

RINFORZO STRUTTURALE DI EDIFICI ESISTENTI CON LA TECNICA DELL'INTONACO ARMATO E SISTEMI IN GFRP

Dudine A.¹

¹ *Fibre Net S.r.l., Via Zanussi 311, 33100, Udine, allen.dud@hotmail.com*

ABSTRACT

Sulla base di un'ampia campagna sperimentale si riportano i risultati di uno studio condotto al fine di valutare l'efficacia, su diverse tipologie di muratura, di una tecnica di rinforzo che prevede l'utilizzo di intonaco e rete in GFRP (glass fiber reinforced polymer).

Tale studio si compone di due parti. Nella prima parte si descrive la campagna sperimentale, condotta su campioni in muratura, considerando vari parametri: cinque tipologie di maglia di rete in GFRP, tre tipi di malta per muratura e quattro diverse tipologie di muratura. Specificatamente, viene valutato il comportamento della muratura a due e a tre teste di mattoni pieni (spessore 250 mm e 380 mm), della muratura in mattoni a sacco e infine di quella in pietra grossolanamente squadrata. Particolare attenzione è stata rivolta alla scelta della connessione da utilizzare per solidarizzare l'intonaco armato alla muratura, in modo tale da ottimizzare l'efficacia della tecnica di rinforzo.

Nella seconda parte si propone un'interpretazione dei risultati sperimentali: si definiscono le proprietà meccaniche principali della muratura (rinforzata e non), si propongono delle relazioni in grado di stimare i valori di tali proprietà, si denota l'ampia capacità dissipativa dei campioni rinforzati fornendo preziose indicazioni riguardo alla duttilità degli stessi, rapportata a quella dei campioni non rinforzati e infine, individuati i due meccanismi di collasso in funzione delle sopraccitate proprietà meccaniche, vengono fornite delle relazioni necessarie all'ottimizzazione di questa tipologia di rinforzo.

La campagna sperimentale e la successiva elaborazione dei dati acquisiti hanno evidenziato una buona efficacia della tecnica di rinforzo. Si riscontra un significativo incremento della resistenza a trazione, in particolare nei campioni in muratura di pietra grossolanamente squadrata. È stata considerevole anche la resistenza residua a trazione, dalla formazione delle prime fessure diagonali fino a valori elevati di deformazione. Infine, le relazioni proposte riescono a stimare in maniera sufficientemente precisa le proprietà meccaniche della muratura rinforzata.

INTRODUZIONE

La maggior parte delle costruzioni esistenti nei centri storici delle città europee è costruita in muratura ordinaria di mattoni o in pietra. Si possono trovare svariate tessiture per le murature in pietra, in relazione alla dimensione ed alla forma degli elementi (pietra sbazzata, di tipo erratico, ciottoli, ecc.), alla loro provenienza, al tipo di pietra (arenaria, calcare, tufo, ecc.) e alla qualità della malta. Frequentemente, questi edifici presentano muratura a paramento multiplo, provviste o meno di un'effettiva connessione tra gli stessi.

Se questi edifici subiscono un terremoto, le pareti verticali sono soggette ad elevate azioni orizzontali nel piano (taglio) e fuori piano (flessione). Ma la resistenza a taglio delle pareti in muratura di edifici esistenti è alquanto limitata cosicché la capacità resistente al terremoto è intrinsecamente collegata al collasso per taglio dei maschi murari e delle fasce di piano. Inoltre, l'azione orizzontale può causare collassi parziali dovuti all'attivazione di vari meccanismi fuori piano riguardanti il movimento rigido di elementi in muratura (ribaltamento della parete, flessione verticale e/o orizzontale, ribaltamento del cantonale, collasso del timpano).

L'azione fuori piano può essere considerevolmente ridotta attraverso una efficace connessione con solai rigidi nel proprio piano in modo tale che sia possibile garantire l'integrità strutturale dell'edificio ed evitare che la formazione di meccanismi di tipo locale possa anticipare il collasso della struttura. Inoltre spesso è necessario incrementare la resistenza a taglio delle pareti in muratura, così da aumentare la capacità strutturale degli edifici e renderli meno vulnerabili al sisma.

In questi ultimi lustri sono state sperimentate varie tecniche per incrementare la resistenza a taglio delle pareti in muratura: iniezioni di malta, intonaci armati, rivestimenti con FRP (fiber reinforced polymer). L'iniezione di malta è una tecnica che consiste nel riempire i vuoti della muratura con malte cementizie o boiaccia; la tecnica dell'intonaco armato consiste nella applicazione di rivestimenti armati con rete elettro-saldata su entrambe le facce di una parete collegati per mezzo di barre in acciaio passanti attraverso la muratura. Il rivestimento in FRP è una tecnica relativamente nuova e consiste nell'applicare laminati in FRP su entrambe le facce della parete. In particolare vengono impiegati due tipi di compositi in FRP: fogli di fibre di vetro/carbonio/arammide mono-direzionali e rete in vetro FRP: il primo gruppo può essere descritto come fogli incollati alle superfici delle pareti per mezzo di resina epossidica, mentre il secondo gruppo consiste nell'applicazione di un intonaco rinforzato con rete in GFRP.

La tecnica delle iniezioni è stata utilizzata largamente per rinforzare efficacemente edifici in muratura di pietra a doppio paramento dopo il sisma (Friuli 1976, Irpinia 1980, Marche-Umbria 1997, Slovenia 2000-2004, ecc.), ma questo tipo di tecnica di rinforzo non è adeguata per murature a paramento singolo o in pietra di grossa pezzatura. Anche l'intonaco armato è stato largamente utilizzato e ha mostrato una buona efficacia, ma sono stati riscontrati problemi di corrosione delle reti in acciaio alcuni anni dopo l'intervento. Così, recentemente, sono state proposte tecniche di rinforzo che possono essere usate per tutte le tipologie di muratura e che adottano materiali non metallici (rivestimenti in FRP).

Nell'ultima decade sono stati condotti importanti campagne di ricerca finalizzate alla valutazione dell'efficacia della tecnica di rinforzo per pareti in muratura, basate sull'applicazione di laminati mono-direzionali in FRP. Per contro, sono stati intrapresi limitati studi sulla tecnica di rinforzo basata sull'utilizzo di reti in GFRP.

Lo scopo di questa ricerca è quello di valutare dettagliatamente l'efficacia della tecnica di rinforzo per pareti in muratura che utilizza reti in GFRP. È stata, quindi, intrapresa una vasta campagna di prove su campioni in muratura, considerando diversi tipi di elementi di muratura (mattoni pieni e pietra da spacco), differenti tipi di malta e differenti maglie di rete in GFRP. Sono state effettuate anche prove su campioni rinforzati con camicie armate con rete elettro-saldata, in modo tale da presentare una comparazione tra l'efficacia del rinforzo con rete in GFRP e di quello con rete in acciaio.

CAMPAGNA SPERIMENTALE

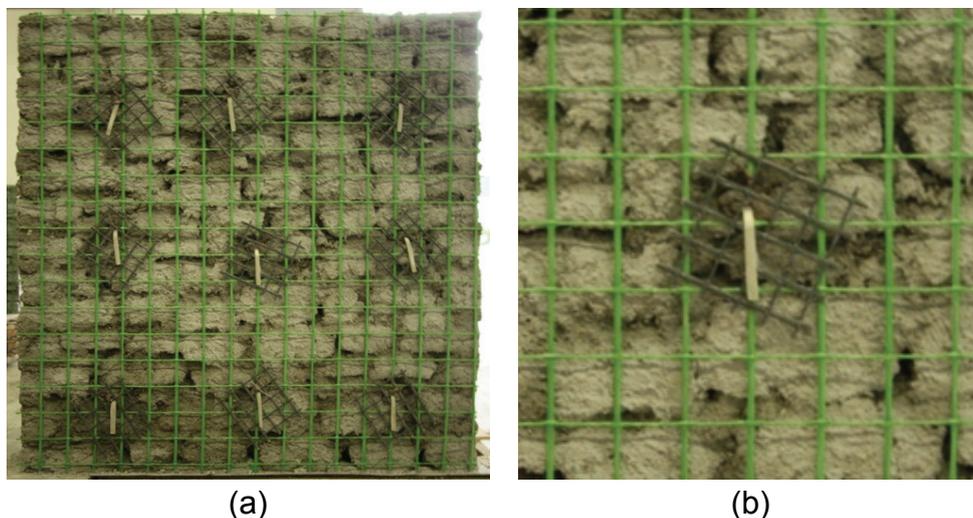
È stata condotta un'ampia campagna sperimentale su campioni in muratura considerando differenti tipologie di muratura, differenti tipi di malta da costruzione e dimensione di maglia di rete in GFRP.

Tecnica di rinforzo

La tecnica di rinforzo descritta in questo studio consiste nell'applicazione di una rete in GFRP su entrambe le facce della parete in muratura, annegata in uno stato di malta cementizia: la rete in GFRP è composta da fili in fibra di vetro incollati tra loro mediante l'utilizzo di una resina termoindurente (vinilestere epossidica con perossido di benzoile come catalizzatore). I fili sono disposti, per la creazione della rete, intrecciando quelli trasversali torti a quelli longitudinali.

La procedura di applicazione della tecnica di rinforzo consiste nelle seguenti fasi: a) rimozione dell'intonaco esistente e della malta dai giunti tra gli elementi di muratura (10-15 mm in profondità), da entrambe le facce del pannello, b) applicazione di un primo strato di intonaco

(rinzafo), c) esecuzione di fori passanti, con diametro pari a 25 mm per consentire l'inserimento dei connettori, d) applicazione della rete in GFRP su entrambe le facce del pannello (Fig. 1a), e) inserimento nei fori dei connettori ad "L" in GFRP (di sezione 8x12 mm) ed iniezione di resina epossidica tixotropica per solidarizzare i connettori (Fig. 1b), f) applicazione di un nuovo strato di intonaco di malta bastarda. Lo spessore totale dell'intonaco è di circa 30 mm per le murature in mattoni (superficie regolare) mentre viene presa pari a 40 mm nelle murature in pietra (differente pezzatura degli elementi resistenti).



(a) (b)
 Figura 1 - Tecnica di rinforzo proposta (a);
 particolare della rete in GFRP (b).

Caratteristiche dei materiali

I campioni in muratura sono stati confezionati considerando, come detto in precedenza, due tipi di elementi resistenti: mattoni pieni in laterizio (dimensioni 250x120x55 mm) e pietra grossolanamente squadrata. I mattoni sono stati sottoposti a prove di compressione e trazione indiretta: la resistenza media degli elementi è stata $f_{bm} = 44.0$ MPa e $f_{bt} = 4.03$ MPa rispettivamente. Tre sono invece le malte idrauliche utilizzate: A, B e C, mentre ci si è serviti di un'unica malta bastarda per la stesura dell'intonaco nei campioni rinforzati. Sono stati sottoposti a prova di compressione semplice tre cilindri (100 mm di diametro, 100 mm l'altezza) per ogni tipo di malta. La resistenza media è stata pari a $f_{cm} = 3.04$ MPa per la malta di tipo A ed è stata rispettivamente pari a 2.60 MPa, 6.12 MPa e 7.92 MPa per gli altri tipi di malta. Sei campioni di malta d'intonaco sono stati sottoposti a prova di trazione indiretta, fornendo una resistenza media a trazione 0.75 MPa. Sono state effettuate infine sei prove di compressione monoassiale su pilastri (dimensioni 250x250x400 mm) in muratura di mattoni pieni in laterizio e malta di tipo A e C. Tali prove sono state effettuate dopo 28 giorni di stagionatura. La resistenza media a compressione e il modulo elastico sono, rispettivamente 11.43 MPa e 3469 MPa per i campioni con malta di tipo A e 14.42 MPa e 4234 MPa per i campioni con malta di tipo C. Il modulo elastico è stato valutato considerando un intervallo di tensione stante tra il 10% ed il 40% della tensione di picco.

Nelle prove sperimentali sono state utilizzate tre differenti maglie di rete (33x33 mm, 66x66 mm e 99x99 mm), due diverse sezioni resistenti di rete: 3.8 mm^2 per il tipo "S" e 7.6 mm^2 per il tipo "D". La percentuale media di presenza di fibre all'interno della sezione è circa pari a 50%. La sezione trasversale dei connettori ad "L" è rettangolare di dimensioni 8x12 mm, con una percentuale di fibre pari a 60%. Sono stati effettuati numerosi test al fine di determinare la resistenza ultima a trazione dei fili longitudinali e trasversali: i fili longitudinali hanno raggiunto una resistenza (R_t) pari a 4.5 kN (tipo "S") e 8.5 kN (tipo "D"), mentre quelli trasversali hanno raggiunto valori a rottura pari a 3.5 kN (tipo "S") e 5.2 kN (tipo "D"). I fili intrecciati sono caratterizzati da valori sensibilmente inferiori di resistenza a trazione rispetto a quelli paralleli. Ciò è dovuto, probabilmente, al differente stato di sollecitazione di ogni singola fibra durante lo

svolgimento della prova che, a causa dell'intreccio, non permette alle stesse di raggiungere il valore massimo di resistenza nel medesimo istante. La resistenza media a trazione dei connettori è pari a 36.1 kN.

Campioni di prova

Lo scopo di questo studio è quello di evidenziare l'efficacia della tecnica di rinforzo descritta nelle precedenti sezioni. Così è stata programmata una vasta campagna sperimentale su 64 pannelli quadrati di muratura (1160x1160 mm) considerando l'influenza di vari parametri: elementi della muratura, tipi di malta e maglia della rete. In particolare sono state eseguite 20 prove su campioni in muratura a due teste di mattoni pieni, 18 su campioni in muratura a tre teste, 12 su pannelli di muratura a sacco ed infine 14 su pannelli in pietra grossolanamente squadrata di spessore 400 mm. Sono stati utilizzati due tipi di malta per ogni gruppo di campioni: A e C nel primo gruppo, A e B nel secondo. La maggior parte dei campioni è stata rinforzata utilizzando cinque maglie differenti di rete in GFRP: il tipo S con maglie 33x33 mm, 66x66 mm, 99x99 mm, mentre il tipo D con maglie 66x66 mm e 99x99 mm.

Campione	Malta	Tipo di rinforzo	Campione	Malta	Tipo di rinforzo
<i>Muratura a due teste di mattoni pieni (spessore 250mm)</i>			<i>Muratura a tre teste di mattoni pieni (spessore 380mm)</i>		
MD-1A		-	MT-1A		-
MD-2A	A	-	MT-2A	A	-
MD-1A-F33S			MT-1A-F33S	A	Rete GFRP S (33x33mm)
MD-2A-F33S	A	Rete GFRP S (33x33mm)	MT-2A-F33S	A	Rete GFRP S (33x33mm)
MD-1A-F66S			MT-1A-F66S	A	Rete GFRP S (66x66mm)
MD-2A-F66S	A	Rete GFRP S (66x66mm)	MT-2A-F66S	A	Rete GFRP S (66x66mm)
MD-1A-F99S			MT-1A-F66SL	A	Rete GFRP S (66x66mm), rinforzo singolo
MD-2A-F99S	A	Rete GFRP S (99x99mm)	MT-2A-F66SL	A	Rete GFRP S (66x66mm), rinforzo singolo
MD-1A-S150			MT-1A-F66D	A	Rete GFRP D (66x66mm)
MD-2A-S150	A	Rete elettr. $\Phi 5$ (150x150mm)	MT-2A-F66D	A	Rete GFRP D (66x66mm)
MD-1A-S200			MT-1A-F99D	A	Rete GFRP D (99x99mm)
MD-2A-S200	A	Rete elettr. $\Phi 6$ (200x200mm)	MT-2A-F99D	A	Rete GFRP D (99x99mm)
MD 1C			MT-1A-S150	A	Rete elettr. $\Phi 5$ (150x150mm)
MD 2C	C	-	MT-2A-S150	A	Rete elettr. $\Phi 5$ (150x150mm)
MD-1C-F33S			MT-1B	B	-
MD-2C-F33S	C	Rete GFRP S (33x33mm)	MT-2B	B	-
MD-1C-F66S			MT-1B-F99D	B	Rete GFRP D (99x99mm)
MD-2C-F66S	C	Rete GFRP S (66x66mm)	MT-2B-F99D	B	Rete GFRP D (99x99mm)
MD-1C-F99S					
MD-2C-F99S	C	Rete GFRP S (99x99mm)			
<i>Muratura di mattoni pieni a sacco, doppio paramento</i>			<i>Muratura in pietra grossolanamente squadrata</i>		
MS-1A		-	MP-1A		-
MS-2A	A	-	MP-2A	A	-
MS-1A-F66S			MP-1A-F33S	A	Rete GFRP S (33x33mm)
MS-2A-F66S	A	Rete GFRP S (66x66mm)	MP-2A-F33S	A	Rete GFRP S (33x33mm)
MS-1A-F99S			MP-1A-F66S	A	Rete GFRP S (66x66mm)
MS-2A-F99S	A	Rete GFRP S (99x99mm)	MP-2A-F66S	A	Rete GFRP S (66x66mm)
MS-1B			MP-1A-F66SL	A	Rete GFRP S (66x66mm), rinforzo singolo
MS-2B	B	-	MP-2A-F66SL	A	Rete GFRP S (66x66mm), rinforzo singolo
MS-1B-F33S			MP-1A-F66D	A	Rete GFRP D (66x66mm)
MS-2B-F33S	B	Rete GFRP S (33x33mm)	MP-2A-F66D	A	Rete GFRP D (66x66mm)
MS-1B-F66S			MP-1B	B	-
MS-2B-F66S	B	Rete GFRP S (66x66mm)	MP-2B	B	-
			MP-1B-F66S	B	Rete GFRP S (66x66mm)
			MP-2B-F66S	B	Rete GFRP S (66x66mm)

Tabella 1 - Caratteristiche dei campioni.

Sono stati sottoposti a prova due campioni per ogni casistica in modo tale da verificare la ripetibilità dei risultati. I campioni di muratura non rinforzata vengono testati senza l'applicazione di alcun intonaco sulle due facce. Le caratteristiche dei campioni sottoposti a prova sono descritte nella Tab. 1. I campioni sono identificati con una sigla alfanumerica suddivisa in tre parti: le prime due lettere distinguono la tipologia di muratura (MD = muratura a due teste, MT = muratura a tre teste, MS = muratura a sacco e MP = muratura in pietra), nella seconda parte vengono indicati i campioni appartenenti alla stessa coppia e la lettera identifica il tipo di malta

utilizzata per la muratura, nella terza la lettera distingue il materiale della rete (F = GFRP, S = acciaio), il numero indica la dimensione della maglia della rete ed infine l'ultima lettera differenzia il tipo di filo della rete in GFRP (S = singolo e D = doppio). I campioni in muratura non rinforzata non hanno il terzo gruppo di caratteri mentre i campioni che hanno il rinforzo applicato su una sola faccia del pannello hanno una lettera L aggiunta alla destra della sigla.

Apparato sperimentale

L'efficacia della tecnica di rinforzo viene evidenziata effettuando le prove di compressione diagonale sui campioni indicati nella Tab. 1. Viene progettato un apposito apparato di prova, in modo tale da applicare il carico senza dover movimentare il campione dopo la sua costruzione. I campioni vengono costruiti su un appoggio in legno, e trascorso il periodo di stagionatura degli stessi, una parte dell'appoggio viene rimossa in modo tale da consentire il posizionamento del dispositivo di applicazione del carico (in acciaio) ad uno dei due estremi del pannello. Un dispositivo di applicazione del carico ha saldato un profilo HEB, che viene irrigidito con una serie di fazzoletti, così da evitare deformazioni locali. Un secondo dispositivo simile viene inserito nell'estremo opposto dell'apparato. Infine un terzo dispositivo è connesso a quello inferiore attraverso 4 barre in acciaio così da permettere la trasmissione del carico diagonale con un martinetto idraulico, interposto tra i due dispositivi in sommità.

Nella Fig. 2 sono inseriti il dettaglio dell'apparato di prova ed un'immagine di repertorio dell'apparato montato su un campione pronto per l'esecuzione della prova. Nella figura sono indicate anche le due coppie di trasduttori potenziometrici (T1-T3, T2-T4) utilizzati per misurare le deformazioni dei campioni lungo le diagonali. Il martinetto idraulico è stato azionato mediante una pompa idraulica manuale e la forza applicata dallo stesso sul campione è stata misurata mediante un trasduttore di pressione ad alta precisione. Tutti i trasduttori sono stati collegati ad una centralina di acquisizione dati interfacciata con un computer. Il programma di acquisizione ha anche permesso di visualizzare, in tempo reale, sia la procedura di carico che il diagramma carico-spostamento.

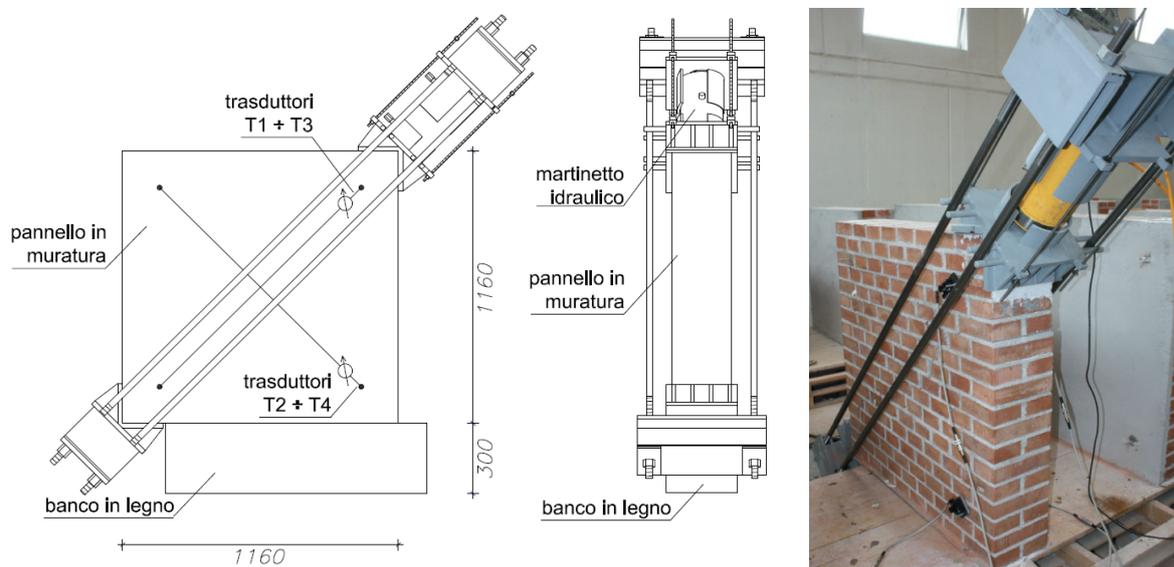


Figura 2 - Apparato sperimentale.

RISULTATI DI PROVA

Come detto in precedenza sono state eseguite 28 prove di compressione diagonale. La procedura di carico segue dei cicli di carico-scarico con passi crescenti di 25 kN fino al raggiungimento del carico massimo: successivamente la prova viene eseguita in controllo di spostamento. I quattro gruppi di campioni sono stati sottoposti a prova dopo circa 28 giorni di stagionatura della malta dell'intonaco; la malta della muratura aveva invece 60 giorni di

maturazione. Per ogni gruppo di campioni è stata testata per prima la coppia di campioni non rinforzata e successivamente i campioni rinforzati. Le curve rappresentano il carico diagonale P in funzione della deformazione media nella direzione del carico ε_c . Nella Fig. 3 sono riportate le curve carico-deformazione di alcuni campioni, raggruppati per tipologia di muratura.

Il comportamento della muratura in mattoni non rinforzata evidenzia un brusco calo di resistenza immediatamente successivo alla formazione della prima fessura, conservando una limitata capacità residua. In tutte le murature la fessurazione diagonale segue i giunti di malta. I campioni rinforzati evidenziano un considerevole incremento della resistenza di picco e la curva, dopo la comparsa delle fessure diagonali, mostra un comportamento plastico con un ramo decrescente molto blando. Quando la deformazione media a compressione raggiunge il valore 0.005, la resistenza residua risulta, nella maggior parte dei casi superiore al 50% del valore di picco. I campioni rinforzati con una rete in GFRP più fitta evidenziano un ramo decrescente ancora meno marcato dopo il raggiungimento del carico massimo (MD-2A-F33, MD-2A-F66).

I campioni costruiti con pietra grossolanamente squadrata non hanno mostrato nessun calo improvviso di resistenza dopo il raggiungimento del carico massimo, ma solo una riduzione graduale molto lenta (Fig. 3d). Anche il comportamento dei campioni rinforzati ha mostrato, dopo il raggiungimento del picco, un ramo decrescente con una pendenza molto ridotta, soprattutto nel campione rinforzato con rete GFRP di tipo D (maglia 66x66 mm). La formazione ed il tipo di fessure nei campioni in pietra è molto simile a quelli riscontrati nei campioni di muratura di mattoni.

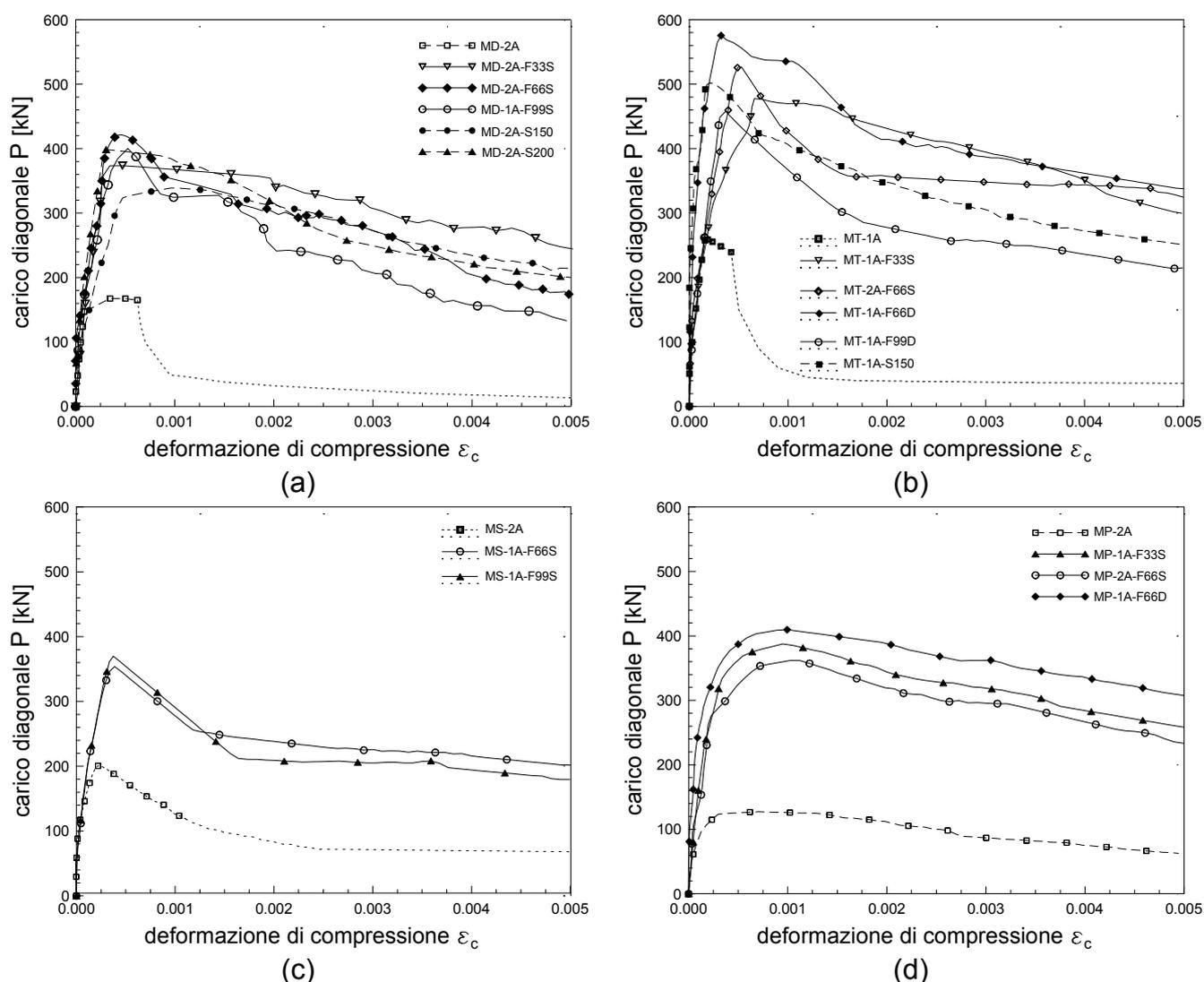


Figura 3 - Carico diagonale vs. deformazione di compressione: muratura a due (a) e a tre (b) teste di mattoni; muratura a sacco (c); muratura in pietra grossolanamente squadrata (d).

INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI

Le prove di compressione diagonale hanno fornito utili indicazioni al fine della stima della resistenza a taglio dei maschi murari. L'Eq. 1 viene utilizzata per la determinazione della resistenza a taglio V dei maschi murari.

$$V = \sigma_l \cdot b \cdot t \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_l}} \quad (1)$$

Nell'Eq. 1 b e t sono rispettivamente la base e lo spessore del maschio murario, σ_0 è la tensione dovuta ai carichi verticali mentre σ_l è la tensione principale di trazione. Questa ultima è stata ottenuta in base ai risultati di prove di compressione diagonale, in relazione alle osservazioni e alle elaborazioni. In particolare è stata utilizzata la seguente espressione:

$$\sigma_l = \frac{\alpha \cdot P}{b \cdot t} \quad (2)$$

Il coefficiente α è pari a 0.5 per le murature in mattoni pieni mentre è pari a 0.35 per la muratura in pietra. Con l'Eq. 2 è possibile valutare la tensione principale di trazione equivalente σ_l in funzione della deformazione a trazione, per tutte le prove di questa campagna sperimentale. I risultati principali riguardanti tutti i campioni sono riassunti nella Tab. 2. La deformazione media di trazione è determinata dall'allungamento misurato dai trasduttori di spostamento nella direzione perpendicolare all'applicazione della forza. In questo caso l'allungamento è dovuto alla nascita e successiva propagazione delle fessure. Il valore massimo di deformazione di trazione indicato in tabella corrisponde ad un'apertura di fessura di circa 5 mm.

Nella seconda e terza colonna della Tab. 2 sono riportati il carico massimo P_{max} e il carico residuo P_{05} ad una deformazione media a compressione ε_c pari a 0.005. La massima tensione principale di trazione σ_l e la corrispondente deformazione di trazione ε_{spl} (deformazione di *splitting*) sono riportate nelle colonne 4 e 5. Nella sesta colonna è riportata la tensione principale $\sigma_{l,05}$ in corrispondenza di una deformazione media di trazione pari a 0.5%. Nelle colonne 7 e 8 vengono evidenziati i rapporti tra le tensioni principali di trazione dei campioni rinforzati e quelle dei campioni non rinforzati, riferiti al valore massimo e a quello residuo ad una deformazione media di trazione di 0.5%.

La massima tensione principale di trazione equivalente dei campioni rinforzati risulta almeno raddoppiata rispetto ai campioni non rinforzati di muratura a due teste e quasi triplicata nei campioni in pietra. Il rapporto tra la tensione di trazione residua dei campioni rinforzati, ad una deformazione dello 0.5%, e quella dei campioni non rinforzati varia da 4, per la muratura in pietra, a più di 12 per la muratura a due teste. Questi risultati mostrano l'efficacia della tecnica di rinforzo che prevede l'applicazione di un intonaco armato con rete in GFRP in termini di incremento della resistenza di picco del pannello ed in termini di capacità di deformazione dopo la formazione delle fessure. Nelle Fig. 5a - d vengono riportate le curve tensione principale di trazione σ_l - deformazione media di trazione ε_t dei campioni di muratura. La deformazione media a trazione viene determinata in base allo spostamento misurato dai trasduttori in direzione perpendicolare rispetto a quella della forza. In realtà, tale spostamento è principalmente dovuto alla formazione di fessure diagonali. Un altro parametro meccanico che definisce la rigidezza del materiale alle azioni taglianti è il modulo di taglio G . Tale modulo è espresso volutamente in maniera equivalente, come se la muratura rinforzata, comprensiva quindi degli strati d'intonaco e della rete in GFRP, fosse considerata un materiale omogeneo. Dalle simulazioni numeriche effettuate è possibile ricavare sia la tensione che la deformazione a taglio. Questa ultima può essere calcolata come segue:

$$\gamma = \varepsilon_t - \varepsilon_c \quad (3)$$

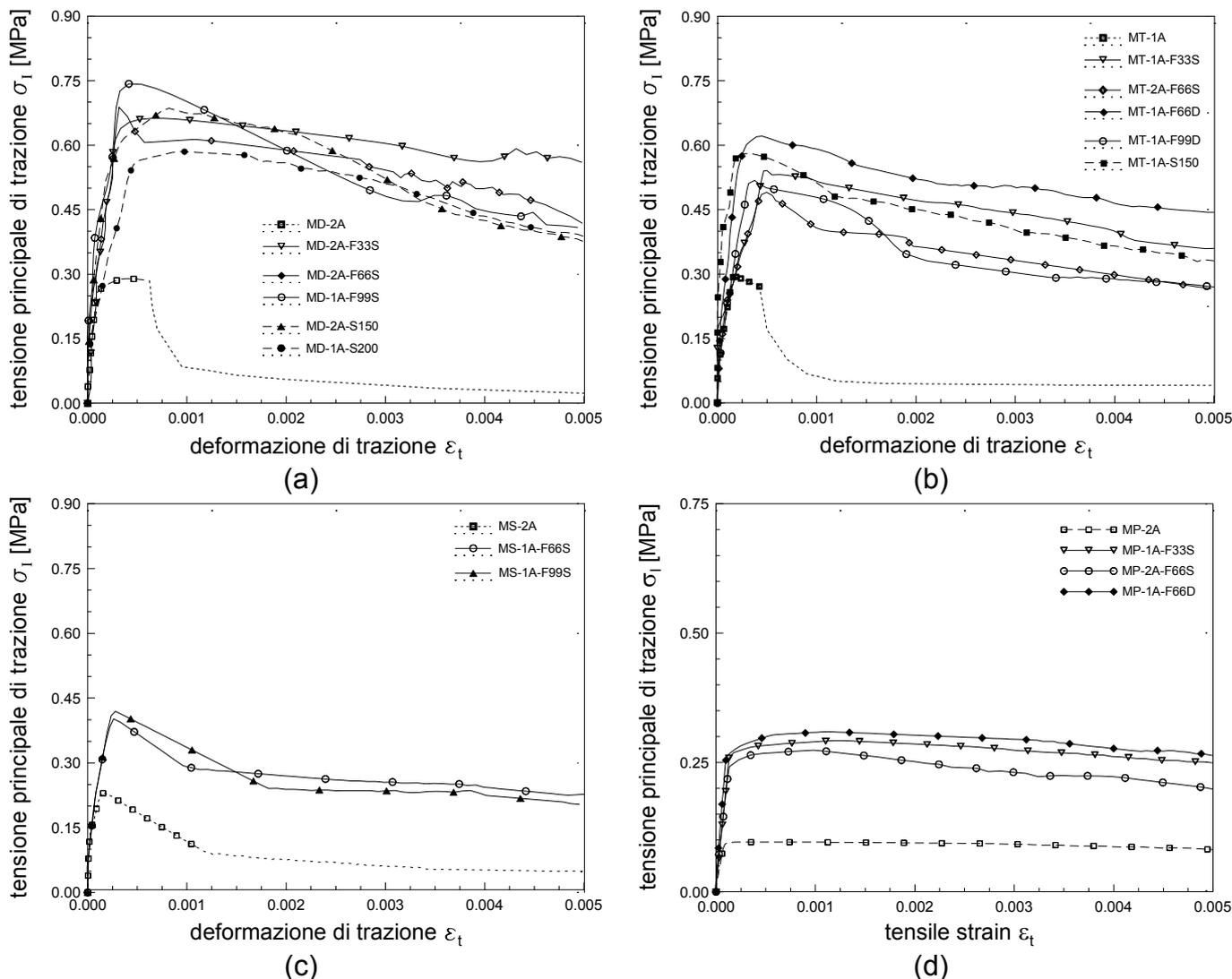


Figura 4 - Tensione principale di trazione vs. deformazione di trazione: muratura a due (a) e a tre (b) teste di mattoni; muratura a sacco (c); muratura in pietra grossolanamente squadrata (d).

Dove ε_t e ε_c sono, rispettivamente, la deformazione di trazione e quella di compressione, misurate lungo le diagonali del pannello (vedi Fig. 2). I valori delle deformazioni sono dedotti misurando gli allungamenti e le contrazioni relativi tra due punti posti su ciascuna delle due diagonali del pannello (tali distanze rimangono costanti in tutte le prove e sono pari a 1200 mm). A questi valori dimensionali delle diagonali, la base di misura non condiziona sensibilmente la deformazione tangenziale. Una stima del modulo di taglio può essere ottenuta valutando la risposta globale del pannello, attraverso l'Eq. 4:

$$G = \frac{1.05 \cdot P}{A \cdot \gamma} \quad (4)$$

Il modulo di taglio equivalente viene misurato nell'intervallo di carico 10% - 40% del suo valore di picco. La deformazione tagliante viene valutata in corrispondenza di tali valori di carico. Può essere facilmente deducibile dalla Tab. 2 che i valori del modulo di taglio è sensibilmente inferiore nella muratura in pietra grossolanamente squadrata.

Campione	P_{max} [kN]	P_{05} [kN]	f_t [MPa]	ϵ_{spl} [‰]	$\sigma_{1,05}$ [MPa]	$f_{t(R)} / f_{t(U)}$	$\sigma_{1,5(R)} / \sigma_{1,5(U)}$	$P_{0,1}$ [kN]	$P_{0,4}$ [kN]	$\gamma_{0,1}$	$\gamma_{0,4}$	G	$G_{t(R)} / G_{t(U)}$
<i>Muratura a due teste di mattoni pieni (spessore 250mm)</i>													
MD-1A	214,2	19,7	0,37	0,18	0,04	-	-	21,4	85,7	0,000050	0,000159	2123	-
MD-2A	169,5	15,2	0,29	0,24	0,03	-	-	17,0	67,8	0,000094	0,000181	2118	-
MD-1A-F33S	389,4	224,3	0,67	0,12	0,53	2,03	15,91	38,9	155,7	0,000049	0,000168	3563	1,7
MD-2A-F33S	371,7	244,5	0,64	0,14	0,60	1,94	17,79	37,2	148,7	0,000047	0,000166	3398	1,6
MD-1A-F66S	372,5	251,6	0,64	0,33	0,49	1,94	14,55	37,2	149,0	0,000027	0,000159	3063	1,4
MD-2A-F66S	419,8	173,9	0,72	0,54	0,49	2,19	14,54	42,0	167,9	0,000053	0,000194	3228	1,5
MD-1A-F99S	423,0	134,1	0,73	0,27	0,44	2,20	13,06	42,3	169,2	0,000021	0,000178	2923	1,4
MD-2A-F99S	400,3	181,0	0,69	0,30	0,39	2,09	11,59	40,0	160,1	0,000064	0,000210	2982	1,4
MD-1A-S150	324,6	152,3	0,56	0,58	0,33	1,69	9,94	32,5	129,8	0,000001	0,000089	3991	1,9
MD-2A-S150	339,3	221,9	0,59	0,19	0,47	1,77	13,89	33,9	135,7	0,000052	0,000139	4237	2,0
MD-1A-S200	406,8	214,2	0,70	0,72	0,42	2,12	12,59	40,7	162,7	0,000004	0,000122	3754	1,8
MD-2A-S200	398,0	220,4	0,69	0,22	0,41	2,07	12,31	39,8	159,2	0,000024	0,000134	3904	1,8
MD 1C	275,1	21,2	0,47	0,15	0,04	-	-	27,5	110,0	0,000016	0,000101	3530	-
MD 2C	238,8	24,6	0,41	0,12	0,04	-	-	23,9	95,5	0,000012	0,000091	3307	-
MD-1C-F33S	420,8	229,2	0,73	0,22	0,45	1,64	11,83	42,1	168,3	0,000044	0,000131	5257	1,5
MD-2C-F33S	412,9	211,3	0,71	0,44	0,54	1,61	14,28	41,3	165,2	0,000067	0,000155	5073	1,5
MD-1C-F66S	474,6	226,1	0,82	0,59	0,46	1,85	12,05	47,5	189,8	0,000064	0,000173	4723	1,4
MD-2C-F66S	506,0	170,1	0,87	0,55	0,46	1,97	11,99	50,6	202,4	0,000027	0,000141	4842	1,4
MD-1C-F99S	469,6	113,3	0,81	0,13	0,31	1,83	8,26	47,0	187,8	0,000071	0,000186	4451	1,3
MD-2C-F99S	539,7	234,1	0,93	0,43	0,52	2,10	13,73	54,0	215,9	0,000025	0,000153	4574	1,3
MT-1A	258,9	46,1	0,29	0,22	0,06	-	-	25,9	103,5	0,000011	0,000084	2542	-
MT-2A	312,6	57,3	0,35	0,32	0,07	-	-	31,3	125,0	0,000004	0,000088	2654	-
MT-1A-F33S	478,8	299,0	0,54	0,28	0,32	1,68	4,88	47,9	191,5	0,000011	0,000098	3925	1,5
MT-2A-F33S	482,0	300,1	0,55	0,21	0,37	1,69	5,63	48,2	192,8	0,000014	0,000106	3761	1,4
MT-1A-F66S	530,4	312,1	0,60	0,34	0,39	1,86	5,86	53,0	212,2	0,000013	0,000122	3477	1,3
MT-2A-F66S	434,5	267,7	0,49	0,23	0,36	1,52	5,41	43,5	173,8	0,000006	0,000094	3534	1,4
MT-1A-F66SL	385,9	-	0,44	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-	-
MT-2A-F66SL	349,1	-	0,40	-	-	1,22	-	-	-	-	-	-	-
MT-1A-F66D	548,3	381,2	0,62	0,36	0,46	1,92	6,91	54,8	219,3	0,000011	0,000107	4106	1,6
MT-2A-F66D	575,4	307,4	0,65	0,20	0,43	2,01	6,54	57,5	230,2	0,000020	0,000113	4409	1,7
MT-1A-F99D	457,4	215,0	0,52	0,11	0,28	1,60	4,29	45,7	183,0	0,000013	0,000095	3988	1,5
MT-2A-F99D	414,4	214,8	0,47	0,16	0,29	1,45	4,43	41,4	165,8	0,000012	0,000086	3980	1,5
MT-1A-S150	498,0	235,6	0,56	0,12	0,36	1,74	5,39	49,8	199,2	0,000002	0,000081	4475	1,7
MT-2A-S150	404,1	258,7	0,46	0,13	0,34	1,41	5,07	40,4	161,6	0,000002	0,000065	4553	1,8
MT-1B	242,7	39,9	0,28	0,20	0,05	-	-	24,3	97,1	0,000001	0,000098	1785	-
MT-2B	286,0	43,8	0,32	0,15	0,06	-	-	28,6	114,4	0,000002	0,000114	1822	-
MT-1B-F99D	413,9	154,7	0,47	0,13	0,26	1,57	4,60	41,4	165,6	0,000002	0,000108	2793	1,5
MT-2B-F99D	315,7	171,7	0,36	0,17	0,23	1,19	4,07	31,6	126,3	0,000001	0,000080	2860	1,6
MS-1A	221,9	71,7	0,25	0,07	0,08	-	-	22,2	88,8	0,000011	0,000158	1076	-
MS-2A	202,6	64,2	0,23	0,04	0,08	-	-	20,3	81,1	0,000007	0,000135	1139	-
MS-1A-66S	354,7	197,3	0,40	0,15	0,25	1,67	3,06	35,5	141,9	0,000006	0,000155	1699	1,5
MS-2A-66S	338,9	155,1	0,38	0,11	0,21	1,60	2,49	33,9	135,6	0,000022	0,000160	1750	1,6
MS-1A-99S	370,5	179,2	0,42	0,07	0,24	1,75	2,82	37,0	148,2	0,000006	0,000168	1629	1,5
MS-2A-99S	309,6	175,4	0,35	0,11	0,21	1,46	2,57	31,0	123,8	0,000019	0,000159	1580	1,4
MS-1B	177,5	53,7	0,20	0,07	0,07	-	-	17,7	71,0	0,000009	0,000139	981	-
MS-2B	170,4	49,6	0,19	0,05	0,07	-	-	17,0	68,2	0,000011	0,000146	901	-
MS-1B-33S	292,3	144,1	0,33	0,09	0,22	1,68	3,11	29,2	116,9	0,000007	0,000140	1577	1,7
MS-2B-33S	301,1	142,5	0,34	0,23	0,22	1,73	3,13	30,1	120,4	0,000008	0,000136	1670	1,8
MS-1B-66S	249,9	176,5	0,28	0,34	0,24	1,44	3,47	25,0	100,0	0,000007	0,000123	1528	1,6
MS-2B-66S	252,9	173,6	0,29	0,76	0,21	1,45	2,94	25,3	101,1	0,000026	0,000146	1515	1,6
MP-1A	135,7	61,8	0,10	0,98	0,07	-	-	13,6	54,3	0,000002	0,000115	815	-
MP-2A	126,4	49,9	0,10	0,74	0,05	-	-	12,6	50,5	0,000002	0,000121	718	-
MP-1A-F33S	388,0	245,4	0,29	1,07	0,26	2,96	4,37	38,8	155,2	0,000010	0,000203	1365	1,8
MP-2A-F33S	360,0	266,6	0,27	1,42	0,22	2,75	3,82	36,0	144,0	0,000002	0,000180	1374	1,8
MP-1A-F66S	331,9	256,4	0,25	0,97	0,20	2,53	3,42	33,2	132,8	0,000001	0,000188	1205	1,6
MP-2A-F66S	366,4	233,3	0,28	0,73	0,22	2,80	3,72	36,6	146,5	0,000004	0,000197	1285	1,7
MP-1A-F66SL	196,5	-	0,15	-	-	1,50	-	-	-	-	-	-	-
MP-2A-F66SL	189,8	-	0,14	-	-	1,45	-	-	-	-	-	-	-
MP-1A-F66D	410,7	307,6	0,31	1,12	0,27	3,13	4,61	41,1	164,3	0,000001	0,000190	1478	1,9
MP-2A-F66D	398,2	313,3	0,30	1,30	0,26	3,04	4,44	39,8	159,3	0,000001	0,000182	1496	2,0
MP-1B	117,2	42,9	0,09	1,19	0,05	-	-	11,7	46,9	0,000001	0,000126	638	-
MP-2B	115,0	39,8	0,09	0,97	0,04	-	-	11,5	46,0	0,000002	0,000099	801	-
MP-1B-F66S	368,9	317,7	0,28	0,71	0,21	3,18	4,67	36,9	147,5	0,000003	0,000203	1252	1,7
MP-2B-F66S	393,1	348,3	0,30	0,88	0,23	3,39	1,83	39,3	157,2	0,000004	0,000210	1293	1,8
MP-1A	135,7	61,8	0,10	0,98	0,07	-	-	13,6	54,3	0,000002	0,000115	815	-
MP-2A	126,4	49,9	0,10	0,74	0,05	-	-	12,6	50,5	0,000002	0,000121	718	-
MP-1A-F33S	388,0	245,4	0,29	1,07	0,26	2,96	4,37	38,8	155,2	0,000010	0,000203	1365	1,8
MP-2A-F33S	360,0	266,6	0,27	1,42	0,22	2,75	3,82	36,0	144,0	0,000002	0,000180	1374	1,8
MP-1A-F66S	331,9	256,4	0,25	0,97	0,20	2,53	3,42	33,2	132,8	0,000001	0,000188	1205	1,6
MP-2A-F66S	366,4	233,3	0,28	0,73	0,22	2,80	3,72	36,6	146,5	0,000004	0,000197	1285	1,7
MP-1A-F66SL	196,5	-	0,15	-	-	1,50	-	-	-	-	-	-	-
MP-2A-F66SL	189,8	-	0,14	-	-	1,45	-	-	-	-	-	-	-
MP-1A-F66D	410,7	307,6	0,31	1,12	0,27	3,13	4,61	41,1	164,3	0,000001	0,000190	1478	1,9
MP-2A-F66D	398,2	313,3	0,30	1,30	0,26	3,04	4,44	39,8	159,3	0,000001	0,000182	1496	2,0
MP-1B	117,2	42,9	0,09	1,19	0,05	-	-	11,7	46,9	0,000001	0,000126	638	-
MP-2B	115,0	39,8	0,09	0,97	0,04	-	-	11,5	46,0	0,000002	0,000099	801	-
MP-1B-F66S	368,9	317,7	0,28	0,71	0,21	3,18	4,67	36,9	147,5	0,000003	0,000203	1252	1,7
MP-2B-F66S	393,1	348,3	0,30	0,88	0,23	3,39	1,83	39,3	157,2	0,000004	0,000210	1293	1,8

Tabella 2 - Risultati delle prove di compressione diagonale ed analisi dei risultati.

CALCOLO DELLA DUTTILITÀ

Dai risultati delle prove di compressione diagonale è possibile trarre alcune importanti informazioni sulla duttilità della muratura (rinforzata e non). In base al responso dell'analisi agli elementi finiti di un pannello murario soggetto a prova di compressione diagonale, si può fornire una stima della tensione tangenziale nel centro del pannello attraverso la seguente relazione:

$$\sigma_{xy} = \frac{1.05 \cdot P}{A} \quad (5)$$

Utilizzando l'Eq. 5 si possono determinare tre valori di deformazione tagliante: γ_y , $\gamma_{0.80}$, $\gamma_{0.60}$, ovvero i valori deformativi che corrispondono alle tensioni tangenziali convenzionali di snervamento e, rispettivamente, ad un valore post picco pari all'80% ed al 60% di questa (vedi Fig. 5a). Il primo valore è calcolato assumendo l'ipotesi di materiale a comportamento elastico lineare con modulo di elasticità tangenziale pari a quello inserito in Tab. 2. Utilizzando l'Eq. 5 e sostituendo il termine P con il valore massimo del carico diagonale P_{max} :

$$\gamma_y = \frac{1.05 \cdot P}{GA} \quad (6)$$

La Tab. 3 riporta i rapporti tra le deformazioni $\gamma_{0.80}$, $\gamma_{0.60}$ e γ_y . Questi rapporti forniscono importanti informazioni sulla duttilità del pannello in muratura in fase post elastico-lineare.

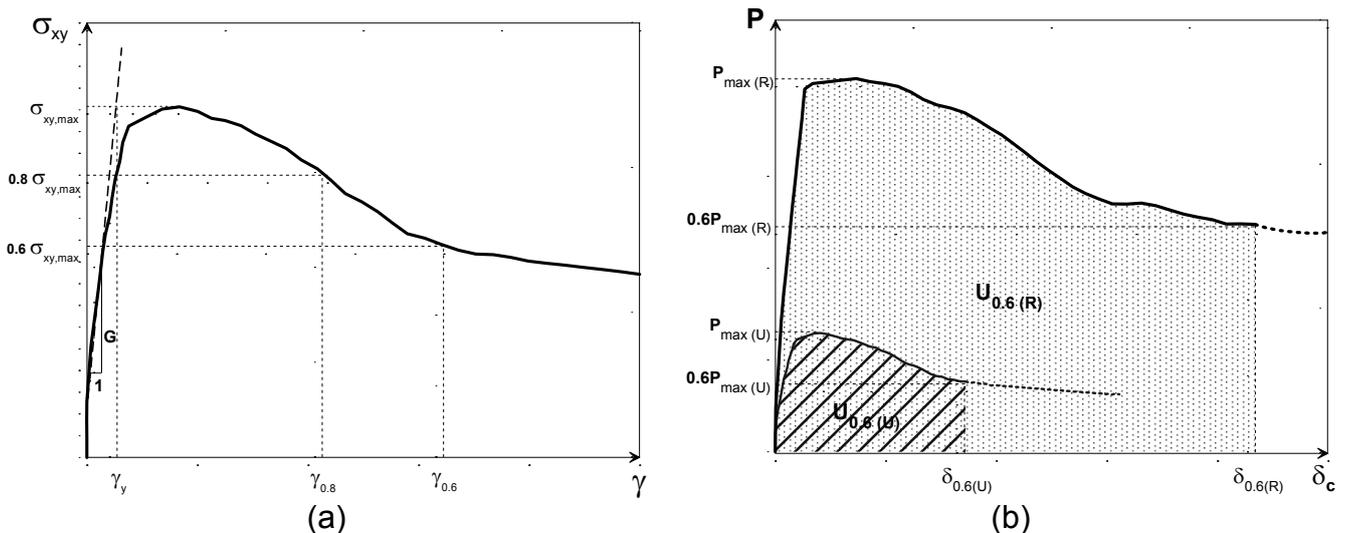


Figura 5 - Determinazione della deformazione tagliante (a); energia deformativa (b).

La tabella riporta anche i valori dell'energia di deformazione U_t . Operativamente, fornendo una stima dell'energia, questa può essere calcolata valutando il lavoro speso in fase post-elastica per un carico pari all'80% ($U_{t,0.80}$) ed al 60% ($U_{t,0.60}$) di quello di picco (vedi Fig. 5b). Il rapporto tra l'energia di deformazione di un pannello in muratura rinforzata e non viene riportato nella Tab. 3. Questi rapporti evidenziano la maggior capacità dissipativa dei campioni rinforzati rispetto a quelli non rinforzati (superiori a 3-4 volte).

Campione	γ_y [‰]	$\gamma_{0,80}$ [‰]	$\gamma_{0,60}$ [‰]	$\gamma_{0,80}/\gamma_y$	$\gamma_{0,60}/\gamma_y$	$U_{t0,80}$ [J]	$U_{t0,60}$ [J]	$U_{t0,80(R)} / U_{t0,80(U)}$	$U_{t0,60(R)} / U_{t0,60(U)}$
<i>Muratura a due teste di mattoni pieni (spessore 250mm)</i>									
MD-1A	0,37	1,09	1,39	2,99	3,80	55,6	79,1	-	-
MD-2A	0,29	0,95	1,70	3,28	5,87	88,1	103,1	-	-
MD-1A-F33S	0,40	6,09	9,98	15,39	25,22	813,3	1463,8	11,32	16,07
MD-2A-F33S	0,40	8,82	13,67	22,27	34,52	1289,1	2176,9	17,94	23,90
MD-1A-F66S	0,44	4,48	13,06	10,17	29,66	574,6	1265,7	8,00	13,89
MD-2A-F66S	0,47	2,86	8,56	6,07	18,18	849,4	1779,3	11,82	19,53
MD-1A-F99S	0,52	2,06	4,65	3,93	8,88	703,1	1136,9	9,79	12,48
MD-2A-F99S	0,49	2,64	4,90	5,43	10,08	567,7	778,3	7,90	8,54
MD-1A-S150	0,29	5,85	9,68	19,87	32,87	736,3	1039,3	10,25	11,41
MD-2A-S150	0,29	6,00	10,51	20,69	36,25	1063,6	1610,0	14,80	17,67
MD-1A-S200	0,39	4,92	10,14	12,54	25,84	831,7	1290,3	11,58	14,16
MD-2A-S200	0,37	3,99	7,72	10,81	20,91	1003,5	1793,2	13,97	19,68
<i>Muratura a tre teste di mattoni pieni (spessore 380mm)</i>									
MD 1C	0,28	1,10	1,70	3,90	6,02	67,3	95,8	-	-
MD 2C	0,26	1,14	1,78	4,36	6,81	64,6	91,9	-	-
MD-1C-F33S	0,29	5,18	9,52	17,88	32,85	1135,6	1565,3	17,22	16,68
MD-2C-F33S	0,29	5,39	10,84	18,29	36,79	1178,1	1623,9	17,86	17,31
MD-1C-F66S	0,36	2,22	7,54	6,10	20,73	535,5	1665,3	8,12	17,75
MD-2C-F66S	0,38	2,29	7,08	6,05	18,71	560,3	1386,4	8,50	14,78
MD-1C-F99S	0,38	1,84	3,92	4,82	10,26	421,8	677,9	6,40	7,22
MD-2C-F99S	0,43	2,67	7,08	6,25	16,57	743,6	1464,9	11,27	15,61
MT-1A	0,24	1,07	1,80	4,41	7,44	172,1	198,2	-	-
MT-2A	0,28	1,05	1,48	3,72	5,28	118,1	138,6	-	-
MT-1A-F33S	0,29	6,44	11,02	22,16	37,93	1646,6	2324,3	11,35	13,80
MT-2A-F33S	0,31	5,12	10,05	16,77	32,92	1076,9	2059,1	7,42	12,23
MT-1A-F66S	0,36	1,88	10,80	5,17	29,72	502,8	2081,1	3,47	12,36
MT-2A-F66S	0,29	2,15	10,18	7,34	34,76	584,3	1863,6	4,03	11,07
MT-1A-F66SL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MT-2A-F66SL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MT-1A-F66D	0,32	4,41	9,21	13,87	28,96	949,9	2371,8	6,55	14,08
MT-2A-F66D	0,31	3,39	8,66	10,91	27,86	1700,4	2524,2	11,72	14,99
MT-1A-F99D	0,27	2,65	5,51	9,70	20,17	449,8	844,9	3,10	5,02
MT-2A-F99D	0,25	1,89	7,04	7,62	28,38	415,6	1483,4	2,86	8,81
MT-1A-S150	0,27	2,93	7,77	11,05	29,31	1189,4	2021,0	8,20	12,00
MT-2A-S150	0,21	5,23	6,79	24,73	32,11	538,1	1362,4	3,71	8,09
<i>Muratura di mattoni pieni a sacco, doppio paramento</i>									
MT-1B	0,32	1,02	1,74	3,15	5,37	118,4	147,1	-	-
MT-2B	0,37	1,14	1,66	3,05	4,44	90,2	125,2	-	-
MT-1B-F99D	0,35	2,76	6,51	7,82	18,44	594,9	1038,4	5,70	7,63
MT-2B-F99D	0,26	1,84	6,50	7,00	24,72	286,1	1172,2	2,74	8,61
MS-1A	0,49	1,39	2,08	2,82	4,23	103,8	158,6	-	-
MS-2A	0,42	1,56	2,38	3,68	5,61	129,4	201,8	-	-
MS-1A-66S	0,50	2,35	9,65	4,73	19,41	327,3	1233,2	2,81	6,84
MS-2A-66S	0,46	1,21	5,24	2,62	11,36	232,5	589,3	1,99	3,27
MS-1A-99S	0,54	1,79	5,12	3,30	9,45	340,1	520,4	2,92	2,89
MS-2A-99S	0,47	2,62	7,50	5,61	16,07	202,5	734,3	1,74	4,07
<i>Muratura in pietra grossolanamente squadrata</i>									
MS-1B	0,43	1,26	2,10	2,92	4,87	113,2	171,3	-	-
MS-2B	0,45	1,58	2,24	3,51	4,97	91,7	127,2	-	-
MS-1B-33S	0,44	2,74	6,61	6,21	14,97	529,8	1013,1	5,17	6,79
MS-2B-33S	0,43	4,11	8,15	9,57	18,98	649,1	993,3	6,34	6,66
MS-1B-66S	0,39	2,25	8,17	5,77	20,97	922,4	1244,6	9,00	8,34
MS-2B-66S	0,40	3,57	7,67	8,98	19,29	813,8	1251,3	7,94	8,38
MP-1A	0,26	4,95	7,39	18,79	28,04	427,2	631,6	-	-
MP-2A	0,28	5,08	8,00	18,20	28,71	319,7	611,5	-	-
MP-1A-F33S	0,45	10,09	16,59	22,42	36,86	1337,2	2204,2	3,58	3,55
MP-2A-F33S	0,42	7,82	15,43	18,84	37,17	1251,3	2353,3	3,35	3,79
MP-1A-F66S	0,44	7,76	11,68	17,79	26,78	1335,9	1914,0	3,58	3,08
MP-2A-F66S	0,45	6,39	13,30	14,15	29,46	1272,1	1787,0	3,41	2,88
MP-1A-F66SL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MP-2A-F66SL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MP-1A-F66D	0,44	12,17	17,02	27,66	38,68	1858,4	2648,0	4,98	4,26
MP-2A-F66D	0,42	9,06	12,21	21,48	28,95	2065,9	2332,0	5,53	3,75
<i>Muratura in pietra grossolanamente squadrata</i>									
MP-1B	0,29	5,06	6,18	17,40	21,23	328,6	477,6	-	-
MP-2B	0,23	4,25	6,74	18,67	29,65	161,6	212,6	-	-
MP-1B-F66S	0,47	10,99	15,65	23,54	33,52	1711,4	2168,3	6,98	6,28
MP-2B-F66S	0,48	8,17	12,34	16,97	25,63	1997,6	2297,6	8,15	6,66

Tabella 3 - Parametri che evidenziano la duttilità e la capacità dissipativa dei campioni.

STIMA DELLA RESISTENZA A TRAZIONE EQUIVALENTE

Sulle basi dell'ampia campagna sperimentale compiuta su pannelli in muratura, dell'elaborazione dei risultati ottenuti dalle prove e sulle considerazioni teoriche riportate alle pagine precedenti, in questa sede viene proposta una relazione che permette di stimare la resistenza a trazione equivalente della muratura rinforzata con rete in GFRP ed intonaco.

Configurazione non fessurata

La resistenza viene calcolata utilizzando la resistenza a trazione della muratura non rinforzata $f_{t,m}$, la resistenza a trazione della malta d'intonaco $f_{t,coat}$ ed espressa in funzione del tipo di rete in GFRP che si intende utilizzare:

$$\sigma_{l,calc} = \beta \cdot f_{t,m} + 2 \left(\frac{f_{t,coat} \cdot t_{coat}}{t_m} + \frac{EA_r \cdot \bar{\varepsilon}}{t_m \cdot s} \right) \quad (7)$$

Il termine t_m indica lo spessore della muratura non rinforzata, t_{coat} quello dell'intonaco sulla singola faccia del pannello (30 mm per la muratura di mattoni, 35 mm per quella in pietra), s è la dimensione della maglia della rete in GFRP mentre EA_r è la rigidità assiale di questa ultima (250 kN per la rete di tipo "S" e 540 per quella di tipo "D"). Il parametro $\bar{\varepsilon}$ rappresenta la deformazione dell'intonaco in condizioni non fessurata, corrispondente, quindi, alla resistenza di picco a trazione dell'intonaco. Tale relazione viene di seguito riportata:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{f_{t,coat}}{E_{coat}} \quad (8)$$

E_{coat} è il modulo elastico dell'intonaco, pari a 2850 MPa. Nell'Eq. 7 il secondo termine rappresenta il contributo della rete in GFRP in termini di resistenza a trazione equivalente della muratura rinforzata per congruenza della rete con l'intonaco (vedi Fig. 6). Tutti i valori dei parametri meccanici sono stati ottenuti mediante rigorose prove sperimentali.

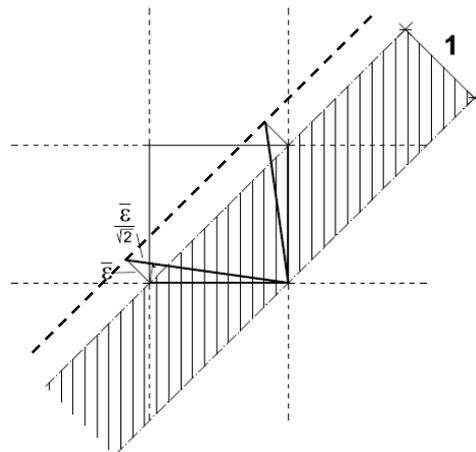


Figura 6 - Deformazione dei fili della rete per aderenza con la malta dell'intonaco in conseguenza della deformazione di rottura a trazione della malta

Il coefficiente $\beta(s)$ tiene conto dell'efficienza dell'intonaco armato sulla resistenza a trazione in funzione del tipo di muratura. I valori maggiori dell'unità evidenziano un contributo resistente superiore a quello della sola camicia dovuto al confinamento della muratura base offerto dalla camicia stessa. Dai risultati sperimentali si è notato che il valore del coefficiente $\beta(s)$ dipende principalmente dal tipo di muratura. Si è visto che minore è la resistenza della muratura di base, maggiore è l'incremento di resistenza, ossia, l'effetto di confinamento della camicia risulta più marcato sulle murature meno resistenti. La dimensione della maglia ha mostrato una leggera

influenza sul valore del coefficiente β dovuta principalmente alla maggiore difficoltà della malta a penetrare completamente all'interno delle maglie, lasciando qualche vuoto nell'intonaco soprattutto in prossimità delle intersezioni dei fili della rete. Questo penalizza, da un lato, l'aderenza del filo e, dall'altro, la resistenza a trazione dell'intonaco.

Dai risultati sperimentali contenuti in questo studio è stato possibile definire dei valori di riferimento per il coefficiente β che consentono di stimare con buona approssimazione i valori di resistenza sperimentale; In accordo coi risultati sperimentali il coefficiente β è pari a 1.3 per le murature in mattoni pieni, pari a 1.0 per la muratura a sacco (avendo queste un nucleo interno con caratteristiche di resistenza e deformabilità scadenti, presentano un incremento di resistenza dovuto al confinamento della camicia di entità trascurabile) e pari a 1.5 per quella in pietra. I valori del coefficiente $\beta(s)$ riportati in tabella corrispondono ai valori del coefficiente correttivo relativo alla presenza di connessione trasversale riportato nella Tabella C8A.2.2 della Circolare 02.02.2009 n. 617/C.C.LL.PP.

In realtà il contributo della rete sulla capacità portante di picco è modesto, ma diventa fondamentale nella fase successiva alla formazione della fessurazione diagonale. In questa fase, infatti, è importante che intervengano elementi resistenti a trazione (rete in GFRP o metallica) in sostituzione della muratura fessurata per assorbire le tensioni di trazione. In assenza di questi elementi si ha normalmente una brusca riduzione di resistenza con annullamento della capacità portante a taglio del pannello.

Generalmente può essere apprezzata una buona affidabilità per quanto riguarda le relazioni proposte: solo in alcuni casi tale relazione porta ad una sovrastima dei valori ottenuti mediante prove sperimentali.

Configurazione fessurata

Per garantire un'adeguata capacità dissipativa del pannello, è necessario che il meccanismo a puntone - tirante formato dalla rete e dalla malta dell'intonaco (Fig. 7) sia in grado di sopportare una forza superiore al 60% della resistenza di picco. Dallo studio sperimentale si è notato, infatti, che i campioni di muratura dimensionati per garantire una resistenza dopo la fessurazione superiore al 60% di quella di picco hanno mostrato una capacità di spostamento superiore al 0.6% dell'altezza del pannello murario, in corrispondenza di una riduzione della resistenza del 40% di quella massima. Quei campioni, quindi, garantiscono una duttilità confrontabile con quella della muratura armata (spostamento ultimo pari a 0.6% dell'altezza del pannello - p.to C8.7.1.4 della Circolare 02.02.2009 n. 617/C.C.LL.PP.). Nello schema di Fig. 7 il puntone equivalente di malta viene assunto di larghezza pari a 0.25 volte la lunghezza della diagonale ($\sqrt{2} \cdot p$). Per il calcolo della quantità minima di armatura si valuta prima la forza di trazione diagonale F necessaria per far cedere a compressione il puntone diagonale, uguagliandola ad una forza di trazione proporzionale a quella di picco

$$F = 2 \cdot 0.25 \cdot \sqrt{2} \cdot p \cdot f_{c,int} \cdot t_{int} = \delta_1 \cdot f_{t,calc} \cdot t_m \cdot \sqrt{2} \cdot p \quad (9)$$

dove $f_{c,int}$ è la resistenza a compressione della malta dell'intonaco e δ_1 rappresenta la quota parte della resistenza di picco che può essere sopportata dal puntone di malta. Dall'Eq. 9 si ricava il valore di δ_1 :

$$\delta_1 = \frac{0.5 f_{c,int} \cdot t_{int}}{f_{t,calc} \cdot t_m} \quad (10)$$

Si determina poi la forza di trazione diagonale F necessaria per far cedere a trazione la rete, uguagliandola ad una forza di trazione proporzionale a quella di picco

$$F = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot R_f = \delta_2 f_{t,calc} \cdot t_m \cdot \sqrt{2} p \quad (11)$$

dove R_f è la resistenza a trazione di un filo della rete e δ_2 rappresenta la quota parte della resistenza di picco che può essere sopportata dalla rete. Dall'Eq. 12 si ricava il valore di δ_2 :

$$\delta_2 = \frac{2R_f}{f_{t,calc} \cdot t_m \cdot p} \quad (12)$$

Per una rottura bilanciata, corrispondente alla contemporanea rottura a compressione del puntone di malta e a trazione della rete, è necessario progettare la rete in modo che la capacità portante ottenuta con le Eq. 10, 12 sia uguale:

$$\delta_1 = \delta_2 \quad (13)$$

Per garantire una buona efficacia del sistema di rinforzo è inoltre necessario che la resistenza post fessurazione risulti, come anzidetto, superiore al 60% della resistenza raggiunta prima dell'inizio della fessurazione. In particolare tale resistenza è consigliabile sia compresa tra il 60% e il 100% della resistenza non fessurata

$$0.6 \leq \min(\delta_1, \delta_2) \leq 1.0 \quad (14)$$

Si possono usare anche valori superiori all'unità, ma ulteriori benefici sia in termini di resistenza che di duttilità sono contenuti.

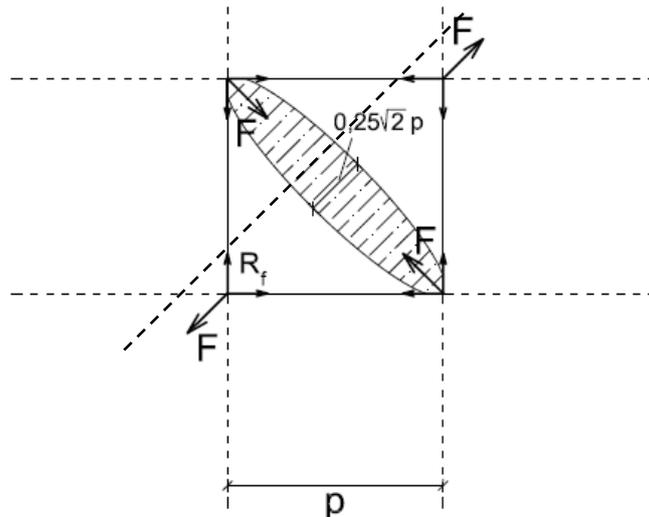


Figura 7 - Schema semplificato a tirante - puntone che simula le sollecitazioni in una maglia di rete annegata nell'intonaco.

Per la verifica dell'affidabilità della relazione proposta per la stima della resistenza a trazione equivalente in configurazione non fessurata si mette a confronto il valore della resistenza stimato grazie all'ausilio dell'Eq. 7 con i valori dedotti dai risultati delle prove di compressione diagonale eseguiti nell'ambito dello studio.

Nella comparazione si assumono i valori riportati nel testo alle pagine precedenti per i parametri da utilizzare nell'Eq. 7. Nel calcolo dello spessore medio dell'intonaco per le murature in pietra si è tenuto conto della irregolarità della superficie della muratura dovuta alla forma non regolare delle pietre. Il valore della resistenza a trazione della malta dell'intonaco è stato ricavato da prove di trazione indiretta condotte su campioni cilindrici; il modulo elastico e la resistenza a compressione della malta dell'intonaco sono stati ricavati da prove sperimentali di compressione condotte su campioni cilindrici.

Campione	f_t [MPa]	$f_{t,calc.}$ [MPa]	$f_{t,calc.} / f_t$	δ_1	δ_2
<i>Muratura a due teste di mattoni pieni (spessore 250mm)</i>					
MD-1A	0,37	-	-	-	-
MD-2A	0,29	-	-	-	-
MD-1A-F33S	0,67	0,63	0,94	0,75	1,35
MD-2A-F33S	0,64	0,63	0,98	0,75	1,35
MD-1A-F66S	0,64	0,62	0,96	0,76	0,69
MD-2A-F66S	0,72	0,62	0,86	0,76	0,69
MD-1A-F99S	0,73	0,62	0,84	0,76	0,46
MD-2A-F99S	0,69	0,62	0,89	0,76	0,46
MD-1A-S150	0,56	0,57	1,02	0,83	0,66
MD-2A-S150	0,59	0,57	0,97	0,83	0,66
MD-1A-S200	0,70	0,67	0,96	0,70	0,61
MD-2A-S200	0,69	0,67	0,98	0,70	0,61
MD 1C	0,47	-	-	-	-
MD 2C	0,41	-	-	-	-
MD-1C-F33S	0,73	0,77	1,07	0,61	1,10
MD-2C-F33S	0,71	0,77	1,09	0,61	1,10
MD-1C-F66S	0,82	0,76	0,93	0,62	0,55
MD-2C-F66S	0,87	0,76	0,88	0,62	0,55
MD-1C-F99S	0,81	0,76	0,94	0,62	0,37
MD-2C-F99S	0,93	0,76	0,82	0,62	0,37
<i>Muratura di mattoni pieni a sacco, doppio paramento</i>					
MS-1A	0,25	-	-	-	-
MS-2A	0,23	-	-	-	-
MS-1A-66S	0,40	0,37	0,91	0,85	0,76
MS-2A-66S	0,38	0,37	0,95	0,85	0,76
MS-1A-99S	0,42	0,36	0,86	0,85	0,51
MS-2A-99S	0,35	0,36	1,03	0,85	0,51
MS-1B	0,20	-	-	-	-
MS-2B	0,19	-	-	-	-
MS-1B-33S	0,33	0,33	0,99	0,95	1,70
MS-2B-33S	0,34	0,33	0,96	0,95	1,70
MS-1B-66S	0,28	0,32	1,13	0,96	0,87
MS-2B-66S	0,29	0,32	1,12	0,96	0,87
<i>Muratura in pietra grossolanamente squadrata</i>					
MP-1A	0,10	-	-	-	-
MP-2A	0,10	-	-	-	-
MP-1A-F33S	0,29	0,29	0,99	1,18	1,82
MP-2A-F33S	0,27	0,29	1,07	1,18	1,82
MP-1A-F66S	0,25	0,29	1,14	1,20	0,93
MP-2A-F66S	0,28	0,29	1,03	1,20	0,93
MP-1A-F66SL	0,15	-	-	-	-
MP-2A-F66SL	0,14	-	-	-	-
MP-1A-F66D	0,31	0,29	0,94	1,18	1,49
MP-2A-F66D	0,30	0,29	0,97	1,18	1,49
MP-1B	0,09	-	-	-	-
MP-2B	0,09	-	-	-	-
MP-1B-F66S	0,28	0,27	0,96	1,28	0,99
MP-2B-F66S	0,30	0,27	0,90	1,28	0,99

Tabella 4 - Comparazione tra i risultati sperimentali e quelli forniti dal calcolo analitico per la determinazione della resistenza a trazione equivalente della muratura rinforzata.

STIMA DELLA RIGIDEZZA A TAGLIO EQUIVALENTE

In seguito all'analisi dei risultati sperimentali ed a considerazioni teoriche è stata formulata una relazione che consente di stimare un valore del modulo di elasticità tangenziale equivalente G_{calc} della muratura rinforzata. A partire da quella muratura non rinforzata G_m e del valore del modulo di elasticità tangenziale della malta dell'intonaco G_{int} è possibile calcolare il modulo di elasticità tangenziale equivalente G_{calc} utilizzando l'Eq. 15:

$$G_{calc} = \xi \cdot G_m + 2 \cdot \left(G_{int} \cdot \frac{t_{int}}{t_m} \right) \quad (15)$$

dove t_m è lo spessore della muratura escluso il rinforzo, t_{int} è lo spessore dello strato di intonaco. I valori del modulo di elasticità tangenziale della muratura non armata G_m si ricava da prove sperimentali o da validi documenti di riferimento (e.g. Tab C8A2.1 della Circolare 02.02.2009 n. 617/C.S.LL.PP.). I valori del modulo di elasticità tangenziale della malta dell'intonaco G_{int} si ricavano da prove sperimentali o da indicazioni del produttore nel caso di malte premiscelate a prestazione garantita.

Il coefficiente ξ tiene conto del contributo del confinamento dovuto all'intonaco armato sulla rigidezza del materiale equivalente alla muratura rinforzata. I valori di ξ ricavati dalla sperimentazione sono abbastanza simili a quelli ottenuti per il coefficiente β , utilizzato nella (23), ad eccezione del caso della muratura a doppio paramento con sacco interno. I valori del

coefficiente ξ che consentono di approssimare meglio i valori del modulo di elasticità tangenziale sperimentale sono riportati nella Tab. 5 in funzione del tipo di muratura considerato e del tipo di armatura utilizzata nell'intonaco utilizzato.

Campione	G [MPa]	G _{calc.} [MPa]	G _{calc.} /G	Campione	G [MPa]	G _{calc.} [MPa]	G _{calc.} /G
<i>Muratura a due teste di mattoni pieni (spessore 250mm)</i>				<i>Muratura a tre teste di mattoni pieni (spessore 380mm)</i>			
MD-1A	2123,3	-	-	MT-1A	2541,9	-	-
MD-2A	2118,0	-	-	MT-2A	2654,0	-	-
MD-1A-F33S	3562,9	3030,5	0,85	MT-1A-F33S	3925,4	3557,3	0,91
MD-2A-F33S	3398,4	3030,5	0,89	MT-2A-F33S	3760,7	3557,3	0,95
MD-1A-F66S	3062,5	3030,5	0,99	MT-1A-F66S	3477,2	3557,3	1,02
MD-2A-F66S	3228,1	3030,5	0,94	MT-2A-F66S	3534,2	3557,3	1,01
MD-1A-F99S	2922,8	3030,5	1,04	MT-1A-F66SL	-	-	-
MD-2A-F99S	2981,9	3030,5	1,02	MT-2A-F66SL	-	-	-
MD-1A-S150	3990,6	2394,3	0,60	MT-1A-F66D	4106,2	3557,3	0,87
MD-2A-S150	4237,2	2394,3	0,57	MT-2A-F66D	4409,4	3557,3	0,81
MD-1A-S200	3753,7	3030,5	0,81	MT-1A-F99D	3988,5	3557,3	0,89
MD-2A-S200	3903,7	3030,5	0,78	MT-2A-F99D	3979,6	3557,3	0,89
MD 1C	3529,9	-	-	MT-1A-S150	4475,2	2777,9	0,62
MD 2C	3306,5	-	-	MT-2A-S150	4552,6	2777,9	0,61
MD-1C-F33S	5257,4	4717,3	0,90	MT-1B	1784,7	-	-
MD-2C-F33S	5073,1	4717,3	0,93	MT-2B	1822,0	-	-
MD-1C-F66S	4723,4	4717,3	1,00	MT-1B-F99D	2792,9	2524,3	0,90
MD-2C-F66S	4841,7	4717,3	0,97	MT-2B-F99D	2860,2	2524,3	0,88
MD-1C-F99S	4450,8	4717,3	1,06				
MD-2C-F99S	4573,6	4717,3	1,03				
<i>Muratura di mattoni pieni a sacco, doppio paramento</i>				<i>Muratura in pietra grossolanamente squadrata</i>			
MS-1A	1075,78	-	-	MP-1A	815,01	-	-
MS-2A	1138,67	-	-	MP-2A	717,84	-	-
MS-1A-66S	1699,14	1619,40	0,95	MP-1A-F33S	1365,40	1349,14	0,99
MS-2A-66S	1749,57	1619,40	0,93	MP-2A-F33S	1373,54	1349,14	0,98
MS-1A-99S	1629,28	1619,40	0,99	MP-1A-F66S	1205,43	1349,14	1,12
MS-2A-99S	1580,08	1619,40	1,02	MP-2A-F66S	1285,33	1349,14	1,05
MS-1B	981,27	-	-	MP-1A-F66SL	-	-	-
MS-2B	900,87	-	-	MP-2A-F66SL	-	-	-
MS-1B-33S	1576,87	1403,40	0,89	MP-1A-F66D	1478,40	1349,14	0,91
MS-2B-33S	1669,87	1403,40	0,84	MP-2A-F66D	1495,73	1349,14	0,90
MS-1B-66S	1528,12	1403,40	0,92	MP-1B	637,72	-	-
MS-2B-66S	1515,13	1403,40	0,93	MP-2B	800,73	-	-
				MP-1B-F66S	1251,54	1278,34	1,02
				MP-2B-F66S	1293,14	1278,34	0,99

Tabella 5 - Comparazione tra i risultati sperimentali e quelli forniti dal calcolo analitico per la determinazione della rigidezza a taglio equivalente della muratura rinforzata.

Dai risultati sperimentali contenuti in questo studio è stato possibile definire dei valori di riferimento per il coefficiente ξ che consentono di stimare con buona approssimazione i valori di resistenza sperimentale; In accordo coi risultati sperimentali il coefficiente ξ è pari a 1.3 per tutte le murature in mattoni pieni e pari a 1.5 per quella in pietra. I valori del coefficiente ξ riportati in tabella corrispondono ai valori del coefficiente correttivo relativo alla presenza di connessione trasversale riportato nella Tabella C8A.2.2 della Circolare 02.02.2009 n. 617/C.C.LL.PP. Nella comparazione si assume per il modulo di elasticità tangenziale della muratura non rinforzata il valore ricavato dalle prove di compressione diagonale sui campioni non rinforzati e per il modulo di elasticità tangenziale della malta dell'intonaco il valore $0.4E_{int}$ e quindi 1140 MPa. Il valore del modulo elastico della malta dell'intonaco è stato ricavato da prove sperimentali di compressione condotte su campioni cilindrici (la descrizione delle prove è stata fatta nella trattazione relativa alla caratterizzazione dei materiali utilizzati per confezionare i campioni sottoposti a prova di compressione diagonale).

CONCLUSIONI

Sono presentati la metodologia di esecuzione ed i risultati delle prove di compressione diagonale eseguiti su quattro tipologie di campioni di muratura rinforzati con un intonaco e rete

in GFRP. I gruppi sono così suddivisi: a) muratura di mattoni pieni a due teste, b) muratura di mattoni pieni a tre teste, c) muratura di mattoni a doppio paramento con sacco interno in ciottoli di pietra legati con malta magra, d) muratura in pietra grossolanamente squadrata.

Sono state eseguite: 20 prove su campioni in muratura a due teste di mattoni pieni, 18 su campioni in muratura a tre teste, 12 su campioni in muratura di mattoni a doppio paramento con sacco interno di materiale scadente ed infine 14 prove su pannelli in pietra grossolanamente squadrata di spessore 400 mm.

Lo spessore medio dell'intonaco è di 30 mm circa, per le murature di mattoni, e di 40 mm circa, per le murature di pietra. Il collegamento trasversale della rete è stato garantito mediante dispositivi in materiale composito fibrorinforzato solidarizzato alla muratura mediante adesivo epossidico.

Sono stati sottoposti a prova di compressione diagonale due campioni per ogni casistica in modo tale da verificare la ripetibilità dei risultati. I campioni di muratura non rinforzata vengono testati senza l'applicazione di alcun intonaco sulle due facce e costituiscono il riferimento per la valutazione dell'efficacia del rinforzo sugli altri campioni.

Si evidenzia un significativo aumento della resistenza di picco nei campioni rinforzati rispetto a quelli non rinforzati. Inoltre, mentre nei campioni non rinforzati in muratura di mattoni dopo il picco si ha un brusco calo della resistenza fino a valori molto modesti, nei campioni rinforzati si ha un ramo decrescente con valori di resistenza significativi fino a deformazioni di compressione media elevati (-0.5%). In sostanza dopo il picco la struttura conserva, a differenza di quanto accade per il campione non rinforzato, una capacità dissipativa importante. L'interpretazione delle prove di compressione diagonale ha permesso di ricavare informazioni importanti riguardanti la resistenza, la rigidità e la duttilità del materiale muratura rinforzata. È stato cioè definito un materiale omogeneo e isotropo equivalente alla muratura rinforzata del quale sono stati ricavati, dai risultati sperimentali, la resistenza a trazione, il modulo di elasticità tangenziale ed alcuni indici che caratterizzano la duttilità del materiale stesso.

La resistenza a trazione equivalente dei campioni rinforzati risulta essere quasi raddoppiata rispetto ai campioni non rinforzati di muratura a due teste di mattoni, mentre è circa 1,6 volte superiore per il raggruppamento dei campioni di muratura a tre teste e a sacco. Per la muratura in pietra grossolanamente squadrata la resistenza è risultata quasi triplicata. I moduli di elasticità tangenziale equivalente subiscono variazioni comprese tra 1.4 e 1.8 volte il modulo della muratura non rinforzata. Non si hanno quindi considerevoli variazioni di rigidità.

Gli indici di duttilità sono espressi in termini di rapporto tra la deformazione angolare corrispondente ad una resistenza post picco ridotta, rispettivamente, all'80% e al 60%. Si evidenziano valori elevati di tali rapporti soprattutto quando il rinforzo è realizzato con rete di maglia più fitta o con filo avente area doppia di fibre rispetto al filo standard.

Anche le curve carico-deformazione di compressione o tensione principale di trazione-deformazione di trazione mostrano pendenze negative del ramo plastico più marcate per rete a maglia più ampia. Il rapporto risulta molto modesto (circa 3.0) per murature non rinforzate, ad esclusione delle murature in pietra che hanno mostrato un comportamento elasto-plastico con ramo plastico molto poco inclinato. I rapporti fra l'energia di deformazione dei campioni rinforzati rispetto a quella dei campioni non rinforzati risultano elevati per i campioni in muratura a singolo paramento in mattoni. Sono stati riscontrati valori più contenuti per la muratura a sacco con malta di Tipo A. Nella pietra, invece, il rapporto energetico non è molto superiore a 3.0-4.0 in quanto i campioni non rinforzati hanno mostrato un comportamento plastico con pendenza molto blanda.

Dall'analisi dei risultati sperimentali e da considerazioni teoriche sono state proposte due relazioni di utilità pratica per stimare la resistenza a trazione equivalente ed il modulo di elasticità tangenziale equivalente di una muratura rinforzata con intonaco armato. La comparazione fra i valori di resistenza a trazione e rigidità ricavati dalla sperimentazione e le stime ottenute con le formule mostra la buona affidabilità di queste relazioni. Sono state inoltre proposte due relazioni semplificate per verificare se la camicia progettata è in grado di garantire alla muratura un'adeguata capacità dissipativa.

RINGRAZIAMENTI

L'autore desidera ringraziare il personale del Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture dell'Università degli Studi di Trieste, in particolare il Dott. Ing. F. Trevisan e il Dott. Ing. A. Cernigoi per la disponibilità e la collaborazione mostrata durante le prove.

BIBLIOGRAFIA

Valluzzi, M.R., Tinazzi, D., Modena, C., Shear behaviour of masonry panels strengthened by FRP laminates, *Construction and Building Materials*, Elsevier, (16), 409-416, 2002.

Corradi, M., Borri, A., Vignoli, A., Experimental evaluation of the in-plane shear behaviour of masonry walls retrofitted using conventional and innovative methods, *Journal of the British Masonry Society*, 21(1), 29-42, 2008.

Brignola, S., Frumento, S., Lagomarsino, S., Podestà, S., Identification of shear parameters of masonry panels through the in-situ diagonal compression test, *International Journal of Architectural Heritage*, 3, 52-73, 2009.

Gattesco, N., Dudine, A., Effectiveness of a masonry strengthening technique made with a GFRP-mesh-reinforced mortar coating, 8th International Masonry Conference, Dresden, 5-9 July 2010.

D. M. 14/01/2008, Norme tecniche per le costruzioni, (Code for construction), Ministero delle Infrastrutture, Italy.

C. M. LL. PP. 02/02/2009 n. 617, Istruzioni per l'applicazione delle nuove «norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008, (Code for construction), Ministero delle Infrastrutture, Italy.