



Caratterizzazione meccanica del comportamento ciclico di murature storiche rinforzate con sistema FRCM sottoposte a test di compressione diagonale

Michele Angiolilli^a, Amedeo Gregori^a, Daniele Martini^b

^a Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Via Giovanni Gronchi, 67100 L'Aquila, Italy

^b Aquilaprem S.r.l., Nucleo Industriale di Bazzano, 67100 L'Aquila, Italy

Keywords: Edifici esistenti; muratura di pietra; fibre di vetro; test ciclici; ancoraggi; malta di calce; NHL

ABSTRACT

Gli eventi sismici mettono puntualmente in evidenza l'insufficiente sicurezza del costruito storico in muratura di pietrame, dovuto sia al loro intrinseco comportamento meccanico quasi-fragile che all'inadeguatezza dei sistemi di rinforzo adottati in passato. Ad oggi, il sistema di rinforzo FRCM è una delle tecniche maggiormente utilizzate nel campo del consolidamento di strutture murarie danneggiate. Nel presente lavoro sono illustrati i risultati di prove di compressione diagonale cicliche, eseguite in situ su pannelli di muratura di pietrame di un edificio storico dell'Aquila, per la caratterizzazione di un sistema di rinforzo FRCM. Tale sistema è costituito da tessuti in fibra di vetro immersi in una malta di calce idraulica naturale e da connettori sia in fibra di carbonio, posizionati in corrispondenza nei quattro spigoli dei pannelli murari, che metallici, rivestiti da un tessuto in fibra di carbonio e posizionati nel centro dei pannelli. I risultati ottenuti hanno messo in evidenza la propensione delle murature storiche di pietrame a modificare il loro comportamento meccanico durante la storia di carico applicata, in funzione del loro stato deformativo. Tali risultati sono in linea con la natura quasi-fragile dei materiali eterogenei, soggetti al fenomeno di fratturazione per via della loro natura disgregativa. L'elaborazione dei dati sperimentali dimostra come l'applicazione del sistema FRCM determini un comportamento meccanico compatibile con quello delle murature di pietrame, incrementandone le caratteristiche meccaniche senza snaturarne il comportamento originario, dimostrandosi, quindi, un sistema affidabile per la conservazione del patrimonio edilizio storico.

1 INTRODUZIONE

L'intrinseca fragilità ed estrema vulnerabilità del costruito storico si è resa particolarmente evidente anche in occasione dei più recenti eventi sismici italiani (Abruzzo 2009, Emilia 2012, Amatrice 2016). Infatti, le murature storiche, soprattutto quelle realizzate con unità di pietrame, sono caratterizzate da modalità di rottura fragili dovute principalmente ai giunti di malta che costituiscono la zona debole del sistema resistente (Vasconcelos e Lourenço 2009). Tali modalità di rottura contrastano con i criteri di duttilità e dissipazione dell'energia che, oggi, costituiscono i principi di sicurezza nel progetto delle strutture e nella salvaguardia della vita degli occupanti nei confronti di azioni eccezionali. Per tale motivo è necessario investigare dettagliatamente forme di rinforzo che consentano di ottenere incrementi in termini di resistenza e duttilità, rispettando i

principi di compatibilità, traspirabilità e reversibilità (Otoni e Coisson 2015). In passato, le forme di rinforzo praticate nelle murature (consolidamento attraverso iniezioni di resine, l'esecuzione di perforazioni armate e l'applicazione di intonaci strutturali realizzati in calcestruzzo armato) rappresentavano soluzioni non in linea con tali principi.

Ad oggi, il sistema di rinforzo FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) è una delle tecniche maggiormente utilizzate nel campo del consolidamento e della riabilitazione di strutture murarie danneggiate (Nanni et al 2013, Turk 2013). Questo perché, in confronto con le tecniche tradizionali utilizzate in passato, rappresenta una soluzione efficace sia in termini di bassa invasività che di facilità di applicazione. Nei sistemi FRCM vengono preferite malte a base di calce naturale (NHL, Natural Hydraulic Lime) in quanto ritenute soluzioni più compatibili con la natura delle strutture murarie storiche. Tali malte sono utilizzate per evitare problemi di compatibilità, traspirabilità e reversibilità degli

interventi che si riscontrerebbero nell'utilizzo di matrici organiche di natura polimerica (Gregori et al. 2017).

In questo studio, i risultati di una campagna di prove effettuate su pannelli murari rinforzati con sistema FRCM, vengono presentati per investigare la propensione delle murature storiche di pietrame a modificare le loro proprietà meccaniche in funzione del loro stato di danneggiamento, in linea con la previsione del comportamento quasi-fragile dei materiali eterogenei soggetti al fenomeno di fratturazione dovuta alla loro natura disgregativa.

2 PROGRAMMA SPERIMENTALE

I test di caratterizzazione sperimentale del rinforzo FRCM hanno previsto l'esecuzione di 4 prove cicliche monotone quasi statiche, condotte fino al raggiungimento della condizione di rottura dei pannelli murari. I test sono stati eseguiti nella configurazione di compressione diagonale descritta in (ASTM E 519 2007). In particolare, 2 test sono stati realizzati su murature rinforzate con sistema FRCM e 2 su murature non rinforzate. Tali test sono stati eseguiti, in situ, su pannelli provenienti dalla sede comunale "Palazzo "Margherita" dell'Aquila (Figura 1).



Figura 1. Vista dell'ingresso principale di Palazzo Margherita, sito nel centro storico di L'Aquila.



Figura 2. Tessitura muraria, riscontrata all'interno di Palazzo Margherita, realizzata in pietrame disordinato e malta argillosa di basse proprietà meccaniche.

Tale struttura è rappresentativa degli edifici storici in muratura di pietrame irregolare (Figura 2) presenti nel territorio aquilano, fortemente danneggiati nel sisma del 2009 (Carocci e Lagomarsino 2009).

In accordo alla (ASTM E 519 2007), le dimensioni dei pannelli testati sono state scelte pari al valore di circa 1.2m sia in altezza che in larghezza. Lo spessore delle murature analizzate è variato nel range 0.5÷0.75m.

Prima della realizzazione delle prove, è stato necessario isolare i pannelli da alcune pareti murarie dell'edificio. Tale operazione è stata realizzata con l'esecuzione di quattro tagli realizzati con sega circolare o filo diamantato (Figura 3). La sequenza di tale operazione ha previsto prima l'esecuzione del taglio orizzontale superiore, quindi dei due tagli verticali ed infine del taglio orizzontale inferiore (che interessa solo una parte della larghezza del pannello).

Dopo tale procedura, si è proceduto al montaggio dell'apparato di prova posizionando gli elementi di carpenteria metallica (denominati "cuffie") in corrispondenza di due spigoli opposti del pannello (Figura 3 e 4). Al fine di non generare concentrazioni localizzate del carico, è stato interposto uno strato di malta tenera a presa rapida, di circa 1cm di spessore, nell'interfaccia cuffia-muratura.

È stato, quindi, posizionato il sistema di carico, mediante l'inserimento di due martinetti idraulici e una cella di carico, e il sistema di misura, mediante l'applicazione di quattro trasduttori (2 per ciascun lato del pannello), la cui disposizione è illustrata in Figura 3 e Figura 4.



Figura 3. Allestimento di una delle 4 prove di compressione diagonale eseguita su un pannello di prova ricavato da una muratura esistente.

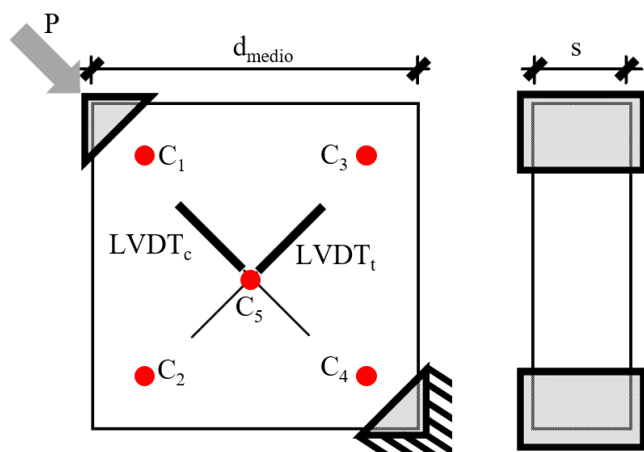


Figura 4. Schema rappresentativo della prova di compressione diagonale. Il carico P è applicato sulla cuffia posizionata in alto e trasferito al pannello murario grazie al sistema di contrasto imposto sulla cuffia posizionata in basso. I baricentri dei connettori C_1 , C_2 , C_3 , C_4 (in fibra di carbonio) sono posizionati a circa 22.5cm dai lati del pannello murario, mentre il connettore C_5 (barra di acciaio rivestito con tessuto in fibra di carbonio) è posizionato al centro del pannello. Gli estensimetri $LVDT_c$ e $LVDT_t$, che consentono la misura degli spostamenti di compressione e trazione rispettivamente, sono posizionati su entrambe le facce del pannello.

In particolare, la storia di carico è stata applicata con un incremento di P costante di circa 20 ± 5 kN per ogni ciclo. Inoltre, è stato necessario effettuare un ciclo di carico preliminare, producendo una spinta di circa 5 kN in modo da verificare il corretto posizionamento della carpenteria metallica, il funzionamento dell'apparato di prova e del sistema di acquisizione.

2.1 Strumentazione adottata

Il carico di compressione P , applicato sulla cuffia metallica posta in corrispondenza dell'angolo superiore della diagonale principale del pannello murario, è stato applicato tramite un martinetto idraulico (mod. COF30N250 - Euro Press Pack S.p.a.) con l'ausilio di una pompa oleodinamica (mod. VPM4 12/03547 - Euro Press Pack S.p.a.).

Per la lettura del carico è stato utilizzato un manometro (mod. BIT02B - AEP Transducers) con un sistema di acquisizione dati composto da un amplificatore di misura a 24 bit (mod. QuantumX MX840B - H.B.M. Italia S.r.l.), un totale di quattro sensori di spostamento millesimali di tipo induttivo LVDT (H.B.M. Italia S.r.l.) e una cella di carico (H.B.M. Italia S.r.l.).

2.2 Preparazione dei pannelli di prova

Per la realizzazione dei due pannelli consolidati con sistema FRCM sono state realizzate le seguenti lavorazioni:

1. Lavaggio propedeutico e iniezione del muro;
2. Realizzazione dei fori di diametro pari a 30 mm per mezzo di trapano a rotazione, in corrispondenza dei punti predisposti per l'allocazione dei connettori (negli angoli e nel centro dei pannelli murari);
3. Inserimento dei connettori trasversali in fibra di carbonio $\varnothing 10$ mm AQNector FC-10-4600 non sfioccati (in corrispondenza degli angoli dei pannelli) e una barra $\varnothing 12$ mm in acciaio B450C ad aderenza migliorata rivestita con tessuto quadriassiale in fibra di carbonio AQTape 4AX-380C (in corrispondenza del centro del paramento murario);
4. Iniezione dei perfori con malta a base di NHL3.5 CI15;
5. Applicazione del primo strato di malta strutturale M15 a base di NHL3.5 CH15 di spessore 15 mm circa, su supporto adeguatamente umettato;
6. Applicazione della rete in fibra di vetro A.R. a maglia 25x25 mm AQMesh 240V;
7. Sfiocco degli ancoraggi sulla rete di armatura, su un'impronta di superficie circolare media di 30 mm, saturandoli con malta bicomponente Bridge System;
8. Applicazione fresco su fresco del secondo strato di malta strutturale CH15, di spessore pari a circa 15 mm (per ottenere uno spessore totale del rinforzo di malta pari a 30 mm).

2.3 Procedura di analisi dei dati sperimentali

Il test di compressione diagonale è ampiamente utilizzato per determinare le proprietà meccaniche delle murature (Borri e Corradi 2001, Borri et al. 2004, Corradi 2003).

Esistono due standard internazionali per questo tipo di test, tra cui (ASTM 2007, RILEM).

Nel presente lavoro, l'interpretazione dei risultati è condotta dallo standard ASTM, il quale presuppone che il test di compressione diagonale produca uno sforzo di taglio uniforme nel pannello murario. Tuttavia, la distribuzione degli sforzi di taglio è tutt'altro che uniforme e il pannello non è caratterizzato da una condizione di taglio puro (Magenes et al. 2010). Infatti, per

avere una distribuzione uniforme della tensione sul pannello, oltre ad una forza P di compressione agente su una diagonale del pannello, sarebbe necessario applicare un'ulteriore forza P di trazione sull'altra diagonale.

Tuttavia, quest'ultima condizione risulterebbe alquanto complessa nelle modalità operative. Pertanto, in accordo con ASTM, la resistenza di trazione della muratura τ viene ottenuta applicando una forza P solo lungo la diagonale principale (Figura 3) e stimata con la seguente relazione:

$$\tau = 0.707 P / A_n \quad (1)$$

dove A_n è l'area della sezione trasversale netta del pannello murario. Da tale equazione, assumendo $P=P_{max}$ è possibile stimare la massima resistenza di trazione τ_0 .

Per la caratterizzazione meccanica della muratura in termini di capacità di deformazione, è possibile stimare la deformazione di taglio γ come somma dei valori assoluti delle deformazioni sulla diagonale compressa ε_v e sulla diagonale tesa ε_h , come segue:

$$\gamma = |\varepsilon_v| + \varepsilon_h \quad (2)$$

Inoltre, la curva sperimentale τ - γ consente di definire il modulo di rigidezza della muratura dalla stima della pendenza del tratto iniziale della curva stessa. Non essendoci uniformità sulla metodologia di calcolo di G , in letteratura sono presenti diverse indicazioni per la stima di tale parametro (Babaeidarabad et al. 2014, Parisi et al. 2013, Corradi et al. 2014). Nel presente studio, il modulo di taglio è stato calcolato come:

1. modulo di taglio effettivo G_{eff} , che misura la pendenza dell'involuppo della curva τ - γ (nota anche come "backbone"), idealizzata ad una curva bilineare, equivalente alla curva sperimentale in termini di energia dissipata e calcolato, quindi, come $\tau_{0,b}/\gamma_{i,b}$ (Figura 5).
2. modulo di taglio secante $G_{30\%}$, che misura la pendenza della *backbone*, in corrispondenza della secante passante per il 30% della resistenza massima τ_0 e calcolato, quindi, come $0.3 \cdot \tau_0/\gamma_{30\%}$ (Figura 6);
3. modulo ciclico G_i , misurando la pendenza in corrispondenza della massima resistenza $\tau_{0,i}$ per ogni i -simo ciclo di carico e calcolato, quindi, come $\tau_{0,i}/\gamma_i$ (Figura 7).

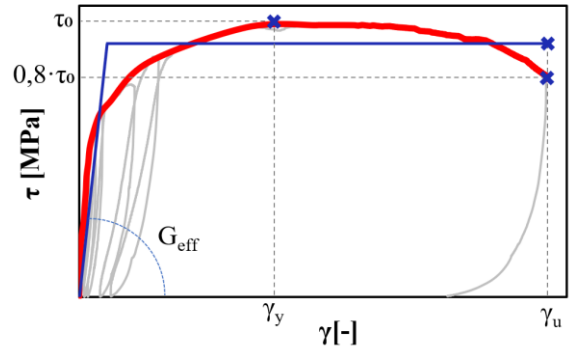


Figura 5. Procedimento grafico per la definizione del modulo di taglio effettivo G_{eff} .

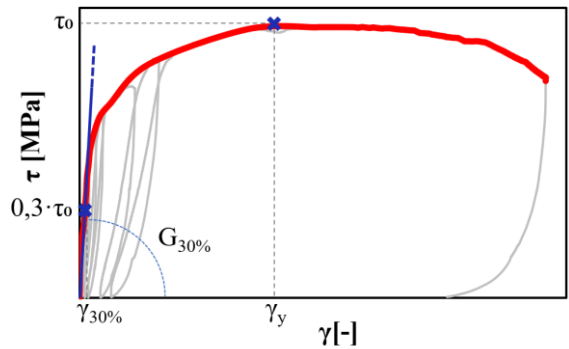


Figura 6. Procedimento grafico per la definizione del modulo di taglio secante $G_{30\%}$.

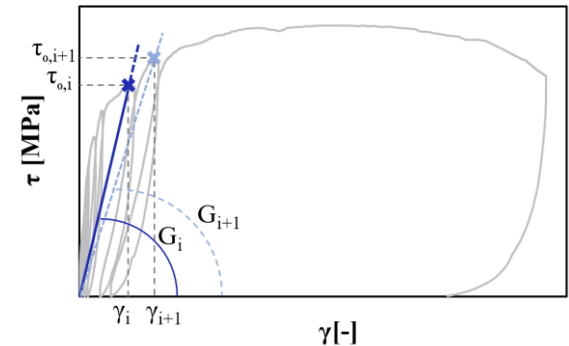


Figura 7. Procedimento grafico per la definizione del modulo di taglio misurato per gli i -simi cicli G_i .

3 RISULTATI SPERIMENTALI

Le principali caratteristiche geometriche e meccaniche dei pannelli murari, testati nella prova di compressione diagonale, sono descritte in Tabella 1. In particolare, in essa sono riportate: la nomenclatura (il numero indica la numerazione assegnata al pannello testato, mentre le sigle "NR" e "R" significano che il pannello era, rispettivamente, nella condizione non rinforzata o rinforzata); la dimensione media (d_{media}) della base e dell'altezza del pannello; lo spessore (s); la

massima resistenza di trazione (τ_0) e i moduli di taglio (G_{eff} e $G_{30\%}$).

Si specifica che le registrazioni dei segnali sperimentali sono state processate attraverso l'applicazione di un "filtro mediano" (Huang et al. 1979, Liu et al. 2008). L'applicazione di tale tecnica, ampiamente approvata nella comunità scientifica, ha avuto lo scopo di eliminare il rumore dei segnali registrati e migliorare, quindi, la qualità del segnale misurato.

I risultati delle prove sperimentali sono riportati nelle Figure 8-11 (test 1NR), Figure 12-15 (test 2R), Figure 16-19 (test 3R) e Figure 20-23 (test 4NR). In particolare, si evidenzia come il sistema FRCM garantisca un valore di resistenza tangenziale massimo di $\tau_{0,R} = 0.325$ MPa, mediato tra le prove 2R e 3R, contro un valore di $\tau_{0,NR} = 0.125$ MPa, mediato tra le prove 1NR e 4NR, dei pannelli non rinforzati. Si specifica che, il valore di $\tau_{0,NR}$ risulta ben più alto rispetto a quello suggerito dalla NTC ($0.02 \div 0.032$ MPa), con il quale si progetta. Nonostante ciò, l'incremento prestazionale del sistema di rinforzo FRCM in termini di resistenza, calcolato dal rapporto $\tau_{0,R}/\tau_{0,NR} = 2.6$ è, comunque, maggiore rispetto al coefficiente suggerito dalle NTC (pari a 2.5).

Invece, per quanto riguarda l'incremento prestazionale del sistema di rinforzo FRCM in termini di modulo di rigidezza, il confronto tra i valori medi ottenuti per i pannelli rinforzati ($G_{eff,R} = 1100$ MPa e $G_{30\%,R} = 566$ MPa) e non rinforzati ($G_{eff,NR} = 70$ MPa e $G_{30\%,NR} = 201$ MPa) mostra come la scelta del criterio di valutazione di G determini coefficienti correttivi completamente differenti. Questo sottolinea come la Norma debba introdurre un metodo univoco per la determinazione di tale proprietà meccanica, in modo da uniformare la caratterizzazione delle proprietà meccaniche delle murature. Tuttavia, il coefficiente correttivo calcolato con entrambi i criteri adottati è superiore a quello suggerito dalle NTC (pari a 2.5). Dall'analisi dei risultati si evince come il metodo più cautelativo (e in linea con i valori suggeriti dalle Norme) per la stima di G sia quello corrispondente al 30% della resistenza massima (criterio n.2 definito in 2.3).

Tabella 1. Caratteristiche geometriche e meccaniche dei pannelli murari analizzati nella prova di compressione diagonale

Nome	d_{media} [mm]	s [mm]	τ_0 [MPa]	$G_{eff} - G_{30\%}$ [MPa]
1NR	1205	580	0.14	87 -
2R	1195	750	0.28	1307 -
3R	1210	565	0.37	878 -
4NR	1215	510	0.11	193 -

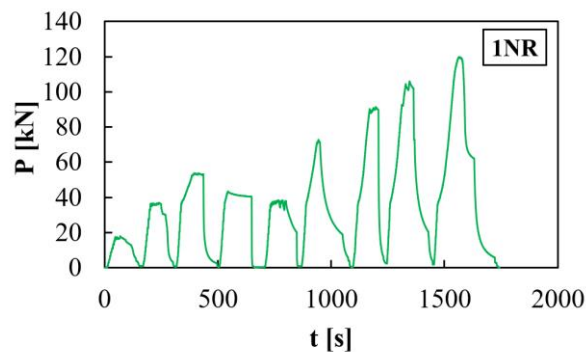


Figura 8. Curva tempo (t) - carico (P), del test 1NR.

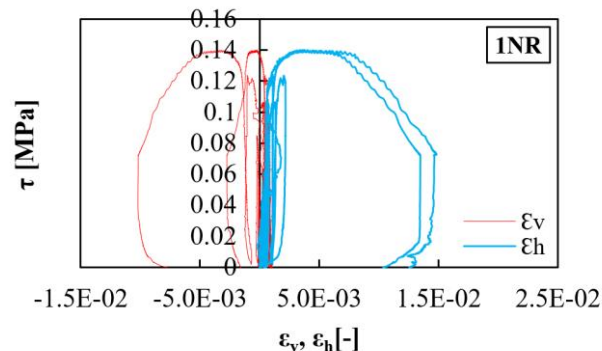


Figura 9. Curva deformazioni (di compressione ϵ_v e di trazione ϵ_h) - resistenza di trazione (τ), del test 1NR.

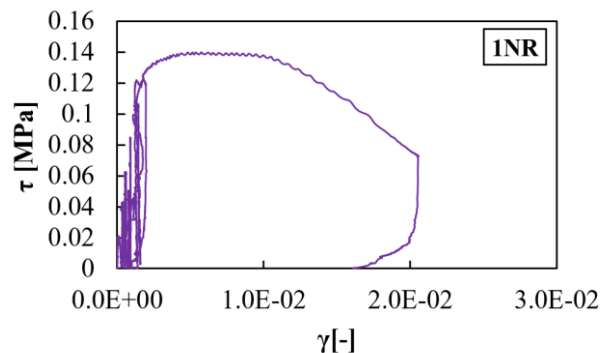


Figura 10. Curva deformazione di taglio (γ) - resistenza di trazione (τ), del test 1NR.

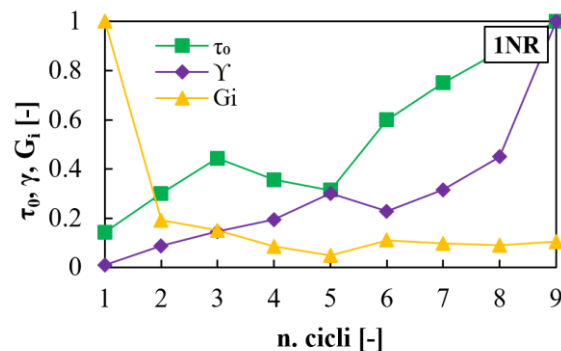


Figura 11. Curva che relaziona le proprietà meccaniche (τ_0 , γ e G_i), adimensionalizzate rispetto ai loro rispettivi valori massimi, in funzione del numero dei cicli di carico applicati nel test 1NR.

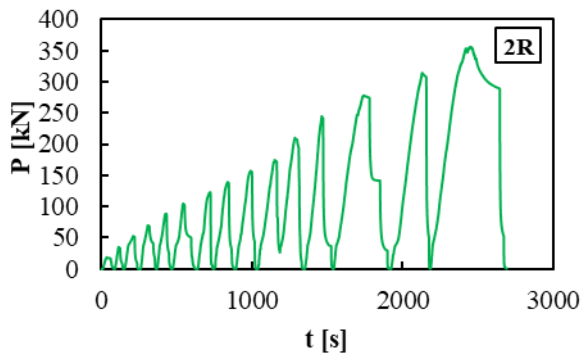


Figura 12. Curva tempo (t) - carico (P), del test 2R.

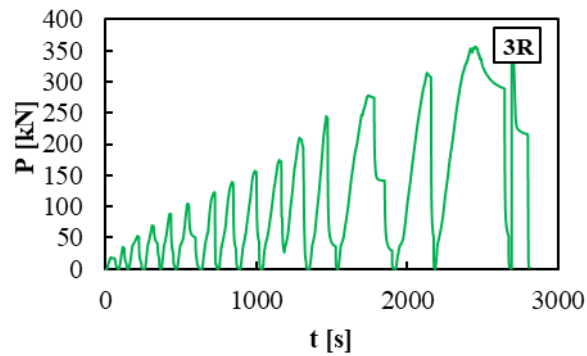


Figura 16. Curva tempo (t) - carico (P), del test 3R.

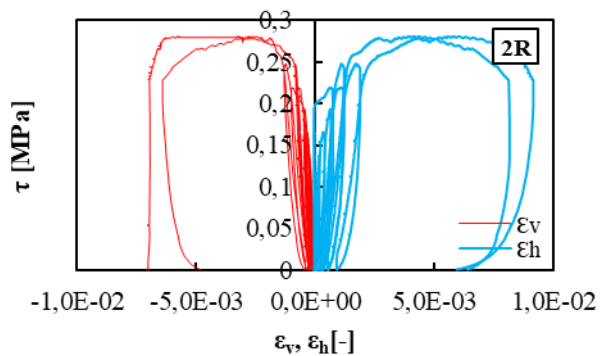


Figura 13. Curva deformazioni (di compressione ϵ_v e di trazione ϵ_h) - resistenza di trazione (τ), del test 2R.

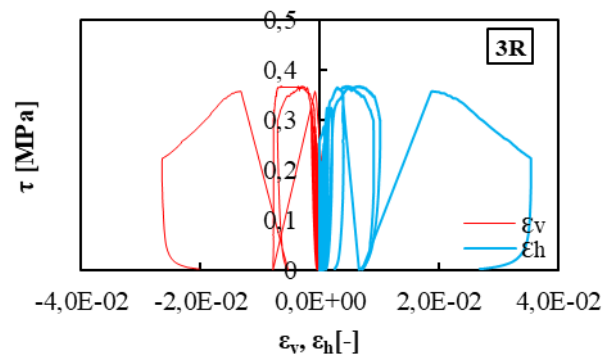


Figura 17. Curva deformazioni (di compressione ϵ_v e di trazione ϵ_h) - resistenza di trazione (τ), del test 3R.

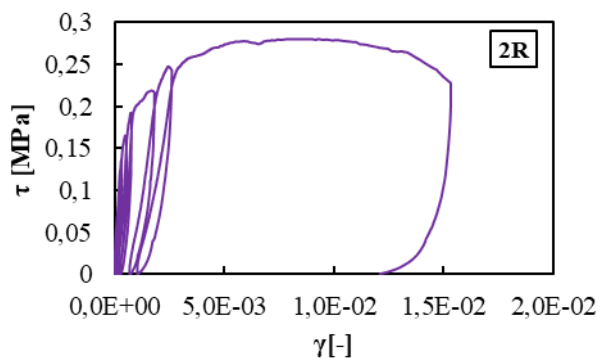


Figura 14. Curva deformazione di taglio (γ) - resistenza di trazione (τ), del test 2R.

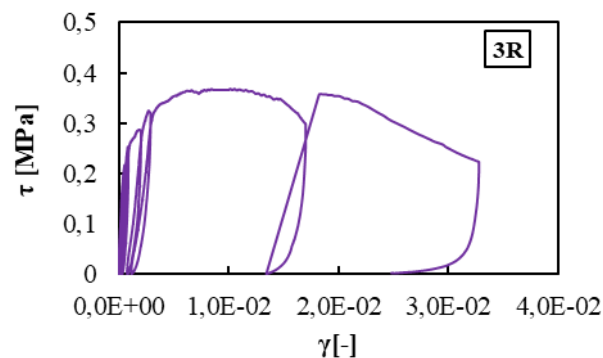


Figura 18. Curva deformazione di taglio (γ) - resistenza di trazione (τ), del test 3R.

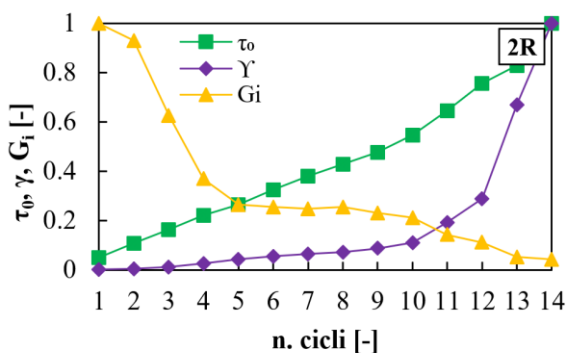


Figura 15. Curva che relaciona le proprietà meccaniche (τ_0 , γ e G_i), adimensionalizzate rispetto ai loro rispettivi valori massimi, in funzione del numero dei cicli di carico applicati nel test 2R.

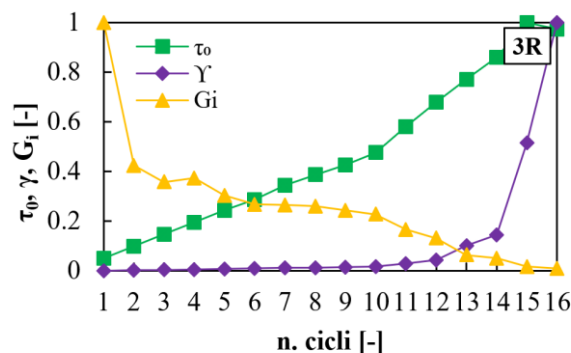


Figura 19. Curva che relaciona le proprietà meccaniche (τ_0 , γ e G_i), adimensionalizzate rispetto ai loro rispettivi valori massimi, in funzione del numero dei cicli di carico applicati nel test 3R.

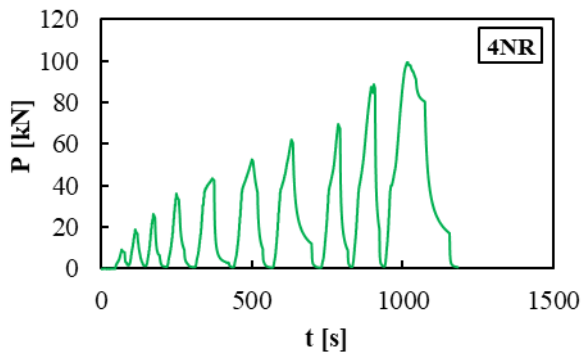


Figura 20. Curva tempo (t) - carico (P), del test 4NR.

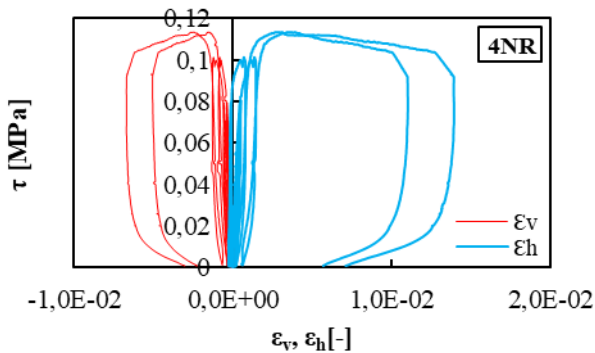


Figura 21. Curva deformazioni (di compressione ϵ_v e di trazione ϵ_h) - resistenza di trazione (τ), del test 4NR.

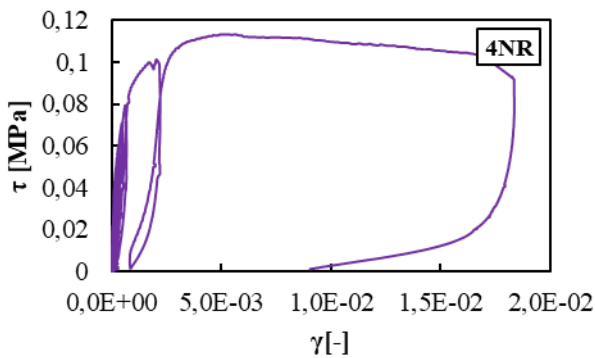


Figura 22. Curva deformazione di taglio (γ) - resistenza di trazione (τ), del test 4NR.

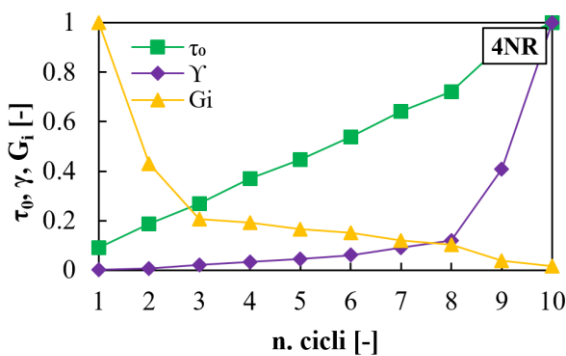


Figura 23. Curva che relaziona le proprietà meccaniche (τ_0 , γ e G), adimensionalizzate rispetto ai loro rispettivi valori massimi, in funzione del numero dei cicli di carico applicati nel test 4NR.

Le Figure 8, 12, 16 e 20 mostrano la storia di carico applicata sui diversi campioni murari, con un incremento di P costante di circa 20 ± 5 kN per ogni ciclo.

Le Figure 9, 13, 17 e 21 mostrano la deformazioni di compressione ϵ_v e di trazione ϵ_h misurate sui pannelli durante la prova sperimentale in funzione di τ . In particolare, si evince come in tutte e 4 le prove i valori massimi raggiunti per ϵ_h siano maggiori rispetto a quelli ottenuti per ϵ_v . Le Figure 10, 14, 18 e 22, invece, mostrano le deformazioni γ in funzione di τ .

Infine, nelle Figure 11, 15, 19 e 23 è mostrata la variazione delle tre proprietà meccaniche investigate (τ_0 , γ e G_i), analizzate in funzione dei cicli di carico applicati durante l'esecuzione dei test di compressione diagonale. Da tali curve, è possibile osservare come, in via generale, l'andamento di τ cresca in modo lineare in quanto durante la fase di carico si è cercato di applicare l'incremento del carico P il modo più uniformemente possibile. Invece, le deformazioni γ crescono in modo lineare soltanto in una prima fase per poi incrementare notevolmente durante gli ultimi cicli di carico. Infine, è possibile osservare come le G_i misurate durante il primo ciclo di carico siano notevolmente maggiori rispetto alle G_i misurate nei cicli successivi. Tale fenomeno può essere spiegato dal fatto che anche con carichi pari a circa il 10% di P_{max} si possono verificare delle microfessurazioni che determinano forti cambiamenti della rigidità dei pannelli murari. Questo risultato sottolinea la propensione delle murature di pietrame, soggette al fenomeno di disgregazione, di variare fortemente le proprietà meccaniche in funzione dei cicli di carico.

In Figura 24 sono mostrate le curve di backbone ricavate sia per i pannelli non rinforzati (NR) che rinforzati (R). Tali curve sono state ottenute collegando i punti relativi a γ_i e τ_{0i} degli i -simi cicli. Tali curve di backbone, inoltre, dato che in corrispondenza dell'ultimo ciclo di carico non si ha una corrispondenza del massimo valore di γ con $\tau_{0,i}$, presentano anche un tratto finale corrispondente alla curva sperimentalmente γ - τ fino al raggiungimento dell'80% di τ_0 (vedi Figure 5 e 6). Dalle curve di backbone è possibile osservare l'incremento delle prestazioni meccaniche ottenute dal rinforzo FRCM in termini di resistenza massima, di rigidità e duttilità.

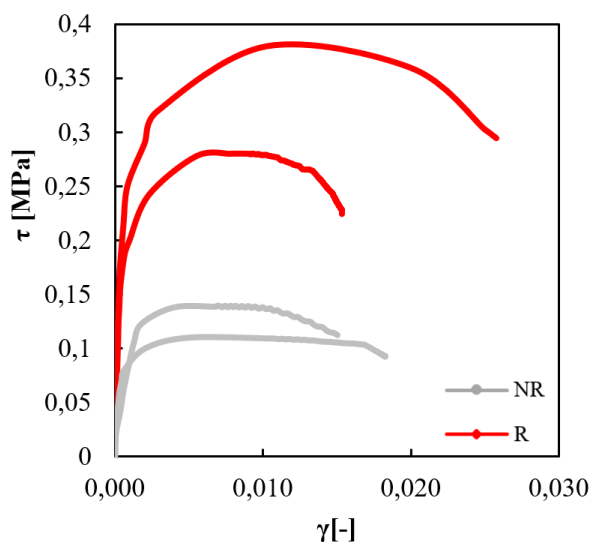


Figura 24. Curve di *backbone* ottenute dall'involuppo delle curve sperimentali τ - γ sia per i pannelli non rinforzati (NR) che rinforzati (R).

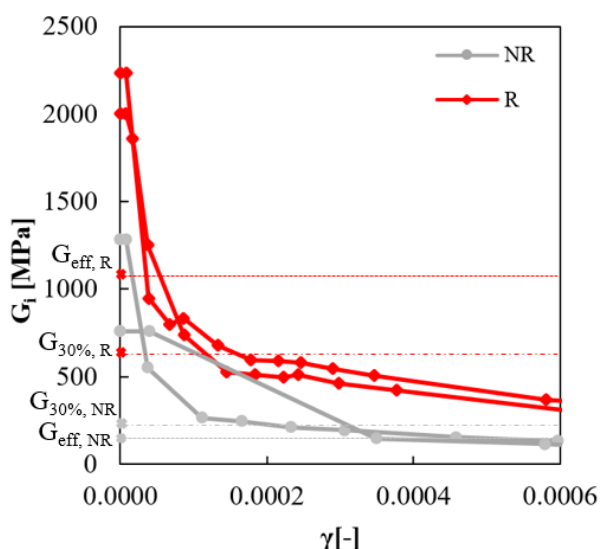


Figura 25. Curve rappresentative della variazione del modulo di taglio G_i , calcolato per ogni ciclo di carico, in funzione della deformazione γ dei pannelli rinforzati (NR) e rinforzati (R).

Dal grafico di Figura 25 è possibile osservare la variazione del modulo di taglio G_i in funzione dello stato deformativo γ dei pannelli murari. In particolare, all'aumentare delle deformazioni γ si ha inizialmente un drastico abbattimento delle G_i che poi raggiungono valori paragonabili a quelli stimati per $G_{30\%}$. Come già accennato sopra, l'andamento delle G_i dimostra come, anche in corrispondenza di uno stato deformativo relativamente basso, si possono verificare delle microfessurazioni all'interno dei pannelli murari, dovute al riassetto delle unità di pietrame, tali da determinare una forte variazione delle proprietà meccaniche dei pannelli, sia in quelli non rinforzati che rinforzati.

Inoltre, tale grafico mostra come il rinforzo FRCM non determini alcuno stravolgimento del comportamento meccanico dei pannelli murari. Infatti, è possibile osservare come i pannelli rinforzati presentano lo stesso andamento di quelli non rinforzati, con incrementi di rigidezza che rimangono pressappoco costanti durante la variazione dello stato deformativo. Tale risultato dimostra come il sistema FRCM possieda il fondamentale requisito di compatibilità con la natura delle murature storiche.



Figura 26. Rilievo del danno al termine del test 1NR, che ha evidenziato come le lesioni del pannello murario di pietrame non rinforzato si sviluppano soltanto all'interno della malta posta tra le unità di pietra.



Figura 24. Rilievo delle lesioni al termine del test 4NR, che ha evidenziato come le lesioni del pannello murario di pietrame non rinforzato si sviluppano all'interno delle unità di pietra, le quali restano integre.



Figura 28. Rilievo delle lesioni al termine del test 3R.



Figura 29. Spicconatura dello strato di rinforzo al termine della prova 4R che ha permesso di rilevare l'integrità della rete in fibra di vetro in corrispondenza delle lesioni del paramento murario e, inoltre, l'aderenza tra la malta di rinforzo ed il supporto.

Nelle Figure 26 e 27 sono evidenziate le lesioni sui pannelli non rinforzati avvenute al termine della prova sperimentale. In particolare, si può riscontrare come le lesioni si siano sviluppate soltanto all'interno della matrice di malta disposta tra le unità di pietra. Tale fenomenologia di rottura è in linea con quelle riscontrate in altre ricerche (Vasconcelos e Lourenço 2009).

In Figura 28 sono, invece, evidenziate le lesioni che si sono sviluppate, al termine della prova sperimentale, sui pannelli rinforzati con sistema FRCM. In confronto con le lesioni sviluppate sui pannelli non rinforzati (Figure 26 e 27) si può osservare come il sistema FRCM determini modalità di rottura diffuse sul pannello.

Sempre in merito al danneggiamento di provini rinforzati, la Figura 29 mostra come, a seguito della spicconatura dello strato di rinforzo superficiale avvenuta al termine della prova sperimentale, il tessuto in fibra di vetro sia rimasto integro e perfettamente inglobato all'interno della matrice di malta. Questo dimostra l'efficacia del tipo di materiale utilizzato (vetro) nell'opporsi al fenomeno critico di sfilamento delle fibre e a garantire ottimi livelli di aderenza.

4 CONCLUSIONI

Le prove sperimentali riportate e discusse in questo lavoro costituiscono una parte di una più vasta indagine sperimentale eseguita sulla tipologia di rinforzo FRCM.

I risultati delle prove di compressione diagonale ciclica, su pannelli isolati da murature di pietrame di un edificio storico dell'Aquila, hanno dimostrato come tale sistema di rinforzo sia efficace nel miglioramento delle prestazioni di pannelli murari nel comportamento nel piano, in termini di: massima resistenza, rigidità e duttilità.

Inoltre, un aspetto fondamentale di tale ricerca ha messo in evidenza la propensione delle murature storiche di pietrame a modificare il loro comportamento meccanico durante la storia di carico applicata, in funzione dello stato fessurativo e delle deformazioni permanenti a cui sono soggetti. Tale fenomeno è osservabile sia per pannelli rinforzati che non rinforzati. Dall'analisi del comportamento meccanico dei pannelli murari si è potuto dimostrare come le murature rinforzate con sistema FRCM siano assolutamente compatibili con quelle storiche. Infatti, tale sistema di rinforzo incrementa le

proprietà meccaniche dei pannelli murari senza snaturarne il comportamento meccanico originario.

Infine, le modalità di danno osservate durante la fase sperimentale hanno evidenziato che il telo in fibra di vetro, immerso all'interno dello strato di malta di rinforzo, garantisce ottimi livelli di aderenza con la matrice cementizia, tali da ipotizzare un legame di perfetta adesione. Infatti, analizzando lo stato delle fibre al raggiungimento del collasso del pannello, è stato possibile notare come i tessuti in fibra di vetro rimangano inglobati all'interno della matrice cementizia, senza arrivare alla modalità di rottura per sfilamento delle fibre.

In conclusione, il presente lavoro sottolinea l'affidabilità dell'utilizzo del sistema di rinforzo FRM per la conservazione del patrimonio edilizio storico.

5 RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la ditta Aquilaprem S.r.l. della città dell'Aquila per la concessione dei materiali oggetto di prova, i tecnici del LPMS (Laboratorio di Prove Materiali e Strutture) dell'Università degli Studi dell'Aquila per la strumentazione degli apparecchi di acquisizione dati ed il gruppo DRIMS (Diagnostics Retrofitting and Innovation in Materials and Structures) dell'Università degli Studi dell'Aquila per l'allestimento delle prove sperimentali.

REFERENCES

ASTM, E., 2007. 519-07. Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages.

Babaeidarabad, S., Arboleda, D., Loreto, G., Nanni, A., 2014. Shear strengthening of un-reinforced concrete masonry walls with fabric-reinforced-cementitious-matrix. *Construction and Building Materials*, 65, 243-253.

Borri, A., Corradi, M., 2001. Il Problema della Valutazione della Resistenza a Taglio della Muratura mediante Prove Sperimentali. ANIDIS, Potenza-Matera.

Borri, A., Corradi, M., Galano, L., Vignoli, A., 2004. Analisi numeriche per la valutazione della resistenza a taglio delle murature. *Ing. Sismica*.

Carocci, C., F., Lagomarsino, S., 2009. Gli edifici in muratura nei centri storici dell'Aquilano. *Progettazione Sismica*, (3).

Corradi, M., Borri, A., Castori, G., Sisti, R., 2014. Shear strengthening of wall panels through jacketing with cement mortar reinforced by GFRP grids. *Composites Part B: Engineering*, 64, 33-42.

Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 Legge 6 luglio 2002, n. 137.

EN 1015-11. Methods of test for mortar for masonry – part 11: determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels: Comité Européen de Normalisation; 1999.

EN 998-2. Specification for mortar for masonry – masonry mortar. Brussels: Comité Européen de Normalisation; 2003.

Gregori, A., Marchini, G., Martini, D., Angiolilli, M., 2017. Experimental Characterization of FRM Systems for Conservative and Strengthening Intervention on Monumental Real Estate Heritage. *Atti del XVII Convegno ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia*. Settembre 17-21, Pisa.

Huang, T., Yang, G. J. T. G. Y., Tang, G., 1979. A fast two-dimensional median filtering algorithm. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 27(1), 13-18.

Italian Building Code. D.M. 14.01.2008: Norme Tecniche per le Costruzioni.

Linea Guida CNR DT200 R1/2013 – Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati - Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p.

Linee Guida MiBACT (Ministero dei Beni e delle attività culturali e del turismo) per la valutazione e riduzione del rischio sismico del Patrimonio culturale allineate alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 Gennaio 2008) – circolare n. 26 del 2 Dicembre 2010.

Liu, Y., Liu, C., Wang, D., 2008. A 1D time-varying median filter for seismic random, spike-like noise elimination. *Geophysics*, 74(1), V17-V24.

Magenes, G., Penna, A., Galasco, A., Rota, M., 2010. Experimental characterisation of stone masonry mechanical properties. *In Proceedings of the 8th International Masonry Conference*.

Nanni, A., Mantegazza, G., Di Benedetti, M., 2013. Caratterizzazione dei sistemi FRM secondo i criteri di accettazione di ICC-ES. *Atti del 3° convegno nazionale Assocompositi*.

Otoni, F., e Coisson, E., 2015. Nuovi materiali per il restauro strutturale: una questione antica. *ArchHistOR*, (4), 92-117.

Parisi, F., Iovinella, I., Balsamo, A., Augenti, N., Prota, A., 2013. In-plane behaviour of tuff masonry strengthened with inorganic matrix-grid composites. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1657-1666.

Turk, A., M., 2013. Seismic response analysis of masonry minaret and possible strengthening by fiber reinforced cementitious matrix (FRM) materials. *Advances in Materials Science and Engineering*.

Vasconcelos, G., Lourenço, P., B., 2009. Experimental characterization of stone masonry in shear and compression. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3337-3345.