



# Valutazione della resistenza al taglio di pareti in mattoni: confronto tra criteri di verifica e risultati sperimentali

Luca Albanesi<sup>a</sup>, Paolo Morandi<sup>a</sup>, Guido Magenes<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento Costruzioni e Infrastrutture, Eucentre, Via Ferrata 1, 27100 Pavia, Italy

<sup>b</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia, Via Ferrata 3, 27100 Pavia, Italy

*Keywords: muratura in mattoni; resistenza a taglio; criteri normativi; prove cicliche nel piano*

## ABSTRACT

La recente Circolare applicativa al D.M. 17-01-2018 propone, nel capitolo relativo agli edifici esistenti, diverse formulazioni per il calcolo della resistenza a taglio nel piano di maschi murari non armati. Nel caso di murature esistenti con elementi regolari, quali i mattoni, risultano applicabili entrambe le formulazioni proposte, una basata sulla teoria di Turnšek-Čačovič, l'altra basata sulla teoria di Mann-Müller. Inoltre, nel medesimo capitolo, viene prescritta, indipendentemente dalla tipologia muraria, anche la verifica a taglio secondo la formulazione basata sull'approccio di Mohr-Coulomb, proposta sia dalle vigenti Norme tecniche per le costruzioni (NTC 2018) sia dall'Eurocodice 6 per la verifica delle murature di nuova realizzazione. Risulta quindi evidente che, per la verifica a taglio di pareti in muratura di mattoni, possono essere utilizzati tre differenti criteri di calcolo, che ovviamente potrebbero portare a risultati non sempre in accordo tra loro.

In questo articolo vengono presentati i risultati che scaturiscono dalle diverse espressioni attualmente presenti nella normativa italiana e da altre formulazioni presenti nella letteratura tecnico-scientifica ricavate specificatamente per la valutazione della resistenza delle murature in mattoni. I risultati così ottenuti vengono confrontati con i dati sperimentali ricavati da prove cicliche nel piano di pareti murarie, presenti in un database già disponibile online, al fine di poter valutare l'adeguatezza e l'applicabilità delle diverse formulazioni di resistenza a taglio limitatamente al caso delle murature in mattoni.

## 1 INTRODUZIONE

Studi e confronti tra le varie formulazioni utilizzabili per la valutazione della resistenza a taglio di pareti in muratura non armata sono già presenti da diversi anni in letteratura, ad esempio si ricordino Magenes e Calvi (1997), relativamente alla muratura in mattoni e Tomažević (2009) e Tomažević et al. (2009), relativamente alle murature in blocchi.

L'argomento ritorna ad assumere particolare rilevanza alla luce della recente Circolare applicativa al D.M. 17/01/2018 (indicata nel seguito semplicemente come Circolare) che propone, nel capitolo relativo agli edifici esistenti, diverse formulazioni per il calcolo della resistenza a taglio nel piano di maschi murari non armati. L'applicazione delle espressioni proposte, con le relative limitazioni, che consentono di considerare sia i meccanismi di taglio-scorrimento che quelli di taglio con fessurazione

diagonale, è subordinata all'individuazione della tipologia di tessitura della muratura in esame. Infatti, in presenza di murature a tessitura irregolare (ad esempio murature in pietra non squadrata), la resistenza a taglio per azioni nel piano del pannello può essere associata unicamente alla rottura per "trazione diagonale"; nel caso invece di murature a tessitura regolare, la fessurazione può essere "a scaletta", ossia con andamento diagonale attraverso i giunti di malta (governata quindi dalla crisi dei giunti), oppure diagonale attraverso gli elementi della muratura (governata quindi dalla resistenza degli elementi).

Ne consegue che, nel caso di murature esistenti con elementi regolari, quali ad esempio i mattoni e la pietra squadrata, risultano applicabili entrambe le formulazioni proposte dalla Circolare, sia quella basata sulla teoria di Turnšek-Čačovič che quella basata sulla teoria di Mann-Müller. Inoltre, la stessa Circolare prescrive, anche nel caso di murature esistenti, la medesima verifica a taglio proposta sia dalle vigenti Norme tecniche per le costruzioni

(indicate nel seguito con l'acronimo NTC 2018) sia dall'Eurocodice 6 (CEN, 2005, abbreviato nel seguito come EC6) per la verifica delle murature di nuova realizzazione, ovvero secondo una formulazione basata sull'approccio di Mohr-Coulomb, applicabile indipendentemente dalla tipologia muraria, purché a tessitura regolare.

Risulta quindi evidente che, nello specifico caso delle murature in mattoni, possono essere utilizzati per la verifica a taglio delle pareti tutti questi diversi criteri di calcolo, che, ovviamente, potrebbero portare a risultati non necessariamente in accordo tra loro e talvolta anche difformi dalle risultanze sperimentali.

Inoltre, in letteratura sono disponibili anche ulteriori formulazioni ricavate e validate specificatamente per la valutazione della resistenza a taglio delle murature in mattoni, come ad esempio quelle proposte da Magenes e Calvi (1997).

Nel seguito vengono presentati i risultati che scaturiscono dalle diverse espressioni attualmente presenti nella vigente normativa italiana e da altre formulazioni presenti nella letteratura tecnico-scientifica. I risultati così ottenuti vengono confrontati con i dati sperimentali ricavati da prove cicliche nel piano di pareti murarie, raccolte in un database già disponibile online (Morandi et al. 2018), al fine di poter valutare l'adeguatezza e l'applicabilità delle diverse formulazioni di resistenza a taglio limitatamente al caso delle murature in mattoni.

## 2 FORMULAZIONI DI RESISTENZA

Nei paragrafi successivi sono presentati i diversi criteri per la valutazione della resistenza a taglio di una parete in muratura ordinaria di lunghezza  $l$ , spessore  $t$  e altezza  $h$ , considerando sia meccanismi di taglio-scorrimento che di fessurazione diagonale e riportando anche il criterio per la valutazione della massima forza di taglio orizzontale corrispondente alla rottura di un pannello murario con un meccanismo di pressoflessione/rocking.

### 2.1 Turnšek-Čačovič

Una delle due espressioni proposte dalla Circolare per la verifica a taglio al centro del pannello murario, è basata su un approccio proposto inizialmente da Turnšek e Čačovič (1971) e successivamente esposto in Turnšek e Sheppard (1980), sulla base dei risultati di alcune prove sperimentali. Tale approccio si basa sull'assunzione secondo la quale la rottura per

taglio diagonale si verifichi quando lo sforzo principale al centro del pannello raggiunge un valore critico, definito resistenza a trazione per fessurazione diagonale della muratura.

Questa formulazione, che risulta come già accennato l'unica utilizzabile nel caso di murature con tessitura irregolare, può essere applicata, generalmente in modo cautelativo secondo la Circolare, anche alle murature regolari.

L'espressione, nella forma riportata nel §C8.7.1.3.1.1 della Circolare, risulta essere la seguente:

$$V_t = lt \frac{1.5\tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5\tau_{0d}}} =$$

$$= lt \frac{f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}} \quad (1)$$

dove  $f_{td}$  ( $=1.5\tau_{0d}$ ) rappresenta la resistenza a trazione convenzionale della muratura, che può essere determinata attraverso opportune prove di compressione diagonale assumendo la muratura come un mezzo omogeneo elastico e lineare. Il parametro  $b$ , dipendente dalla snellezza  $h/l$  del pannello, può essere valutato come proposto da Benedetti e Tomažević (1984) e risulta essere sempre compreso tra 1 e 1.5, mentre  $\sigma_0$  rappresenta lo sforzo di compressione verticale medio agente sulla sezione lorda del pannello ( $\sigma_0=N/(t \cdot l)$ , con  $N$  carico verticale).

### 2.2 Mann-Müller

La seconda espressione proposta dalla Circolare per la verifica a taglio al centro del pannello murario, è basata invece sulle teorie elaborate e proposte da Mann e Müller (1982) nel tentativo di formulare una relazione fra stato tensionale locale e globale nella muratura.

Questa formulazione può essere applicata, secondo la Circolare, unicamente alle murature con tessitura regolare e la sua espressione, nella forma riportata nel §C8.7.1.3.1.1 della Circolare, risulta essere la seguente:

$$V_t = \frac{lt}{b} (\tilde{f}_{v0d} + \tilde{\mu}\sigma_0) =$$

$$= \frac{lt}{b} \left( \frac{\tilde{f}_{v0d}}{1 + \mu\phi} + \frac{\mu}{1 + \mu\phi} \sigma_0 \right) \leq V_{t,lim} \quad (2)$$

dove  $\tilde{f}_{v0d}$  e  $\tilde{\mu}$  sono due parametri globali che rappresentano rispettivamente una resistenza equivalente a taglio della muratura e un

coefficiente di attrito equivalente e che sono funzione dei parametri di resistenza locale del giunto (coesione, assunta pari alla resistenza a taglio della muratura in assenza di tensioni normali  $f_{v0}$  e coefficiente d'attrito  $\mu$ ) e della tessitura muraria, attraverso il coefficiente  $\phi$ , definito come rapporto tra l'altezza dell'elemento e la lunghezza di sovrapposizione minima tra elementi di due corsi successivi.

Si noti che  $b$  e  $\sigma_0$  hanno il medesimo significato già spiegato descrivendo l'Equazione 1, mentre il valore limite  $V_{t,lim}$  è funzione della rottura a trazione degli elementi  $f_{bt,d}$  e può essere valutato attraverso l'espressione seguente:

$$V_{t,lim} = \frac{lt f_{bt,d}}{b \cdot 2.3} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{bt,d}}} \quad (3)$$

### 2.3 Mohr-Coulomb

La formulazione di resistenza associata a meccanismi a taglio proposta dalle NTC 2018 (§7.8.2.2.2) e dall'EC6 (§6.2) relativamente agli edifici in muratura di nuova realizzazione, è basata invece su una formulazione Mohr-Coulomb, che risulta essere fisicamente giustificata nei casi di rottura diagonale con fessurazione "a scaletta" nei giunti di malta orizzontali e verticali e che può essere stimata con l'espressione seguente:

$$V_t = f_{vd} l' t \quad (4)$$

in cui  $f_{vd}$  è il valore della resistenza a taglio della muratura, basata sulle tensioni verticali medie sulla porzione di parete compressa, ed  $l'$  è la lunghezza della parte compressa della parete, calcolata assumendo una distribuzione lineare delle tensioni di compressione e trascurando quindi le parti della parete soggette a trazione.

La resistenza al taglio della muratura  $f_{vd}$  può essere valutata dalla seguente espressione:

$$f_{vd} = f_{vd0} + 0.4\sigma_n \leq f_{vd,lim} \quad (5)$$

dove  $f_{vd0}$  è la resistenza a taglio iniziale della muratura in assenza di carichi verticali,  $\sigma_n$  è la tensione di compressione verticale media sulla porzione compressa della parete ( $\sigma_n = N/(t \cdot l')$ , con  $N$  carico verticale), mentre  $f_{vd,lim}$  è un valore limite in funzione della resistenza a compressione verticale media normalizzata dell'elemento ( $f_b$ ) e più precisamente, nel caso di murature esistenti secondo le NTC 2018 e la relativa Circolare:

$$f_{vd,lim} = \frac{0.065 f_b}{0.7} \quad (6)$$

### 2.4 Magenes-Calvi

Basandosi sui risultati di due differenti campagne sperimentali di prove cicliche di compressione-taglio su pareti (Magenes e Calvi 1992, Anthoine et al. 1994) ed in seguito ad analisi numeriche non lineari su modelli ad elementi finiti, Magenes e Calvi (1997) hanno proposto alcune espressioni per il calcolo della resistenza a taglio di pareti in mattoni. Partendo dagli approcci di Mohr-Coulomb e di Mann-Müller, gli autori hanno ricavato delle formulazioni ottimizzate con opportuni parametri correttivi che permettono di tenere in conto l'influenza del fattore di taglio  $\alpha_v$ , definito come rapporto  $M/Vl$ , ovvero  $h_0/l$ , in cui  $M$  e  $V$  sono rispettivamente il momento ed il taglio agente sul pannello, mentre  $h_0$  è la distanza dalla sezione di verifica al punto di flesso. La resistenza a taglio del muro in mattoni viene infatti valutata come valore minimo tra quella corrispondente alla rottura dei giunti ( $V_d$ ) e quella corrispondente alla rottura degli elementi ( $V_{d,b}$ ):

$$V_t = \min(V_d; V_{d,b}) \quad (7)$$

La resistenza dei giunti è a sua volta calcolata come minimo tra quella relativa alla sezione fessurata (derivata dalla formulazione di Mohr-Coulomb) e quella relativa alla sezione lorda (derivata dall'approccio di Mann-Müller) come riportato nelle formule seguenti:

$$V_d = lt \tau_u \quad \text{con} \quad \tau_u = \min(\tau_{cs}; \tau_{ws}) \quad (8)$$

$$\tau_{cs} = \frac{1.5 \tilde{f}_{v0d} + \tilde{\mu} \sigma_0}{1 + 3 \tilde{f}_{v0d} \alpha_v / \sigma_0} \quad \text{sezione fessurata} \quad (9)$$

$$\tau_{ws} = \frac{\tilde{f}_{v0d} + \tilde{\mu} \sigma_0}{1 + \alpha_v} \quad \text{sezione lorda} \quad (10)$$

dove  $\tilde{f}_{v0d}$  e  $\tilde{\mu}$  sono due parametri globali della muratura ricavati a partire dai corrispondenti valori locali come già spiegato a proposito dell'espressione basata su Mann-Müller presente in Circolare ed esplicitati nelle espressioni seguenti:

$$\tilde{f}_{v0d} = \kappa f_{v0d} \quad \text{e} \quad \tilde{\mu} = \kappa \mu \quad (11)$$

$$\kappa = \frac{1}{1 + \mu \phi} \quad (12)$$

Si noti che, come proposto da Magenes e Calvi, nel caso di tessiture murarie con i mattoni disposti di testa e di lato a corsi alterni ("English bond"), la lunghezza di sovrapposizione minima tra elementi di due corsi successivi è stata assunta come media tra i due casi.

Il valore limite relativo alla rottura dei mattoni è invece calcolato come riportato nella seguente espressione, che è esattamente la medesima riportata nell'Equazione 3 a meno del fattore correttivo  $(1 + \alpha_v)$  al posto del parametro  $b$ :

$$V_{d,b} = lt \frac{f_{btd}}{2.3(1 + \alpha_v)} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{btd}}} \quad (13)$$

## 2.5 Pressoflessione/rocking

Il momento ultimo resistente di pareti in muratura ordinaria può essere stimato in base al seguente criterio, riportato anche nelle NTC 2018 al §7.8.2.2.1, che assume la muratura non reagente a trazione ed un diagramma delle compressioni (“stress block”) rettangolare con resistenza a compressione ultima pari a  $0.85f_d$ :

$$M_u = \frac{l^2 t \sigma_0}{2} \left(1 - \frac{\sigma_0}{0.85 f_d}\right) \quad (14)$$

dove  $\sigma_0$  è la tensione normale media, come già spiegato descrivendo l'Equazione 1, e  $f_d$  è la resistenza a compressione della muratura.

Per valutare la resistenza al taglio corrispondente ad una rottura per pressoflessione  $V_f$ , è sufficiente dividere il momento resistente per la distanza dalla sezione di verifica al punto di flesso ( $h_0$ ), dipendente dalle condizioni di vincolo del muro:

$$V_f = \frac{M_u}{h_0} = \frac{l^2 t \sigma_0}{2 h_0} \left(1 - \frac{\sigma_0}{0.85 f_d}\right) \quad (15)$$

## 3 VALIDAZIONE DELLE FORMULAZIONI

### 3.1 Database di prove cicliche

Il database di dati sperimentali utilizzato è quello reso disponibile recentemente da Morandi et al. (2018). Si tratta di una raccolta di risultati di prove cicliche nel piano su pareti in muratura ordinaria, svolte nell'ambito di varie campagne sperimentali in diversi istituti di ricerca in Europa e Stati Uniti; contiene informazioni su prove effettuate su provini costruiti con varie tipologie di mattoni e blocchi, con diverse tipologie di giunti orizzontali e verticali, con differenti dimensioni, carichi applicati e condizioni di vincolo.

Sono state quindi opportunamente filtrate le prove presenti, in modo da considerare, tra tutte, solo quelle relative a murature di mattoni.

Risultano di conseguenza disponibili 32 prove cicliche nel piano su pareti in mattoni, delle quali 30 relative a murature in mattoni in laterizio (“solid clay bricks”, SB-C) e 2 invece relative a mattoni in silicato di calcio (“solid calcium silicate bricks”, SB-CS). Le prove sono effettuate su pareti di altezze differenti e comprendono sia prove su pannelli in scala reale (tra 2.5 e 3 m), sia pannelli di dimensioni ridotte (attorno a 1.5 m), come riassunto in Figura 1. Osservando invece i carichi verticali applicati, si può notare che le prove coprono un intervallo di valori, riportati in Figura 2 in termini di tensioni normalizzate ( $\sigma_0/f_d$ ), sufficientemente ampio da comprendere le tensioni medie agenti sulle pareti in buona parte degli edifici reali di altezza e destinazioni d'uso più comuni.

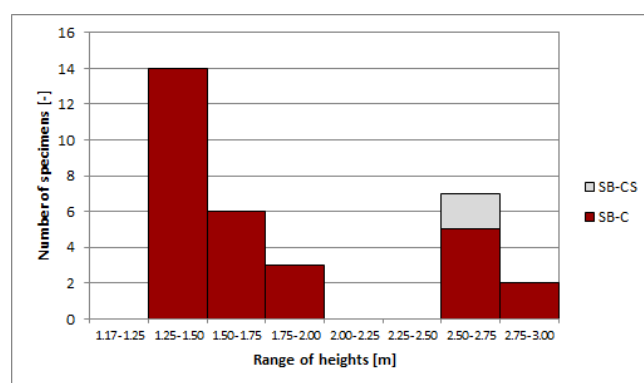


Figura 1. Numero di provini a diversi intervalli di altezza del muro ( $x_{inf} < x \leq x_{sup}$ ).

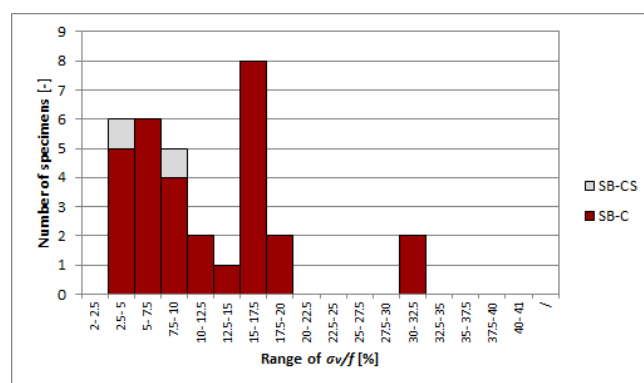


Figura 2. Numero di provini a diversi intervalli di  $\sigma_0/f_d$  ( $x_{inf} < x \leq x_{sup}$ ).

Per quanto riguarda infine le condizioni di vincolo dei provini testati sperimentalmente, ovvero lo schema statico assunto durante le prove cicliche, si può osservare che risulta una suddivisione più o meno equa tra pareti testate in condizioni di doppio incastro (“double-fixed”), ovvero senza rotazione del cordolo in sommità, e pareti con configurazione a mensola (“cantilever”), ovvero con il cordolo sommitale libero di ruotare, con una leggera predominanza di questa seconda categoria, come mostrato in Figura 3. Tale informazione è importante sia per la scelta del valore di  $h_0$  da utilizzare nei calcoli in alcune



delle formulazioni proposte, pari a metà altezza del muro nel caso di doppio incastro e pari all'intera altezza nel caso di mensola, sia per l'individuazione delle corrette sezioni di verifica lungo l'altezza della parete. Infatti, mentre alcune espressioni, quali ad esempio quella di Turnšek-Čačovič (Equazione 1), quelle di Mann-Müller (Equazioni 2 e 3) o quelle da esse derivate (Equazioni 10 e 13), si applicano comunque al centro del pannello, altre espressioni quali quella di Mohr-Coulomb (Equazione 4), quelle da essa derivate (Equazione 9) e quella relativa a meccanismi di rocking (Equazione 15), sono state applicate in sezioni differenti a seconda dello schema statico: più precisamente in sommità (a favore di sicurezza) nel caso di configurazioni a doppio incastro e alla base nel caso di configurazioni a mensola, con conseguente variazione del carico verticale considerato.

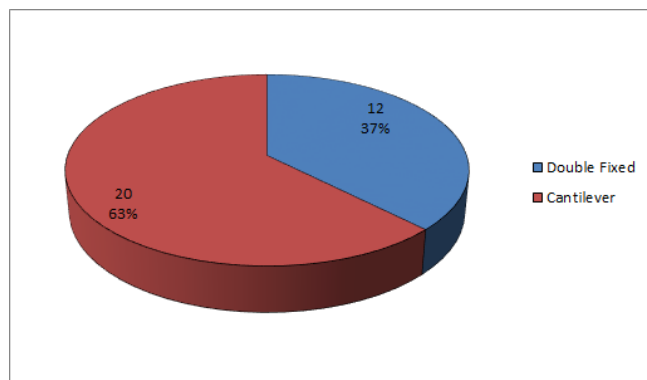


Figura 3. Composizione del campione considerato in termini di condizioni di vincolo.

### 3.2 Confronti con i dati sperimentali

Come già accennato in precedenza, sono stati valutati, per i 32 provini in murature di mattoni estratti dal database, i valori di taglio resistente applicando tutte le diverse formulazioni descritte nel capitolo 2; il calcolo è stato ovviamente effettuato considerando le corrispondenti caratteristiche geometriche e condizioni di vincolo e di carico di ciascun provino ed utilizzando solamente le proprietà meccaniche delle murature ricavate dalle prove di caratterizzazione condotte. Le resistenze così ottenute sono state quindi confrontate con i risultati sperimentali effettivamente ottenuti nelle prove cicliche nel piano, al fine di poter valutare, limitatamente al caso delle murature in mattoni, l'adeguatezza e l'applicabilità delle diverse formulazioni di resistenza a taglio.

I grafici di confronto sono riportati in termini di rapporto tra resistenza a taglio calcolata ( $V_i$ ) e sperimentale ( $V_{max,exp}$ ); se tale rapporto, espresso in percentuale, risulta pari al 100%, significa che si ha perfetta coerenza tra la resistenza stimata e

quella sperimentale, mentre risultati maggiori o minori, indicano previsioni rispettivamente a sfavore o a favore di sicurezza.

A tal riguardo, è importante chiarire che, nonostante ognuna delle formulazioni possa essere teoricamente utilizzata per tutti i provini, il confronto tra valori calcolati e risultati sperimentali è rilevante solo se i meccanismi di rottura effettivamente avvenuti sono compatibili con le ipotesi dei vari approcci. Di conseguenza, anche se nei grafici, per completezza, compaiono tutti i valori effettivamente calcolabili con ciascuna espressione, suddivisi per meccanismo di rottura rilevato sperimentalmente, le formulazioni a taglio sono state confrontate solo con i muri caratterizzati da rotture per taglio, mentre la formulazione a pressoflessione con i provini con comportamento a pressoflessione/rocking o con meccanismi ibridi che coinvolgono la flessione.

Inoltre, per una completa comprensione dei grafici ai paragrafi seguenti, bisogna precisare che diversi criteri (ovvero quello di Mann-Müller, quello basato su Mohr-Coulomb e quello proposto da Mages e Calvi) sono composti da due espressioni, che devono risultare entrambe applicabili; quando ad essere limitante è il valore minimo associato alla rottura del mattone (Equazioni 3, 6 e 13), nel grafico compare l'indicazione (LIM) vicino al numero, se invece è dominante la rottura dei giunti (Equazioni 2, 5 e 8) non compare alcuna indicazione. Nei casi in cui risulti applicabile solo una delle due espressioni, per mancanza di una o più caratteristiche meccaniche della muratura (ovvero se non sono state condotte le prove di caratterizzazione necessarie per ricavarle), i risultati non sono stati inseriti.

Come misura dell'errore e quindi della precisione della stima effettuata con le varie formule di resistenza, è stata considerata la media dei valori assoluti degli scostamenti dal 100%. In questo modo non si riesce però a differenziare se l'errore risulta a favore o a sfavore di sicurezza, fattore che va comunque tenuto in considerazione, poiché formulazioni con errori eventualmente più elevati ma che risultano essere, nella maggior parte dei provini, a favore di sicurezza, possono essere considerate comunque accettabili e, soprattutto in ambito normativo, preferibili rispetto ad altre con errori inferiori ma a sfavore di sicurezza.

#### 3.2.1 Turnšek-Čačovič

I risultati del confronto effettuato utilizzando l'espressione di Turnšek-Čačovič, riportati in Figura 4, mostrano un buon accordo tra i calcoli

( $V_{t,TC}$ ) e i dati sperimentali; nel caso di provini caratterizzati da rotture per taglio, in particolare, si può notare che l'Equazione 1 fornisce una stima con un errore medio del 14% a favore di sicurezza. È necessario però sottolineare che purtroppo le prove considerate in questo confronto sono solo due, le uniche tra quelle rotte per taglio per le quali è disponibile un valore di resistenza a trazione della muratura e per le quali è quindi applicabile la formulazione.

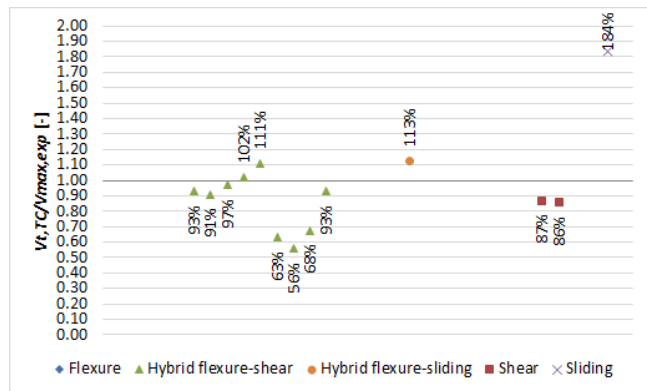


Figura 4. Rapporti tra i valori calcolati con Turnšek-Čačovič ( $V_{t,TC}$ ) e i risultati sperimentali ( $V_{max,exp}$ ).

### 3.2.2 Mann-Müller

Anche nel caso delle espressioni di Mann-Müller, i rapporti, riportati in Figura 5, mostrano uno scarto non eccessivo tra i valori ottenuti dai calcoli ( $V_{t,MM}$ ) e i risultati sperimentali; nello specifico, limitando lo studio ai soli provini caratterizzati da rotture per taglio, si può notare che l'Equazione 2, applicata insieme alla sua limitazione (Equazione 3), forniscono una stima con un errore medio ancora pari al 14%, ma in questo caso quasi sempre a sfavore di sicurezza, con alcune resistenze sovrastimate anche del 20-30% o più.

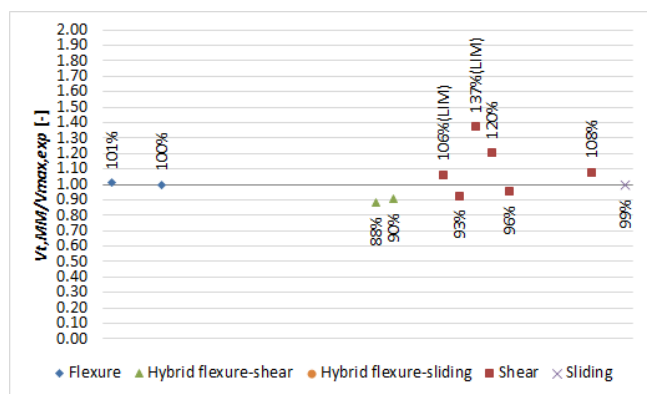


Figura 5. Rapporti tra i valori calcolati con Mann-Müller ( $V_{t,MM}$ ) e i risultati sperimentali ( $V_{max,exp}$ ).

### 3.2.3 Mohr-Coulomb

Passando invece alla sola formulazione basata su Mohr-Coulomb con l'aggiunta, proposta dalla normativa, della limitazione sulla rottura dell'elemento (Equazioni 4, 5 e 6), si può

osservare che i risultati, riportati in Figura 6, sembrerebbero essere generalmente a favore di sicurezza, con uno scarto tra valori calcolati ( $V_{t,MC}$ ) e risultati sperimentali mediamente del 15%, sempre considerando unicamente i provini caratterizzati da rotture per taglio; anche in questo caso però, come già evidenziato per la formulazione di Mann-Müller, alcune resistenze risultano essere fortemente sovrastimate e quindi a sfavore di sicurezza.

La parete che ha evidenziato una rottura sperimentale per scorrimento alla base viene invece stimata con una maggiore approssimazione (24%) ma a favore di sicurezza.

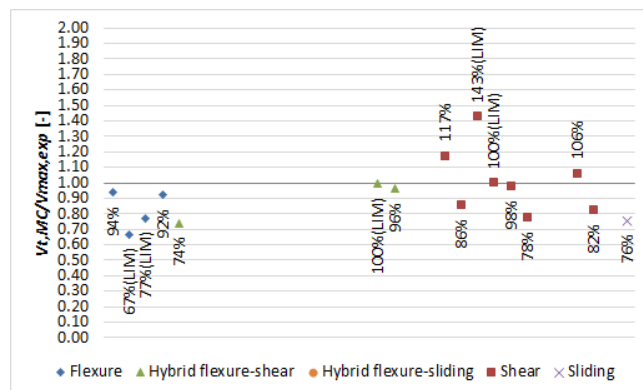


Figura 6. Rapporti tra i valori calcolati con Mohr-Coulomb ( $V_{t,MC}$ ) e i risultati sperimentali ( $V_{max,exp}$ ).

### 3.2.4 Magenes-Calvi

I risultati ottenuti applicando l'approccio proposto da Magenes e Calvi, riportati in Figura 7, presentano rapporti inferiori a quelli ottenuti utilizzando le formulazioni di Mann-Müller e di Mohr-Coulomb, come prevedibile, essendo le Equazioni 9, 10 e 13 ricavate direttamente da quelle originali mediante l'inserimento di opportuni coefficienti riduttivi. Di conseguenza, se si considerano, anche in questo caso, i provini caratterizzati da rotture per taglio, si ottengono, dai calcoli, valori di resistenza ( $V_{t,Mag}$ ) praticamente sempre a favore di sicurezza, con uno scarto medio pari al 17%, leggermente superiore a quello ottenuto con gli altri approcci già citati.

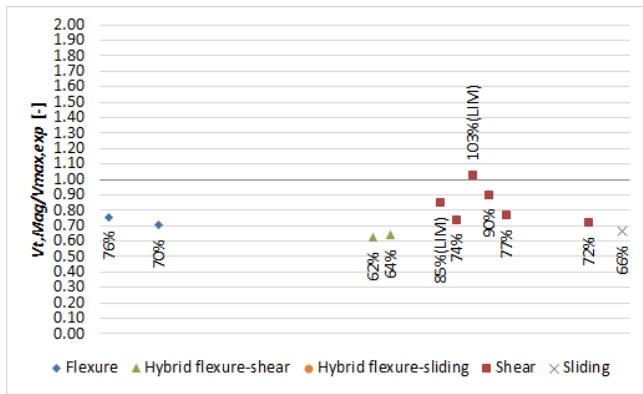


Figura 7. Rapporti tra i valori calcolati con Magenes-Calvi ( $V_{t, Mag}$ ) e i risultati sperimentali ( $V_{max, exp}$ ).

### 3.2.5 Pressoflessione/rocking

Il criterio proposto dalle NTC 2018 per il calcolo del momento ultimo (Equazione 14), ed il relativo valore di resistenza a taglio corrispondente ad una rottura per pressoflessione (Equazione 15), si dimostrano affidabili, fornendo, nel caso di pareti che sperimentalmente hanno mostrato un comportamento a pressoflessione/rocking, risultati sempre a favore di sicurezza con un errore medio del 18%. È molto interessante notare che uno scarto ancora più ridotto (14%) si ottiene considerando i provini che hanno manifestato un comportamento ibrido, a flessione-taglio o a flessione scorrimento, quasi sempre a favore di sicurezza, come evidente in Figura 8, se si escludono un paio di valori che sovrastimano leggermente la resistenza.

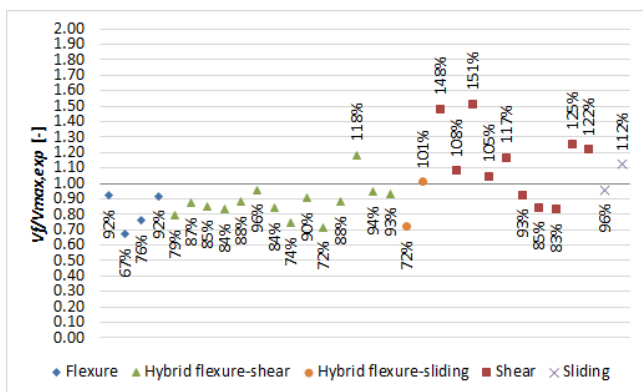


Figura 8. Rapporti tra i valori calcolati con la formula per pressoflessione ( $V_j$ ) e i risultati sperimentali ( $V_{max, exp}$ ).

### 3.3 Applicabilità ai casi reali

Per poter dare un giudizio sull'adeguatezza delle diverse formulazioni non si può prescindere da alcune valutazioni circa la loro applicabilità in casi reali, soprattutto nel caso degli edifici esistenti, a maggior ragione considerando che ad essi è dedicato il capitolo di Circolare nel quale

vengono proposte le formule approfondite in questo articolo.

Innanzitutto è importante evidenziare che la valutazione di alcune proprietà meccaniche della muratura, necessarie per la corretta applicazione delle diverse espressioni per il calcolo della resistenza a taglio, può presentare delle difficoltà, soprattutto quando si devono effettuare prove in-situ. È il caso, ad esempio, della prova a compressione diagonale per la valutazione della resistenza a trazione della muratura, indispensabile se si vuole utilizzare la formulazione basata sull'approccio di Turnšek e Čačovič. Tale prova risulta essere di non facile realizzazione sia perché fortemente invasiva (è una prova distruttiva), sia perché i risultati possono essere seriamente influenzati, se non resi addirittura inutilizzabili, dalla scarsa qualità dei giunti di malta, in particolare nel caso di murature di mattoni con giunti deboli; in questo caso, infatti, la compressione diagonale potrebbe portare ad una rottura a scaletta nei giunti e non ad una rottura negli elementi e, di conseguenza, a valori di resistenza molto bassi oltre che inutilizzabili nella formulazione di Turnšek e Čačovič.

Di più facile realizzazione risultano essere invece, nel caso di murature regolari, le prove per la valutazione dei parametri necessari per l'applicazione delle altre formulazioni a taglio, ovvero coesione e coefficiente di attrito nei giunti, ricavabili in-situ ad esempio mediante "shove test" (Graziotti et al., 2018), e resistenza a compressione e a trazione del mattone, ricavabili mediante estrazione e successive prove rispettivamente a compressione e a flessione o "splitting".

Inoltre, si noti che in presenza di murature esistenti, può risultare complessa anche la valutazione delle caratteristiche geometriche da utilizzare nei calcoli; ad esempio, può non essere immediata l'individuazione di una tessitura uniforme della muratura, necessaria per il passaggio dai parametri meccanici locali a quelli globali nel caso si vogliano utilizzare espressioni ricavate a partire dalle teorie di Mann e Müller.

Infine, volendo verificare la richiesta della Circolare che prevede, nella parte relativa agli edifici esistenti, la contemporanea applicazione del medesimo criterio utilizzato per le murature di nuova realizzazione insieme ad una delle altre due formulazioni presentate al §C8.7.1.3.1.1, è stata valutata la resistenza a taglio nel caso in cui vengano applicate contemporaneamente le espressioni basate su Mohr-Coulomb, comprensive della limitazione, e quelle di Mann-

Müller, considerando solo i provini per i quali siano entrambe calcolabili e prendendo come risultato il più sfavorevole ( $V_{t,Circ}$ ) tra quelli calcolati con entrambi i criteri. I risultati, riportati in Figura 9, mostrano un miglioramento della stima rispetto all'applicazione delle due formulazioni separatamente, con un errore medio che scende al 13% e nella maggior parte dei casi a favore di sicurezza, nonostante continuo però ad essere presenti provini con una sovrastima, anche marcata, della resistenza, quindi a sfavore di sicurezza. Non è stato invece possibile effettuare lo stesso controllo considerando le espressioni di Mohr-Coulomb e Turnšek-Čačovič in quanto non sono presenti casi in cui le due formulazioni siano contemporaneamente applicabili.

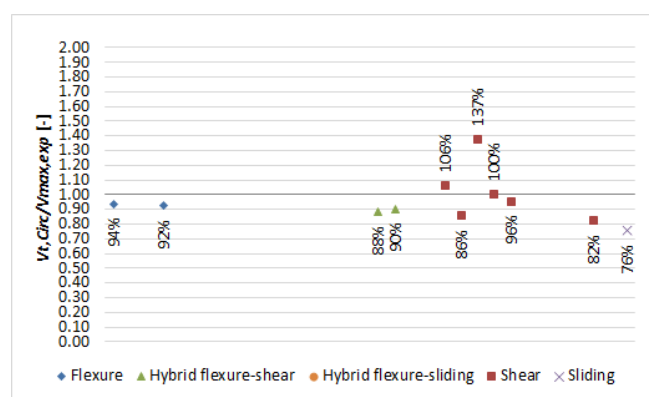


Figura 9. Rapporti tra i valori calcolati applicando la Circolare ( $V_{t,Circ}$ ) e i risultati sperimentali ( $V_{max,exp}$ ).

#### 4 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo articolo sono stati presentati i risultati che scaturiscono dalle diverse espressioni per il calcolo della resistenza a taglio nel piano di maschi murari non armati presenti nella recente Circolare applicativa al D.M. 17/01/2018 e da altre formulazioni presenti nella letteratura tecnico-scientifica. Le resistenze ottenute dai calcoli sono state confrontate con i risultati sperimentali ricavati da prove cicliche nel piano di pareti murarie, raccolte in un database già disponibile online, al fine di poter valutare l'adeguatezza e l'applicabilità delle diverse formulazioni di resistenza a taglio limitatamente al caso delle murature in mattoni.

Dai confronti è emerso che, nel caso di pareti soggette a rotture per taglio, l'approccio proposto da Magenes e Calvi (ovvero un'ottimizzazione delle formulazioni di Mohr-Coulomb e Mann-Müller) sembra essere il migliore, in quanto sufficientemente affidabile, con un errore medio limitato e stime sempre a favore di sicurezza; si

potrebbe quindi valutare un inserimento di questo approccio in ambito normativo, eventualmente in seguito ad ulteriori studi sui fattori correttivi proposti. Tra l'altro questo approccio è per certi versi in linea con quello attualmente proposto in Circolare, nel caso in cui si considerino e si applichino contemporaneamente il medesimo criterio utilizzato per le murature di nuova realizzazione, basato su Mohr-Coulomb, e le espressioni di Mann-Müller, ma conduce a risultati più indicati ad essere utilizzati a livello normativo, in quanto sufficientemente a favore di sicurezza, grazie ai fattori correttivi introdotti rispetto alle formulazioni originali.

In alternativa alle formulazioni di Mann-Müller, la Circolare consente di utilizzare, anche per le murature di mattoni, l'approccio di Turnšek-Čačovič; le resistenze così calcolate sembrerebbero in buon accordo con i risultati sperimentali su pareti rotte per taglio, ma i pochi casi nei quali questo metodo risulta applicabile e soprattutto l'impossibilità di verificare la proposta della Circolare, considerando le espressioni basate su Mohr-Coulomb e Turnšek-Čačovič, in quanto non sono presenti casi in cui le due formulazioni siano contemporaneamente applicabili, impediscono giudizi più approfonditi. Inoltre, in considerazione delle difficoltà di applicazione di questo criterio, soprattutto nel caso di murature esistenti di mattoni con giunti deboli, per le quali la corretta realizzazione delle necessarie prove di compressione diagonale in-situ risulterebbe quasi impossibile, si potrebbe pensare di mantenere questa formulazione per le murature irregolari, per le quali è l'unica applicabile, lasciando per le murature regolari solo formulazioni che necessitano di prove in-situ di più facile realizzazione.

La formulazione basata su Mohr-Coulomb, con la relativa limitazione sulle resistenze degli elementi, e quella di Mann-Müller non sembrano fornire risultati altrettanto promettenti, senza correzioni, per le murature in mattoni, in quanto in generale meno conservative. Queste espressioni, in particolare quella di Mohr-Coulomb, sono decisamente più affidabili per la stima della resistenza a taglio di murature in blocchi di muratura moderna (anche esistenti), come dimostrato da Morandi et al. 2019.

Infine, l'espressione per il calcolo della resistenza a taglio corrispondente ad una rottura per pressoflessione, oltre ad essere affidabile nel caso di meccanismi di "rocking", si può probabilmente estendere a favore di sicurezza e con buona approssimazione anche per la stima di pannelli che evidenziano meccanismi/rotture ibride che coinvolgano la flessione.



Come sviluppo futuro, sarebbe ovviamente utile applicare i criteri qui definiti su numero maggiore di prove sperimentali, al fine di validare in maniera più efficace i risultati ottenuti. Allo stato attuale, non sono presenti nel database un numero elevato di prove utilizzabili su pareti in mattoni e, soprattutto, poche sulle quali si possano applicare più criteri e avere quindi un confronto diretto tra le varie formulazioni. Per ogni prova servirebbero infatti tutte le caratteristiche meccaniche necessarie per l'applicazione delle diverse espressioni, visto che in questa validazione nessun parametro è stato stimato, così da non introdurre altre incertezze oltre a quelle dovute ai risultati sperimentali; a livello normativo, il metodo qui utilizzato è paragonabile alla situazione di una verifica di una parete esistente ipotizzando un livello di conoscenza di tipo "LC3".

In presenza di un numero sufficiente di dati sperimentali e se venissero confermate le prime indicazioni emerse dai confronti fin qui effettuati, si potrebbe procedere con alcune proposte di miglioramento delle attuali indicazioni normative, nell'ambito del calcolo delle resistenze delle pareti in muratura ordinaria di mattoni.

## BIBLIOGRAFIA

- Anthoine, A., Magenes, G., Magonette, G., 1994. Shear-compression testing and analysis of brick masonry walls. *Proc. of the 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, 1657-1662.
- Benedetti, D., Tomaževič, M., 1984. Sulla verifica sismica di costruzioni in muratura. *Ingegneria Sismica*, **I**, 9-16.
- CEN, 2005. Eurocode 6 - Design of masonry structures, Part 1-1: Common rules for reinforced and unreinforced masonry structures. EN 1996-1-1:2005, Brussels, Belgium.
- Circolare 21/01/2019 n.7 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2019. Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni", Gazzetta Ufficiale n.35 del 11/02/2019, Supplemento ordinario n.5.
- D.M. 17/01/2018, 2018. Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018), Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20/02/2018, Supplemento ordinario n.8.
- Graziotti, F., Guerrini, G., Rossi, A., Andreotti, G., Magenes, G., 2018. Proposal for an improved procedure and interpretation of ASTM C1531 for the in situ determination of brick-masonry shear strength. In *Masonry 2018*, ed. N. Krogstad and W. McGinley (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018), 13-33.
- Magenes, G., Calvi, G.M., 1992. Cyclic behaviour of brick masonry walls. *Proc. of the 10<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, 3517-3522.
- Magenes, G., Calvi, G.M., 1997. In-plane seismic response of brick masonry walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**, 1091-1112.
- Mann, W., Müller, H., 1982. Failure of shear-stressed masonry – An enlarged theory, tests and application to shear walls. *Proc. British Ceramic Society*, **30**.
- Morandi, P., Albanesi, L., Graziotti, F., Li Piani, T., Penna, A., Magenes, G., 2018. Development of a dataset on the in-plane experimental response of URM piers with bricks and blocks. *Construction and Building Materials*, **190**, 593–611.
- Morandi, P., Albanesi, L., Magenes, G., 2019. In-plane cyclic response of new urm systems with thin web and shell clay units. *Journal of Earthquake Engineering*, DOI:10.1080/13632469.2019.1586801.
- Tomaževič, M., 2009. Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6: shear versus tensile strength of masonry. *Materials and Structures*, **42**, 889–907.
- Tomaževič, M., Gams, M., Lu, S., 2009. Modelling of shear failure mechanism of masonry walls. *11<sup>th</sup> Canadian Masonry Symposium*, May 31-June 3, Toronto, Canada.
- Turnšek, V., Čačovič, F., 1971. Some experimental results on the strength of brick masonry walls. *Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Brick Masonry Conference*, Stoke-on-Trent, 149-156.
- Turnšek, V., Sheppard, P., 1980. The shear and flexural resistance of masonry walls. *Proc. of the International Research Conference on Earthquake Engineering*, Skopje, 517-573.