



La Stima dei Moduli Elastici delle Murature Secondo le Norme Tecniche: il Confronto con la Sperimentazione

Liborio Cavaleri, Fabio Di Trapani, Giuseppe Macaluso e Maurizio Papia
 Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale, Università di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo.

Parole chiave: Muratura, Modulo di elasticità longitudinale, Modulo di elasticità tangenziale, DM 14/01/2008, EC6.

SOMMARIO

Nel presente lavoro viene proposto uno studio sperimentale per la caratterizzazione meccanica di diverse tipologie di muratura. Vengono in particolare valutati i moduli elastici longitudinali e tangenziali che come è noto condizionano la risposta di sistemi murari sotto carichi laterali. I valori sperimentali sono confrontati con quelli stimabili per mezzo dei modelli proposti dalle normative tecniche italiana (DM 14/01/2008) e europea (Eurocodice 6). Lo studio prende spunto dalla *questio* posta dalla norma americana (MSJC 2008) che, pur proponendo l'uso di tali modelli, riconosce la poca sperimentazione eseguita a supporto della loro validazione. La campagna sperimentale ha incluso prove di compressione sui componenti (malte e blocchi), prove di compressione diagonale e prove di compressione ordinaria (in direzione ortogonale ai letti di malta) su porzioni di muratura. I risultati conseguiti hanno consentito la valutazione diretta dei moduli elastici e successivamente di ottenere le grandezze meccaniche necessarie per l'utilizzo dei succitati modelli normativi.

1 INTRODUZIONE

L'affidabilità e la precisione conseguibili nella caratterizzazione meccanica dei materiali rivestono un ruolo di fondamentale importanza nella valutazione della sicurezza strutturale, cosicché l'approccio sperimentale per la validazione di adeguati modelli di calcolo risulta essenziale per la proposta di criteri di resistenza utilizzabili nelle pratiche applicazioni.

Nel campo delle strutture murarie, tuttavia, la determinazione delle proprietà meccaniche per via sperimentale risulta spesso non facile, sia perchè per conseguire risultati significativi è necessario utilizzare campioni di dimensioni tali da risultare effettivamente rappresentativi della muratura stessa, sia per la notevole eterogeneità dei materiali componenti.

D'altra parte questa eterogeneità rende difficilmente generalizzabili i risultati di una specifica campagna di prove, essendo poco affidabili le classificazioni tipologico-meccaniche

basate sulla semplice descrizione delle malte e degli elementi resistenti.

Le norme tecniche tengono conto di queste difficoltà proponendo strategie di stima delle caratteristiche meccaniche delle murature basate sulla conoscenza delle caratteristiche meccaniche dei suoi componenti.

Tali approcci riscuotono un certo successo, come confermato dai lavori di Colville et al. (1993), Bosiljkov et al (2005), Atkinson (1990), Knutson (1993) e altri ancora.

Occorre tuttavia osservare che, talvolta, gli approcci proposti dalle normative appaiono poco convincenti. Può ad esempio eccepirsi che, sebbene la muratura sia notoriamente un materiale non omogeneo e non isotropo, le norme assumono comunemente, per la stima dei moduli di elasticità tangenziale, l'ipotesi di omogeneità e isotropia per il materiale.

Una tale posizione, che può essere realistica nel caso in cui gli elementi resistenti abbiano simile comportamento lungo le due direzioni principali, cade in difetto per tutti i casi in cui essi

sono costituiti da blocchi artificiali forati, largamente utilizzati nelle applicazioni pratiche.

Altra assunzione discutibile, e comunque suggerita dalle norme, consiste nel correlare la resistenza a taglio della muratura alla resistenza a compressione della malta e dei blocchi nella direzione dei carichi verticali, non considerando la resistenza nella direzione ortogonale.

Diversi autori si sono dedicati allo studio del comportamento meccanico delle murature sottoposte ad azioni di compressione o azioni taglianti (Capozucca et al. 2001), (Mohamad et al. 2007), (Cantù et al. 1982), (Drysdale et al. 1984), (Brown et al. 1999), (Cheema et al. 1986). Tuttavia per diverse tipologie di muratura il rapporto fra le proprietà meccaniche sperimentali e quelle ottenibili con i modelli proposti dai codici normativi sembrano necessitare di ulteriori approfondimenti.

Nel caso della norma americana MSJC, è la norma stessa a mettere in risalto alcune incongruenze, in particolare riferendosi alla correlazione, da essa suggerita, tra modulo di elasticità longitudinale e tangenziale.

Per far luce sulla validità e sulla affidabilità di alcuni approcci proposti dalle normative tecniche attuali è stata effettuata un'indagine sperimentale su diverse tipologie di muratura, selezionate fra quelle a maggiore diffusione sul territorio nazionale come di seguito descritto.

I valori sperimentali ricavati sono stati confrontati con le corrispondenti quantità dedotte impiegando i modelli analitici proposti dalla normativa italiana (D.M. 14/01/2008) ed europea (Eurocodice 6).

L'attenzione è stata focalizzata sul modulo elastico longitudinale E ed il modulo elastico tangenziale G che giocano un ruolo chiave nelle verifiche sismiche, in quanto su di essi si basa la valutazione della rigidezza laterale dei maschi murari.

Lo studio qui illustrato estende quello riportato in Cavaleri et al. (2006), dove è considerata una sola tipologia di muratura. Esso intende fornire un ulteriore contributo alla problematica trattata, ma, evidentemente, non consente di dedurre una risposta definitiva al problema della attendibilità dei modelli di previsione normativi

2 TIPOLOGIE DI MURATURA STUDIAE E CAMPAGNA SPERIMENTALE

Sono state condotte prove su quattro differenti tipologie di muratura realizzate con: blocchi di laterizio forato, blocchi di calcarenite assemblati con malte di due diverse classi di resistenza,

blocchi di calcestruzzo alleggerito.

Preliminarmente sono state condotte prove sui componenti (prove di compressione sugli elementi resistenti nella direzione dei carichi verticali e prove di compressione sulle malte).

In Fig. 1 sono riportate le caratteristiche geometriche dei blocchi impiegati per ciascuna delle tipologie murarie sperimentate.

Sono stati quindi confezionati i campioni di muratura che sono stati poi testati mediante prove di compressione diagonale e prove di compressione ordinaria (in direzione ortogonale ai letti di malta).

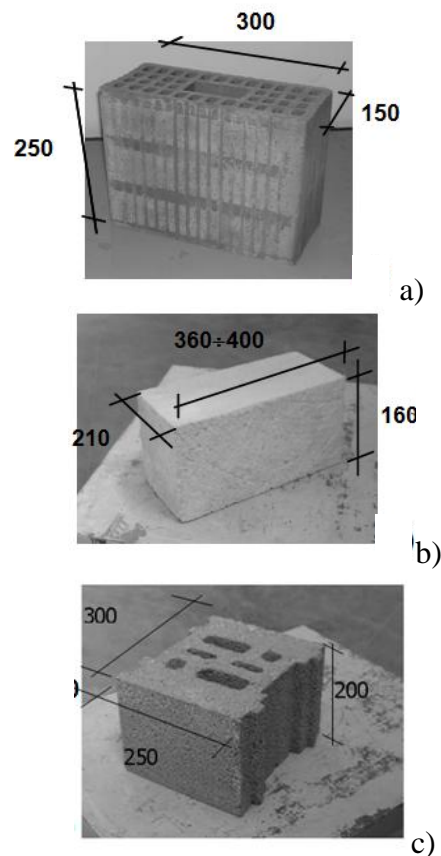


Figura 1. Blocchi impiegati per il confezionamento dei campioni, (dimensioni in mm): a) in laterizio forato; b) in calcarenite; c) in calcestruzzo alleggerito.

2.1 Campioni di muratura in blocchi di laterizio forato

I blocchi sono stati assemblati in maniera da ottenere campioni quanto più possibile rappresentativi del comportamento complessivo della muratura. L'asse dei fori è stato disposto ortogonalmente ai letti di malta.

Per le prove di compressione ordinaria sono stati realizzati campioni di due differenti dimensioni: n. 3 a 3 filari con dimensioni 150x780x780 mm e n. 3 a 5 filari aventi dimensioni 150x900x1280.

La malta impiegata per la costruzione dei campioni, a cui si è assegnata la sigla ML, è stata confezionata con parti in volume pari a 1.5 di cemento Portland, 1 di calce idrata, 5 di sabbia e rapporto acqua/legante pari a 0.5.

Per le prove diagonali i campioni sono stati realizzati disponendo i blocchi su 3 filari con dimensioni complessive di 150x780x780 mm.

Ai fini della verifica dell'influenza della distribuzione delle tensioni sull'area di carico, si è scelto di realizzare 2 serie di campioni, caratterizzate da una diversa distribuzione dei giunti di malta verticali.

Un gruppo di 5 campioni (Serie A), è stato confezionato con distribuzione simmetrica dei giunti, mentre un secondo gruppo (Serie B) con distribuzione dissimmetrica.

Tale scelta si è perseguita considerando il fatto che una differente distribuzione dei giunti e quindi dei blocchi, genera una differente superficie di contatto tra il supporto di applicazione del carico e il campione stesso e ha come effetto una diversa distribuzione tensionale, che potrebbe influenzare la risposta del campione.

Per la realizzazione di tutti i campioni, sono stati eseguiti giunti di malta di spessore nominale pari a 10 mm.

2.2 *Campioni di muratura in blocchi di calcarenite*

Per questo tipo di muratura, largamente diffusa nei paesi mediterranei, si è scelto di assemblare i blocchi con due diverse tipologie di malta. La prima tipologia, a cui si è assegnata la sigla MD, ed avente resistenza inferiore rispetto alla seconda, è stata confezionata con parti in volume pari a 0.5 di cemento Portland, 1 di calce idrata, 5 di sabbia e con un rapporto acqua/legante pari a 0.5.

La seconda tipologia, a cui si è assegnata la sigla MR, è stata confezionata con 1 volume di cemento Portland, 1 di calce idrata, 5 di sabbia e con un rapporto acqua/legante pari a 0.5.

Per le prove di compressione ordinaria sono stati realizzati 6 campioni a 3 filari con dimensioni 210x360x520 mm (3 confezionati con malta MD e 3 con malta MR). Si sono inoltre realizzati ulteriori campioni a 5 filari di dimensioni 210x730x850 mm assemblati con malta MD al fine di verificare la presenza di possibili effetti di scala.

Per le prove di compressione diagonale sono stati confezionati 6 campioni aventi dimensioni 210x810x850 mm a 5 filari di cui, anche in questo caso, 3 confezionati con malta MD e 3 con malta MR.

2.3 *Campioni di muratura in blocchi di calcestruzzo alleggerito*

Sia per le prove di compressione diagonale che per le prove di compressione ordinaria sono stati confezionati per questo tipo di muratura campioni a 3 filari aventi dimensioni nominali 300x640x640 mm con malta di caratteristiche uguali a quelle dei campioni in muratura di laterizio forato. I campioni sono stati realizzati disponendo i blocchi con l'asse dei fori lungo la direzione dei carichi verticali. Anche in questo caso è stato impiegato uno spessore nominale dei giunti di malta orizzontali pari a 10 mm.

2.4 *Procedure di prova e valutazione sperimentale delle caratteristiche meccaniche*

Le prove di compressione diagonale sono state eseguite interponendo i campioni fra due supporti in acciaio, appositamente realizzati per essere posti in contatto con i piatti della macchina di prova (Fig. 2). Le superfici di contatto tra i supporti di acciaio e il campione sono state realizzate con dimensioni tali da evitare fenomeni di confinamento e in modo da prevenire possibili collassi locali dei blocchi d'angolo.

Le prove sono state condotte in controllo di spostamento e interrotte al raggiungimento di un elevato livello di danneggiamento nel campione.

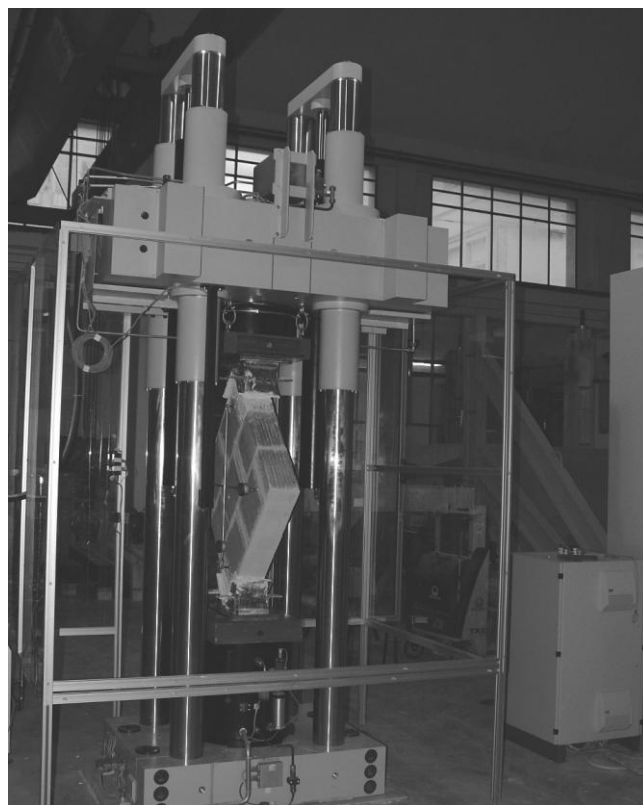


Figura 2. Campione posto all'interno della macchina di prova e soggetto a compressione diagonale.

Le deformazioni del pannello sono state misurate lungo le diagonali con una base di lettura di lunghezza d (diagonale del rettangolo di dimensioni a e b ottenuto scalando le dimensioni A e B del campione).

Tali misurazioni sono state eseguite disponendo 4 comparatori millesimali digitali, 2 per ogni faccia del campione.

Gli scorrimenti γ sono stati calcolati in funzione delle elongazioni medie assolute, δh e δv , misurate lungo le diagonali (Fig. 3).

Lo scorrimento totale γ può essere ottenuto come somma di due contributi: il primo dipendente dall'accorciamento δv della prima diagonale (parallela alla verticale); il secondo dipendente dall'allungamento δh della seconda diagonale.

Pertanto per γ è possibile ottenere la seguente espressione:

$$\gamma = \frac{1}{2b}(\delta v + \delta h) \operatorname{sen} \alpha + \frac{1}{2a}(\delta v + \delta h) \operatorname{cos} \alpha \quad (1)$$

dove α è l'angolo compreso tra il lato di lunghezza b e la diagonale verticale di lunghezza d del rettangolo di misura.

Se si considera che

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{a}{d}; \operatorname{cos} \alpha = \frac{b}{d} \quad (2)$$

l'Eq. (1) diventa

$$\gamma = \frac{\delta h + \delta v}{2} \frac{d}{ab} \quad (3)$$

L'Eq. (3), nel caso di campioni di forma quadrata, si semplifica ulteriormente nella

$$\gamma = \frac{\delta h + \delta v}{d} \quad (4)$$

essendo $a=b$ e $d=a\sqrt{2}$.

Le tensioni tangenziali medie τ_1 e τ_2 risultanti dalle componenti $P \operatorname{sen} \alpha$ e $P \operatorname{cos} \alpha$ del carico diagonale P lungo i lati del campione valgono

$$\tau_1 = \frac{P \operatorname{sen} \alpha}{A t}; \tau_2 = \frac{P \operatorname{cos} \alpha}{B t} \quad (5)$$

dove t è lo spessore del campione e A e B le dimensioni dello stesso.

Le tensioni tangenziali medie ottenute dalle Eq. (5) sono calcolate con riferimento alla superficie lorda del campione.

Poiché dalla geometria del sistema si ottiene

$$\frac{\operatorname{sen} \alpha}{A} = \frac{\operatorname{cos} \alpha}{B} = \frac{1}{D} \quad (6)$$

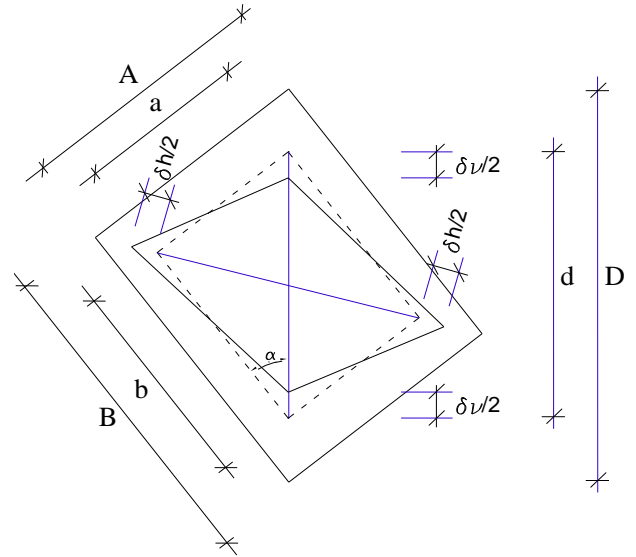


Figura 3. Schema per il calcolo delle deformazioni indotte dal taglio.

in cui D rappresenta la lunghezza della diagonale del campione, le Eq. (5) possono riscriversi nella forma

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{P}{D t} \quad (7)$$

Nel caso di campioni di forma quadrata con lato di dimensione A , l'Eq. (7) diventa

$$\tau = \frac{P\sqrt{2}}{2A t} = \frac{P}{\sqrt{2} A t} \quad (8)$$

Il modulo di elasticità trasversale G_i dell' i -esimo campione è stato calcolato come

$$G_i = \frac{\tau_{ri}/3}{\gamma(\tau_{ri}/3)} \quad (9)$$

in cui τ_{ri} è la resistenza massima esibita dall' i -esimo campione, valutata con riferimento all'area lorda. L'Eq. (9) non ha immediato riscontro nelle norme prese in considerazione né in quelle americane; ad esempio la norma ASTM E 519-02 suggerisce la seguente espressione per il calcolo del modulo di elasticità trasversale:

$$G = \frac{\tau^*}{\gamma(\tau^*)} \quad (10)$$

non specificando però se τ^* debba essere una resistenza o un differente valore di tensione.

Analoga considerazione può farsi per la norma Rilem Lumb6.

Le prove di compressione ordinaria sono state condotte applicando uniformemente il carico P' sulla sezione trasversale e calcolando la tensione e la relativa deformazione come

$$\sigma = \frac{P'}{t'l'}; \quad \varepsilon = \frac{\Delta}{c'} \quad (11)$$

dove l' e t' sono le dimensioni della sezione trasversale, Δ è la media degli spostamenti registrati dai comparatori e c' la lunghezza della base di lettura. Anche in questo caso, per il calcolo delle tensioni si è impiegata l'area lorda della sezione trasversale.

Il modulo E dell' i -esimo campione è stato calcolato facendo riferimento alla seguente espressione:

$$E_i = \frac{f_i/3}{\varepsilon_i(f_i/3)} \quad (12)$$

essendo f_i la sua resistenza a compressione.

La suddetta espressione è utilizzata dal DM 2008 e dall'EC6 ed ha valore solo se le misure di deformazione sono rilevate sul campione attraverso appositi strumenti di lettura.

La resistenza caratteristica a compressione (avente un frattile del 5%), come suggerito dalla norma italiana e dall'EC6, è stata calcolata come

$$f_k = f_m - ks \quad (13)$$

dove f_m è la resistenza media, s lo scarto quadratico medio e k un coefficiente fornito dalle sopra citate normative, dipendente dal numero di campioni testati.

3 STIMA DEI MODULI DI ELASTICITÀ LONGITUDINALE E TANGENZIALE SECONDO IL DM 2008 E L'EC6

Entrambi i codici normativi in oggetto suggeriscono l'espressione analitica di seguito riportata per la stima del modulo di elasticità tangenziale:

$$G = 0.4E \quad (14)$$

Come anche sottolineato dalle norme americane, non esistono sufficienti riscontri sperimentali che supportino questa relazione, la quale è ottenuta sotto l'ipotesi di materiale omogeneo e isotropo avente un coefficiente di Poisson ν pari a 0.25.

Sotto queste ipotesi infatti i moduli E e G sono legati dall'equazione

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (15)$$

che restituisce l'Eq. (14) se $\nu = 0.25$.

È evidente che l'ipotesi di materiale omogeneo e isotropo può risultare molto distante dal reale comportamento meccanico, specie nel

caso in cui gli elementi resistenti impiegati hanno comportamento fortemente anisotropo, come accade nel caso di blocchi con fori disposti lungo una direzione.

La validità dell'Eq. (14) deve dunque essere verificata sperimentalmente.

Il modulo di elasticità trasversale G può essere dunque stimato una volta che sia noto E . La valutazione di E può però avvenire sia sperimentalmente che, alternativamente, correlandolo alla resistenza della muratura.

Infatti la stima di E , secondo le norme italiane e l'EC6, può eseguirsi mediante la seguente espressione:

$$E = 1000f_k \quad (16)$$

Sostituendo l' Eq. (16) nell' Eq. (14), si ottiene

$$G = 400f_k \quad (17)$$

Un riepilogo sintetico dei criteri adottati dalle normative tecniche qui considerate per il calcolo dei moduli di elasticità longitudinale e tangenziale delle murature viene proposto in Tabella 1.

Tabella 1. Criteri per la stima dei moduli di elasticità longitudinale e tangenziale secondo DM 2008 ed EC6.

| Normative | Stima di E | Stima di G |
|---------------|------------|------------------------|
| DM 2008 / EC6 | $1000f_k$ | $G=0.4E$ $G=400f_k$ |

4 RISULTATI SPERIMENTALI

4.1 Malte e blocchi

Le prove di compressione sui blocchi e sulle malte hanno fornito le resistenze medie riportate in Tabella 2.

Tabella 2. Resistenza media dei blocchi utilizzati.

| Tipologia | Direzione del carico | Resistenza a compressione [MPa] |
|--------------------------|----------------------|---------------------------------|
| Calcarenite | | 7.1 |
| Laterizio forato | parallela ai fori | 37.7 |
| | ortogonale ai fori | 2.1 |
| Calcestruzzo alleggerito | parallela ai fori | 4.1 |
| | ortogonale ai fori | 3.1 |

I blocchi di laterizio e calcestruzzo alleggerito sono stati provati in compressione sia nella direzione parallela all'asse dei fori che in quella ortogonale, mentre per i blocchi di calcarenite si sono eseguite prove di compressione su carote di forma cilindrica estratte dai blocchi stessi.

La Tabella 2 fornisce un quadro evidente delle differenze meccaniche riscontrate per le diverse tipologie di elementi resistenti.

Nella seguente Tabella 3 sono invece riportate le resistenze rilevate per le diverse tipologie di malta. La Tabella evidenzia la diversa resistenza della malta MR, usata per una delle murature di calcarenite, per la muratura di laterizio e per la muratura di calcestruzzo alleggerito, rispetto alla resistenza della malta MD usata per una sola delle due murature di calcarenite testate.

Tabella 3. Resistenza media delle malte impiegate per le diverse tipologie di muratura.

| Tipologia di muratura | Tipo di malta | Resistenza a compressione [MPa] |
|--------------------------|---------------|---------------------------------|
| Calcarenite | MR | 9.2 |
| Calcarenite | MD | 3.1 |
| Laterizi forati | ML | 9.6 |
| Calcestruzzo alleggerito | ML | 9.6 |

4.2 Prove di compressione diagonale

I diagrammi sperimentali τ - γ ottenuti dalle prove sono riportati in Fig. 4. In Fig. 5 sono mostrati alcuni campioni a rottura.

I campioni di muratura di laterizio forato (Serie A e B) hanno mostrato un comportamento sostanzialmente analogo, contraddistinto da limitate differenze di resistenza fra i campioni. Le curve sperimentali registrate esibiscono una prima fase pressoché lineare, corrispondente alla fase quasi-elastica, fino a un valore massimo della tensione tangenziale, seguita da un tratto ad andamento sub-orizzontale.

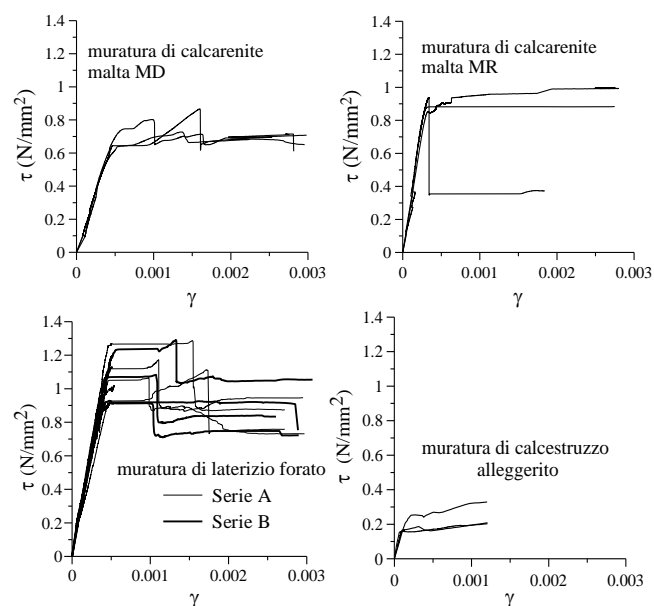


Figura 4. Diagrammi sperimentali tensione tangenziale-scorrimento

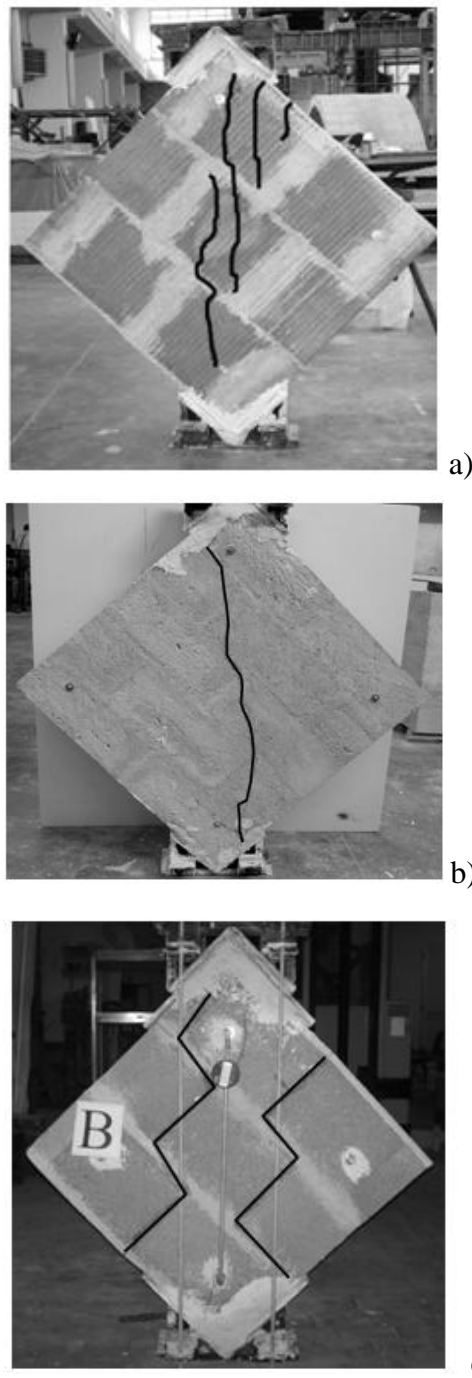


Figura 5. Meccanismi di rottura tipici: a) campioni di muratura di laterizio forato; b) campioni di muratura di calcarenite; c) campioni di muratura di calcestruzzo alleggerito.

Successivamente al raggiungimento di questo valore di picco, che coincide con la rottura del campione, si verifica una repentina perdita di resistenza,

Con riguardo alla muratura di calcarenite, si è potuta verificare una stretta dipendenza della resistenza a taglio dalla tipologia di malta impiegata. Anche in questo caso i campioni hanno esibito un comportamento quasi lineare nella prima fase, con successivo tratto sub-orizzontale. In un solo caso si è verificata una

repentina perdita di resistenza.

I campioni di muratura di laterizio forato hanno mediamente mostrato una maggiore resistenza rispetto a quelli di calcarenite, e ciò risulta maggiormente evidente se il confronto è effettuato con i campioni di calcarenite confezionati con malta MD.

In ultimo, si osserva che il comportamento esibito dai campioni di muratura di calcestruzzo alleggerito appare molto simile a quello della muratura di laterizio forato seppur contraddistinto da resistenze notevolmente inferiori e da un tratto post-picco più regolare, caratterizzato da una lieve pendenza positiva.

In Tabella 4 sono riportati i valori del modulo di elasticità tangenziale ottenuti attraverso l'applicazione dell'Eq. (9).

La Figura 6 mostra l'andamento del modulo G al variare del rapporto τ/τ_r , essendo τ_r la resistenza esibita dal campione alla fine della fase quasi-elastica.

Tabella 4. Valori sperimentali medi del modulo di elasticità tangenziale e della resistenza a taglio

| Tipologia di muratura | Tipo malta | G (medio) [MPa] | τ_r (media) [MPa] |
|--------------------------|------------|-------------------|------------------------|
| Calcarenite | MR | 2937 | 0.89 |
| | MD | 1348 | 0.73 |
| Laterizi forati | Serie A | 2480 | 1.08 |
| | Serie B | 2614 | 1.06 |
| Calcestruzzo alleggerito | ML | 2042 | 0.19 |

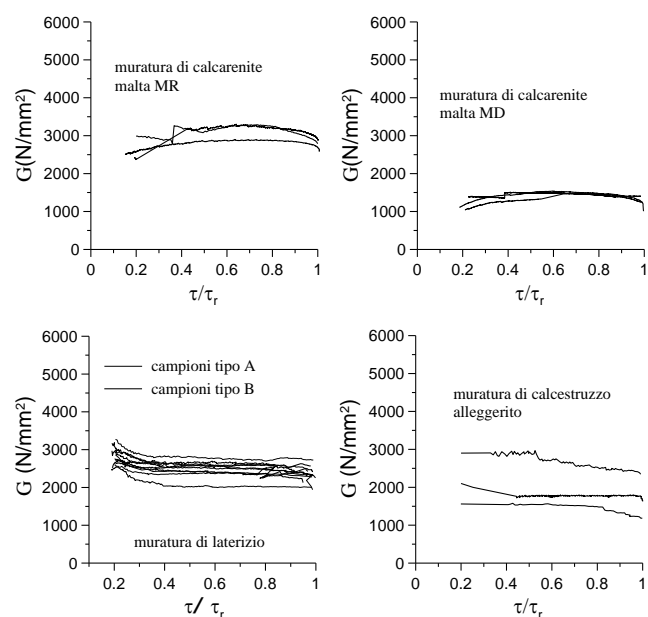


Figura 6. Andamento del modulo G secante nel tratto ascendente della curva $\tau-\gamma$

Nella stessa figura si evidenzia la limitata variazione di G lungo il ramo ascendente del diagramma $\tau-\gamma$ e ciò suggerisce che l'utilizzo dell'Eq. (9), seppur non specificata da alcuna normativa, è adeguato.

4.3 Prove di compressione in direzione ortogonale ai letti di malta

Dall'analisi delle curve sperimentali $\sigma-\epsilon$, qui non inserite per brevità, si rileva per la muratura di laterizio forato un comportamento quasi lineare fino al picco di resistenza, seguito rottura di tipo fragile.

Per entrambe le tipologie di campioni testati (3 e 5 filari) la dispersione dei risultati in termini di resistenza e rigidità si è dimostrata minima, rivelando un comportamento sostanzialmente indipendente da effetti di scala ed effetti di confinamento da parte del supporto di prova.

Anche durante queste prove la muratura di calcarenite ha esibito una capacità di resistenza fortemente dipendente dalla classe di resistenza della malta impiegata ed anche in questo caso non sono stati rilevati apprezzabili effetti di scala.

I valori di resistenza esibiti dai campioni in calcestruzzo alleggerito sono risultati alquanto ridotti, coerentemente con la notevole quantità di vuoti da cui le unità resistenti sono caratterizzate.

Si riportano in Tabella 5 i risultati sperimentali conseguiti in termini di tensioni massime e moduli di elasticità, elaborati conformemente alle norme considerate.

Tabella 5. Valori sperimentali del modulo di elasticità longitudinale medio e della resistenza a compressione media e caratteristica.

| Tipologia di muratura | Tipo malta | E (medio) EC6/DM 2008 [MPa] | f_m/f_k [MPa] |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| Calcarenite | MR | 6699 | 4.20/4.06 |
| | MD | 3945 | 2.55/1.98 |
| Laterizi forati | 1 ^a serie 3 filari | 6442 | 9.05/5.16 |
| | 2 ^a serie 3 filari | 6692 | 8.66/5.16 |
| | 5 filari | 6166 | 7.42/5.16 |
| Calcestruzzo alleggerito | ML | 4565 | 1.74/0.53 |

5 CONFRONTO TRA RISULTATI SPERIMENTALI E MODELLI PROPOSTI DALLE NORME

Da una valutazione dei risultati dell'analisi sperimentale può in primo luogo evincersi che la stima del modulo elastico longitudinale attraverso

l'Eq. (16) determina un elevato scarto (sottostima) rispetto ai valori sperimentali e ciò risulta in particolar modo evidente nel caso di muratura di blocchi di calcestruzzo alleggerito.

Per questi campioni l'impiego dei modelli di stima suggeriti dal DM 2008 e dell'EC6 conduce infatti a uno scarto percentuale di circa -88%, mentre nel caso della muratura di laterizio forato si ottiene il minimo scarto percentuale, pari a -18%.

In Tabella 6 sono riportati tutti gli errori di predizione rilevati applicando le norme in oggetto.

La Figura 7 mostra invece in dettaglio gli scostamenti tra i valori stimati e i risultati sperimentali.

Tabella 6. Errore nella stima del modulo di elasticità longitudinale E secondo i modelli proposti dalle norme.

| Tipologia di muratura | Tipo malta | Errore di stima con EC6/DM 2008 | |
|--------------------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | Tipologia di muratura | Errore di stima con EC6/DM 2008 |
| Calcarenite | MR | | -39 % |
| | MD | | -49 % |
| Laterizi forati | ML | | -18 % |
| Calcestruzzo alleggerito | ML | | -88 % |

Poiché la stima del modulo di elasticità trasversale G dipende dalla conoscenza del modulo di elasticità longitudinale E , per G possono ottenersi errori di diversa entità in dipendenza del fatto che E sia stato ricavato sperimentalmente oppure stimato attraverso la Eq. (16).

In questo ultimo caso l'errore di stima che si commette per E può portare a valori inaccettabili per G .

La Figura 8 mostra i risultati della stima di G attraverso l'Eq. (14) con E calcolato sperimentalmente. Si rileva un ottimo risultato, confermato anche dalle percentuali di errore riportate in Tabella 7.

In Fig. 9 è invece riportata la stima di G attraverso l'Eq. (17), ottenuta dalle Eq. (14) e (16).

Tabella 7. Errore di stima del modulo di elasticità tangenziale G .

| Tipologia di muratura | Tipo malta | Errore di stima per $G=0,4 E$ | |
|--------------------------|------------|-------------------------------|--------------|
| | | E sperimentale | E da norme |
| Calcarenite | MR | -9 % | -45 % |
| | MD | 17 % | -41 % |
| Laterizi forati | ML | -0.5 % | -18 % |
| Calcestruzzo alleggerito | ML | -11 % | -90 % |

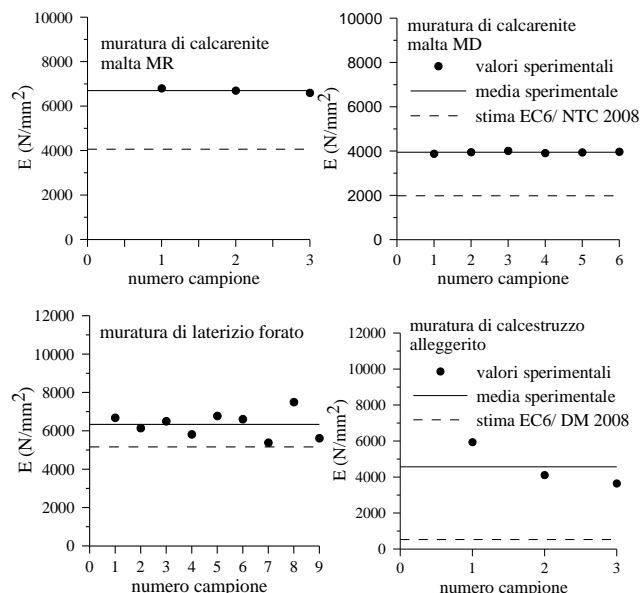


Figura 7. Modulo di elasticità longitudinale: confronto tra risultati sperimentali e valori stimati.

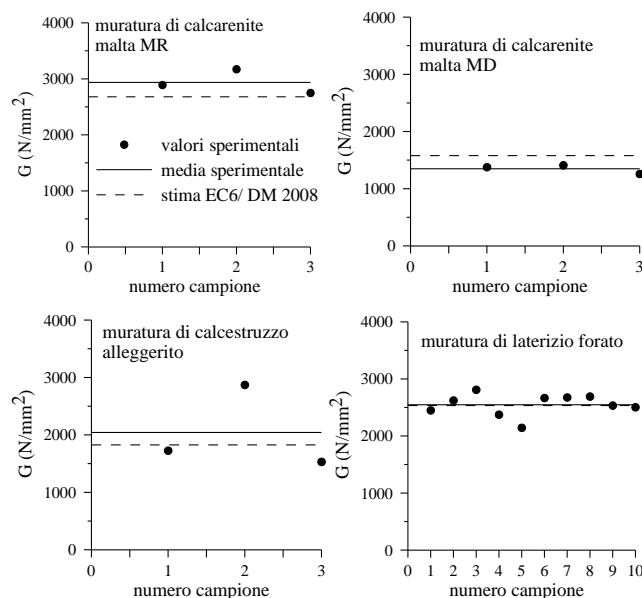


Figura 8. Modulo di elasticità tangenziale: confronto tra risultati sperimentali e valori stimati a partire dalla determinazione sperimentale di E .

In questo caso i risultati mostrano una evidente sottostima, confermando quanto anzi detto riguardo alla stima di G basata su una valutazione indiretta di E .

È interessante osservare dai risultati sperimentali che per entrambe le tipologie di blocchi, sia quelle a prevalente comportamento ortotropo (laterizi forati e blocchi di calcestruzzo alleggerito) che quelle a comportamento prevalentemente isotropo (calcarenite), la valutazione del modulo di elasticità trasversale per mezzo dell'Eq. (14), sotto l'ipotesi di materiale a comportamento isotropo, conduce a risultati di buona approssimazione.

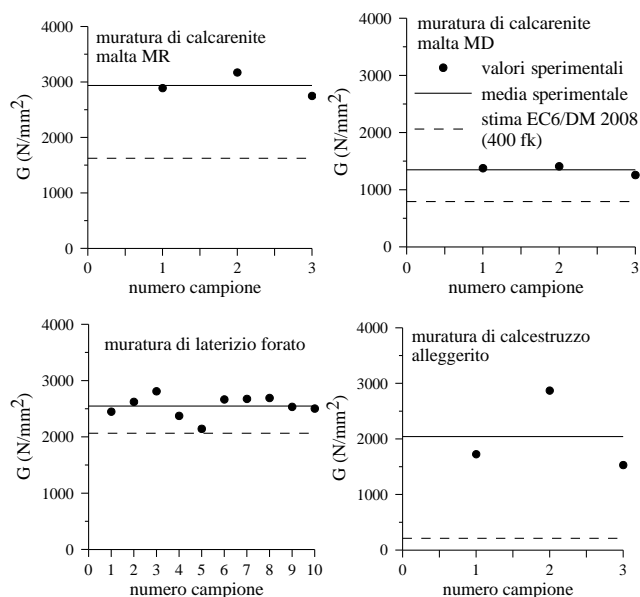


Figura 9. Modulo di elasticità tangenziale: confronto tra risultati sperimentali e valori stimati a partire dalla stima di E .

Evidentemente l'Eq. (14) è da intendersi come una mera correlazione empirica fra i moduli di elasticità in questione che si adatta bene in molti casi alla evidenza sperimentale, e non come conseguenza della particolarizzazione di una equazione costitutiva basata sulla isotropia e omogeneità del materiale.

6 CONCLUSIONI

E' stato condotto uno studio sperimentale per la valutazione dei moduli elastici di quattro diverse tipologie di muratura (due di blocchi di calcarenite, una di blocchi di calcestruzzo alleggerito ed una di blocchi di laterizio forato). I risultati ottenuti dalla sperimentazione sono stati confrontati con i valori stimabili attraverso i modelli proposti dall'Eurocodice 6 e dal DM 2008.

Per la stima di G sono stati analizzati due approcci: il primo basato sulla valutazione sperimentale di E ($G=0,4E$), il secondo basato sulla stima di E secondo quanto suggerito dalle norme ($G=400 f_k$). Per la stima di E è stato analizzato il solo approccio basato sulla correlazione con la resistenza sperimentale a compressione.

I confronti effettuati mostrano che i modelli di stima di E risultano poco affidabili e producono, nei casi analizzati, più frequentemente una sottostima. Gli errori di stima per E si traducono in successivi errori per la stima di G essendo questo dipendente da E . In questo modo anche G risulta generalmente sottostimato.

Quando al contrario si effettua una valutazione di G in funzione di E determinato sperimentalmente, il legame normativo mostra una buona accuratezza malgrado lo stesso sia basato sulla ipotesi intrinseca di materiale omogeneo ed isotropo.

Limitatamente al caso in cui E viene valutato sperimentalmente si può confermare che i risultati validano dunque il modello $G=0.4 E$ che le norme MSJC suggerivano di confermare attraverso indagini sperimentali specifiche.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato sviluppato utilizzando in parte materiale prodotto nell'ambito del Programma di ricerca ReLUIS-DPC, 2005-2008, Linea 2, Obiettivo 5:Influenza della Tamponatura sulla risposta strutturale.

REFERENCES

- ASTM E 519-02, 2010. Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages.
- Atkinson, R.H., 1990. Evaluation of strength and modulus tables for grouted and ungrouted hollow unit masonry, *Atkinson-Noland and Associates, Boulder*.
- Badalamenti, V., Cavaleri, L., Priolo S., 2006. Comportamento a taglio dei muri in laterizio: confronto fra risposta sperimentale e modelli di previsione suggeriti dalle norme tecniche, *Ingegneria Sismica*, **3**, 56-65.
- Bosiljkov, Z., Totoev, Y.Z., Nichols, J.M., 2005. Shear modulus and stiffness of brickwork masonry: An experimental perspective", *Structural Engineering and Mechanics*, **20**(1), 21-44.
- Brown, R.H., Melander, J.M., 1999. Flexural bond strength of unreinforced grouted masonry using PCL and MC mortars, *8th North American Masonry Conference*, The Masonry Society.
- Cantù, E., Zanon, P., 1982. Combined cyclic testing procedures in diagonal compressive on hollow clay block reinforced masonry, *Sixth International Brick Masonry Conference*, Roma.
- Capozucca, R., Cerri, M.N., Zanarini, G., 2001. Resistenza a taglio di murature con blocchi in laterizio, *Costruire in Laterizio*, **84**, 54-59.
- Cheema, T.S., Klingner, R.E., 1986. Compressive strength of concrete masonry prisms, *ACI Structural Journal*, **83**(1), 88-97.
- Colville, J., Miltenberger, M.A., 1993. Hollow concrete masonry modulus of elasticity, *North American Masonry Conference*. The Masonry Society, Philadelphia.
- D.M. LL. PP. 14 Gennaio 2008, Nuove norme tecniche per le costruzioni.
- Drysdale, R.G., Hamid, A.A., 1984. Effect of grouting on the flexural tensile strength of concrete block masonry, *The Masonry Society Journal*, **3**(2):T1-T9.
- Eurocode 6, 2006. Design of masonry structures.

- Knutson, H.H., 1993. The stress–strain relationship for masonry, *Masonry International*, **7**(1), 31–43.
- Mohamad, G., Lourenço, P.B., Roman, H.R., 2007. Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: review and prospects, *Cement and Concrete Composites*, **29**, 181-192.
- MSJC, 2008. Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures.
- RILEM LUMB6-1991. Diagonal tensile strength tests of small wall specimens.