e sperimentali di risposta dei muri URM e quelle numeriche del muro rinforzato secondo la configurazione a griglia

4. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

I risultati sperimentali presentati in questo lavoro dimostrano chiaramente l'efficacia del rinforzo di strutture in muratura mediante l'uso dei materiali compositi. Le prove condotte su elementi strutturali semplici mostrano incrementi di resistenza a taglio del 20-40% a seconda del tipo di fibra utilizzata. Le alte prestazioni meccaniche, associate alla facilità di installazione e ai costi contenuti (soprattutto nel caso delle fibre di canapa), sembrano assicurare una soluzione promettente per il rinforzo delle strutture murarie. L'impiego di tali materiali, però, deve essere oggetto di ulteriori e più approfondite indagini. I campi di ricerca in questo settore sono molto vasti: studio della scelta della fibra, influenza della matrice sulle prestazioni del composito finale, studio della disposizione del tessuto, ecc., tanto che un approccio numerico al problema risulta essenziale per rispondere alle diverse tematiche.

L'analisi numerica presentata in questo lavoro appare promettente. Essa permette già di modellare il comportamento del composito utilizzato per stati di sollecitazione semplici (trazione). I modelli proposti devono essere quindi affinati per essere in grado di rappresentare modalità di crisi più complesse (flessione, delaminazione, ecc.), oltre ai modelli che rappresentano il comportamento della muratura. Alcuni lavori sono stati avviati per fornire delle modellazioni avanzate della muratura che tengano conto della fessurazione dei blocchi. Ulteriori sviluppi sono previsti per proporre modelli più sofisticati per il rinforzo. L'evoluzione dei modelli ha come obiettivo ultimo quello di studiare l'influenza della modalità di messa in opera dei tessuti usati per il rinforzo di edifici in muratura (orientamento delle strisce, larghezza, dissimetria di applicazione, ecc.) e l'influenza di questo specifico rinforzo su elementi strutturali più complessi (pareti con aperture, ecc.) soggetti ad azioni sismiche.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia lo staff del Laboratorio di Meccanica e Ingegneria Civile (LMGC) dell'Università di Montpellier 2 e, in particolare, il dott. Frédéric Dubois per i preziosi contributi e consigli forniti e per aver messo a disposizione il codice LMGC90 utilizzato per eseguire le simulazioni numeriche. L'attività sperimentale è stata finanziata nell'ambito del progetto RELUIS-DPC 2010-2013, Linea di ricerca n. 3 – Task 3.1 “Sviluppo ed analisi di nuovi materiali per l'adeguamento sismico” – Coordinata dai proff. L. Ascione e .A. Prota.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Wambua, J. Ivens, I. Verpoest, “Natural Fibers: can they replace glass in fibre reinforced plastics?”, *Composites Science and Technology*, Elsevier, Vol. 63, 1259–1264 (2003).
- [2] M.R. Valluzzi, D. Tinazzi, C. Modena, “Shear behavior of masonry panels by FRP laminates”, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol. 16, 409–416 (2002).
- [3] G. Marcari, G. Manfredi, A. Prota, M. Pecce, “In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 38, 887–901 (2007).
- [4] M. Jean, J.J. Moreau, “Unilaterality and dry friction in the dynamic of rigid body collections”, *Composites Science and Technology*, ed. A. Curnier, 31–48 (1992).
- [5] M. Jean, “Frictional contact in collections of rigid and deformable bodies: numerical simulation of geomaterials”, *Mechanics of geomaterials Interfaces*, A.P.S. Saladurai and Mr. J.J. Bolt, Elsevier Science, Amsterdam, 463–486 (1995).
- [6] M. Jean, “The non-smooth contact dynamic method computer methods in applied mechanics and engineering”, *Comput. Methods appl. mech. Eng.*, Vol. 177, 235–257 (1999).
- [7] J.J. Moreau, “Unilateral contact and dry friction in finited freedom dynamics”, *CISM Races and Readings*, 302 Springer-Verlag, 1–82 (1998).
- [8] F. Dubois, M. Jean, “Une plateforme de développement dédiée à la modélisation des problèmes d'interaction”, In M. Pottier-Ferry, M. Bonnet et A. Bignonnet éditeurs, 6ème Colloque National en Calcul des Structures, Giens, Vol. 1, 111–118 (2003).
- [9] F. Dubois, M. Jean, M. Renouf, R. Mozul, A. Martin, M. Bagnéris, “LMGC90”, 11ème Colloque National en Calcul des Structures, Giens (2011).
- [10] A. Martin, M. Bagnéris, F. Dubois, R. Mozul, “Conception d'un outil adapté à la mise en données des systèmes discrets”, 10ème Colloque National en Calcul des Structures, Giens, (2011).
- [11] F. Radjaï, F. Dubois, “Modélisation numérique discrète des matériaux granulaires”, *Hermès Sciences*, Lavoisier (2010).
- [12] Y. Monerie, “Fissuration des matériaux composites : rôle de l'interface fibre / matrice”, PhD Thesis, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II (2000).
- [13] P.B. Lourenço, “Computational strategies for masonry structures”, PhD Thesis, Technische Universiteit Delft (1996).