

Resistenza a taglio di murature con blocchi in laterizio

La resistenza a taglio di pannelli murari, confezionati con blocchi in laterizio a pareti lisce o ad incastro, è influenzata dalla tipologia dei giunti di malta.

Alcune prove sperimentali, eseguite con diverse tipologie di elementi resistenti e differenti modalità di giunzione, hanno dato luogo a risultati il cui confronto fornisce informazioni di grande utilità pratica.

La **resistenza a taglio** delle pareti murarie influenza significativamente la capacità resistente globale degli edifici in muratura sottoposti alle azioni sismiche. È dunque di fondamentale importanza, per una corretta **progettazione in zona sismica**, la conoscenza della resistenza dei pannelli alle azioni di taglio.

Negli ultimi anni sono stati eseguiti in merito numerosi studi teorici e sperimentali, senza tuttavia individuare la possibilità di valutare a pieno il comportamento di pannelli murari confezionati con blocchi semipieni in laterizio, caratterizzati da differenti tipologie di giunto.

Per la definizione della resistenza a taglio di **pannelli murari** si possono adottare diverse tecniche sperimentali: in fig. 1 sono rappresentate le due tipologie principali di prova per la determinazione della resistenza a taglio di pannelli murari.

Lo schema di prova indicato con (a) permette di ottenere informazioni sul comportamento globale della parete sottoposta ad azione di taglio, la cui resistenza viene determinata utilizzando il criterio di resistenza di Coulomb, già noto dalla Meccanica delle Terre.

Il valore medio della tensione ultima di taglio f_{vu} nella sezione orizzontale del muro può essere espresso attraverso la seguente relazione presente nell'Eurocodice 6:

$$f_{vu} = f_{v0} + \mu \sigma_y \quad (1)$$

con:

f_{v0} = resistenza al taglio di pareti non caricate verticalmente

μ = coefficiente di attrito

σ_y = tensione verticale

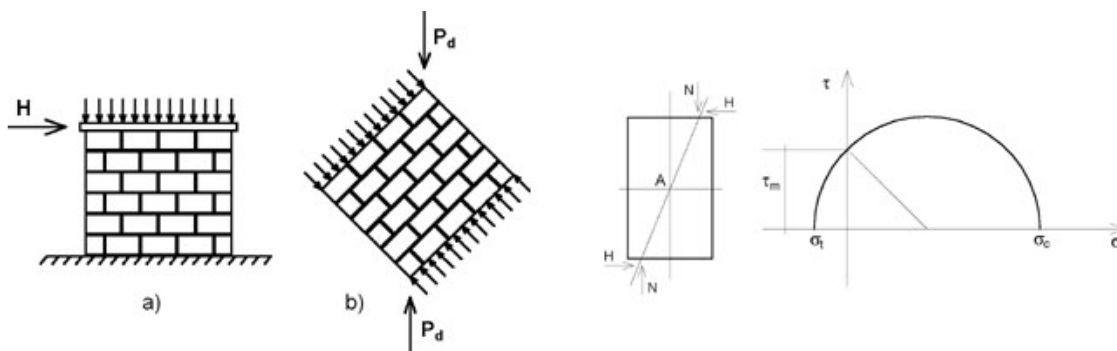


Fig. 1 - Prove a taglio: carico orizzontale (a) e carico diagonale (b).

Fig. 2 - Schema di prova e cerchio di Mohr per lo stato di tensione nel punto A.

L'effetto combinato di stati di tensione normali e tangenziali nella rottura di una parete in muratura può essere anche analizzato con la prova sperimentale indicata in fig. 2.

Considerando la muratura come un solido elastico, omogeneo ed isotropo, le tensioni principali σ_t , σ_c e l'angolo di inclinazione della superficie fessurata σ_t sono determinabili mediante le relazioni seguenti:

$$\sigma_t = -\frac{\sigma_0}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + (1,5\tau_0)^2} \quad (2)$$

$$\sigma_c = \frac{\sigma_0}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + (1,5\tau_0)^2} \quad (3)$$

$$\phi_t = \arctg \frac{\tau_m}{\sigma_t} = \arctg \frac{1,5\tau_0}{\sigma_t} \quad (4)$$

con:

σ_0 = tensione di compressione nella sezione orizzontale per la componente verticale del carico

τ_0 = tensione media tangenziale dovuta alla componente orizzontale del carico.

La resistenza τ_k della muratura si deduce dalla tensione principale di trazione σ_t attraverso:

$$\tau_k = \frac{\sigma_t}{b} \quad (5)$$

essendo

$$\tau_k = \frac{-\frac{\sigma_0}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + (1,5\tau_0)^2}}{b} \quad (6)$$

con b che dipende dalla geometria della parete e dal rapporto tra componente verticale ed orizzontale del carico: b è pari a 1,5 nel caso di pareti snelle con rapporto h/d maggiore di 1,5, mentre è pari a 1,1 nel caso di pannello quadrato.

Per $b = 1,5$, la tensione ultima a taglio f_{vu} si determina come segue:

$$f_{vu} = \tau_k \sqrt{\frac{\sigma_0}{1,5\tau_k} + 1} \quad (7)$$

La (7) è stata adottata nel D.M. 02.07.1981, "Normativa per le riparazioni ed il rafforzamento degli edifici danneggiati dal sisma nelle regioni Basilicata, Campania e Puglia", per le analisi in campo elasto-plastico secondo il metodo POR di edifici in muratura.

Attraverso l'espressione (7), la forza resistente a taglio per il singolo pannello risulta:

$$H_u = A f_{vu} = A \tau_k \sqrt{\frac{\sigma_0}{1,5\tau_k} + 1} \quad (8)$$

essendo A l'area della sezione geometrica del pannello.

La metodologia di prova (b) indicata in fig. 1 è suggerita dal D.M. 20.11.1987, "Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento". Questo tipo di prova non è scevro da critiche. Infatti, il carico concentrato diagonale crea un complesso stato tensionale che solo nella parte centrale del pannello presenta uno stato di tensione biassiale ragionevolmente uniforme.

La fig. 3 mostra i valori di tensione ottenuti con un modello isotropo, elastico-lineare, per il caso di una piastra quadrata, sottoposta a una forza diagonale P_d , avendo assunto un coefficiente di Poisson nullo.

Il valore nominale $\bar{\tau}$ relativo alla componente orizzontale del carico P_d è espresso da:

$$\bar{\tau} = \frac{0,707 P_d}{a \cdot t} = \frac{P_d}{2h \cdot t} \quad (9)$$

I dati sperimentali di resistenza a taglio ottenuti con questo tipo di prova rappresentano sempre dei valori medi, poiché influenzati dalla geometria dei blocchi e dagli effetti di scala.

Nonostante ciò, questo tipo di sperimentazione può essere considerata sufficientemente corretta per stimare la resistenza a taglio f_{vk0} in assenza di carico di compressione:

$$f_{vk0} = 0,7\bar{\tau} \quad (10)$$

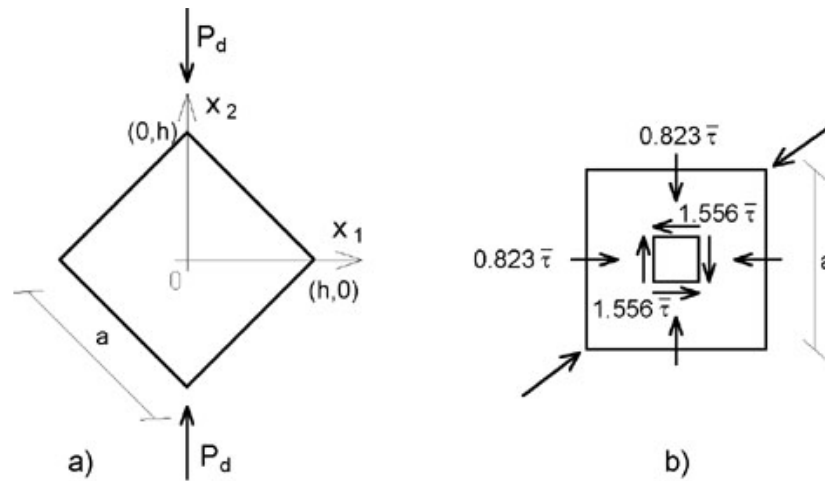


Fig. 3 - Distribuzione di tensione su un pannello quadrato caricato diagonalmente.

Nel seguito, si valuta la resistenza di pannelli murari confezionati con blocchi semipieni in laterizio a pareti lisce e ad incastro.

I pannelli sono stati sollecitati sia con prove di compressione in direzione parallela ai fori del blocco, sia con prove di compressione diagonale.

I risultati sperimentali sono stati successivamente confrontati con i valori forniti dai criteri di resistenza a taglio previsti nell'Eurocodice 6.

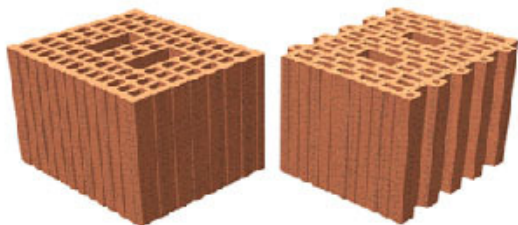
Analisi sperimentale

Lo scopo principale dell'analisi sperimentale è stato quello di valutare il comportamento a taglio di pannelli murari confezionati con differenti tipologie di giunti di malta e di blocchi: giunti continui, interrotti e assenti in verticale; blocchi in laterizio a facce lisce e ad incastro.

Gli elementi di prova sono rappresentati da pannelli quadrati di dimensioni 1 x 1 m e spessore pari a 0,3 m. Le prove di compressione nel senso dei fori e compressione diagonale sono state eseguite su tre campioni per ciascuna tipologia di giunto di malta.

I blocchi lisci hanno dimensioni nominali in pianta 300 x 240 mm [fig. 4a], mentre i blocchi ad incastro presentano dimensioni 300 x 270 mm [fig. 4b].

Entrambe le tipologie di blocco utilizzate sono caratterizzate da una altezza di 190 mm ed un rapporto fra la superficie di foratura e la sezione geometrica complessiva pari al 45 per cento.



Prove preliminari di resistenza a compressione sui singoli blocchi hanno fornito i seguenti valori medi:

$$f_b = 21 \text{ N/mm}^2 \text{ per blocchi lisci;}$$

$$f_b = 24 \text{ N/mm}^2 \text{ per blocchi ad incastro.}$$

Fig. 4 - Blocchi semipieni con il 45% di foratura: lisci (a), ad incastro (b).

La malta utilizzata per realizzare i diversi tipi di giunti, con uno spessore medio di 10 mm, è del tipo M1.

Le prove eseguite per la valutazione della resistenza a compressione ed a trazione della malta hanno fornito i seguenti valori:

$$f_m = 24,5 \text{ N/mm}^2 \text{ per la compressione;}$$

$$f_r = 4,6 \text{ N/mm}^2 \text{ per la flessione.}$$

I campioni confezionati con blocchi lisci sono caratterizzati da quattro tipologie di giunti di malta, come specificato in fig. 5.

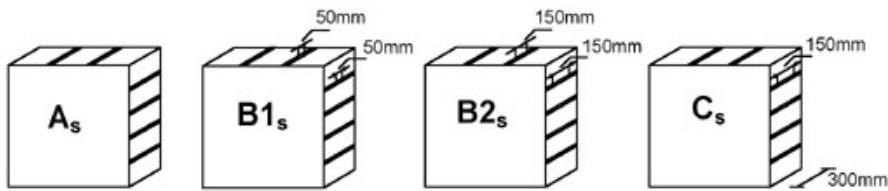


Fig. 5 – Campioni confezionati con blocchi lisci.

Legenda (per fig. 5):

A_s giunti di malta continui

B_{1s} giunti di malta verticali ed orizzontali interrotti per una striscia di 50 mm

B_{2s} giunti verticali ed orizzontali interrotti per una striscia di 150 mm

C_s giunti orizzontali interrotti per una striscia di 150 mm e giunti verticali assenti

I pannelli costruiti con blocchi in laterizio ad incastro non presentano, per la particolare conformazione degli elementi resistenti, giunti di malta verticali e sono caratterizzati da due tipologie di giunto di malta in orizzontale: giunto continuo (A_t) e giunto interrotto per una striscia di 150 mm (C_t).

Prove di compressione nel senso dei fori, sino a rottura, sono state effettuate sulle varie tipologie di pannelli costruiti con blocchi lisci e ad incastro [fig. 6a].

Successivamente, su pannelli analoghi sono state eseguite prove a compressione diagonale [fig. 6b] sino a rottura con riferimento alle norme ASTM E 519-74 "Standard test method for diagonal tension in masonry assemblages".



Fig. 6 – Prova di compressione in direzione parallela ai fori (a) e diagonale (b).

Nell'Eurocodice 6, il criterio di resistenza a taglio adottato è indicato dall'equazione (1). La resistenza della muratura f_v è legata alle diverse tipologie di giunto di malta.

Nel caso di giunti di malta continui, la resistenza caratteristica a taglio è pari al valore minore tra i seguenti:

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4 \sigma_0 \quad (11)$$

o

$$f_{vk} = 0,065 f_b \quad \text{non minore di } f_{vk0} \quad (12)$$

considerando un valore limite di f_{vk} per la classe di malta adottata f_m e la qualità di resistenza del blocco di laterizio impiegato f_b .

Nel caso di murature caratterizzate da assenza di giunti verticali, le espressioni per la resistenza a taglio sono le seguenti:

$$f_{vk} = 0,5 f_{vk0} + 0,4 \sigma_0 \quad (13)$$

o

$$f_{vk} = 0,045 f_b \quad \text{non minore di } f_{vk0} \quad (14)$$

considerando un valore limite di f_{vk} non superiore al 70% del valore di resistenza indicato per muratura confezionata con giunti continui.

Infine, per muratura con giunti interrotti, la resistenza caratteristica a taglio può essere determinata con le seguenti espressioni:

$$f_{vk} = (g/t) f_{vk0} + 0,4 \sigma_0 \quad (15)$$

dove t è lo spessore della muratura e g è uguale alla somma dello spessore delle strisce di malta, ovvero:

$$f_{vk} = 0,05 f_b + 0,4 \sigma_0 \quad \text{non minore di } f_{vk0} \quad (16)$$

considerando lo stesso valore limite f_{vk} , pari al 70% della resistenza nel caso di giunti continui.

I risultati

Nella fig. 7 si riportano alcuni diagrammi sperimentali relativi alle prove di compressione diagonale su pannelli con varie tipologie di giunto. Sono indicati anche i valori ultimi della tensione tangenziale misurati nel corso delle prove.

Nella tab. 1 sono indicati i principali risultati delle prove sperimentali eseguite in laboratorio. In particolare sono riportati i valori medi di resistenza a compressione della muratura nel senso dei fori " f " e la tensione resistente a taglio $\bar{\tau}$.

È possibile notare che i giunti di malta interrotti influenzano significativamente la resistenza, soprattutto quando il rapporto tra la distanza fra gli assi delle due strisce di malta e lo spessore del pannello è prossimo al valore limite di 0,8 indicato nell'Eurocodice 6.

Tab. 1 – Valori medi della resistenza a compressione nel senso dei fori " f " e taglio $\bar{\tau}$.

Tipo di giunto	Nu(kN)	f(N/mm ²)	Pdu(kN)	$\bar{\tau}$ (N/mm ²)
A _s	2978	10,0	403	0,95
B _{1s}	2383	8,0	388	0,91m
B _{2s}	1388	4,6	337	0,79
C _s	1240	4,0	102	0,24
A _t	2606	8,7	165	0,39
C _t	1469	5,0	126	0,30

Legenda (per tab. 1):

A_s blocchi lisci, giunti di malta continui verticali e orizzontali

B_{1s} blocchi lisci, giunti di malta verticali e orizzontali interrotti per una striscia di 50 mm

B_{2s} blocchi lisci, giunti di malta verticali e orizzontali interrotti per una striscia di 150 mm

C_s blocchi lisci, giunti orizzontali interrotti per una striscia di 150 mm e giunti verticali assenti

A_t blocchi a incastro, giunti orizzontali continui e giunti verticali assenti

C_t blocchi a incastro, giunti orizzontali interrotti per una striscia di 150 mm e giunti verticali assenti

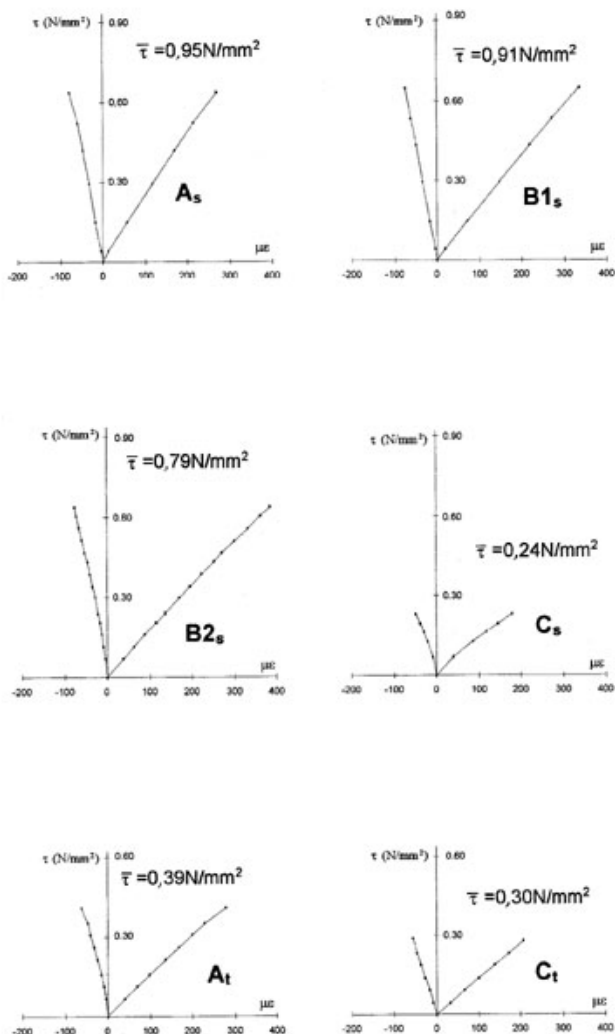


Fig. 7 - Diagrammi sperimentali per prove a compressione diagonale.

Tab. 2 – Confronto fra i coefficienti di riduzione della resistenza a taglio (Eurocodice 6 e valore sperimentale).

Tipo di giunto	$\bar{\tau}$ (N/mm ²)	α_{EC6}	α_{exp}
A _s	0,95	1,00	1,00
B _{1s}	0,91	0,83	0,96
B _{2s}	0,79	0,50	0,83
C _s	0,24	0,25	0,25
A _t	0,39	0,50	0,41
C _t	0,30	0,25	0,32

Appare quindi opportuno controllare con più accuratezza la risposta a taglio di pannelli con blocchi ad incastro perché, facendo riferimento all'Eurocodice 6, si corre il rischio di sovrastimare i valori di resistenza.

In conclusione, quindi, la sperimentazione eseguita su campioni di muratura confezionati con blocchi semipieni in laterizio, sia a superfici lisce che ad incastro, ha permesso di ricavare una serie di informazioni estremamente interessanti sul comportamento a compressione ed a taglio in funzione di varie tipologie di giunti di malta.

I principali risultati possono essere così sintetizzati:

- il giunto di malta interrotto ha influenza sulla risposta a compressione del pannello murario riducendone la capacità resistente, in particolare, quando il rapporto fra la distanza degli assi delle strisce di malta e lo spessore del muro è pari a 0,8;
- l'assenza di giunto di malta verticale penalizza fortemente la capacità resistente a taglio del pannello murario e, dall'esame dei dati sperimentali, si rileva che i giunti verticali ad incastro non riescono a compensare la mancanza di giunto verticale di malta;

Dai risultati di tabella 1 è chiaramente rilevabile, inoltre, la forte riduzione di resistenza passando dal campione A_s al campione B_{2s}.

Ulteriori considerazioni possono essere fatte, in particolare, nei riguardi della resistenza a taglio. È evidente come quest'ultima vari in relazione al tipo di giunto.

Con riferimento al tipo A_s, i pannelli senza giunto continuo mostrano le seguenti percentuali di variazione: il tipo B_{1s} ha una riduzione di circa il 4% ed il tipo B_{2s} una riduzione di circa il 17%.

L'Eurocodice 6 prevede un coefficiente di riduzione $\alpha_{EC6} = g/t$ per i giunti interrotti e $0,5\alpha_{EC6}$ per murature prive di giunti verticali.

La resistenza a taglio si rivela, inoltre, fortemente influenzata dall'assenza del giunto verticale di malta.

Nel caso di pannelli del tipo C_s, dove i giunti orizzontali sono interrotti e vi è assenza di giunti verticali, è possibile apprezzare una riduzione di resistenza pari a circa il 74% rispetto ai valori ottenuti per la tipologia A_s.

Considerazioni

In tab. 2 si esegue un confronto fra i coefficienti di riduzione α_{EC6} e α_{exp} , essendo quest'ultimo il rapporto tra la resistenza a taglio relativa al campione in esame e quella di riferimento del campione con giunti continui, tipo A_s.

In generale il coefficiente α_{EC6} rappresenta un valore conservativo per pannelli costruiti con blocchi semipieni lisci. Nel caso, invece, di pannelli confezionati con blocchi ad incastro, tipo A_t, la riduzione di resistenza a taglio indicata nell'Eurocodice 6 non è adeguata in quanto il coefficiente di riduzione α_{exp} , valutato sperimentalmente, risulta superiore.

- infine, il coefficiente di riduzione della resistenza a taglio α_{EC6} proposto dall'Eurocodice 6, nel caso di pannelli confezionati con blocchi ad incastro, è sovradimensionato e non assicura una sufficiente sicurezza.

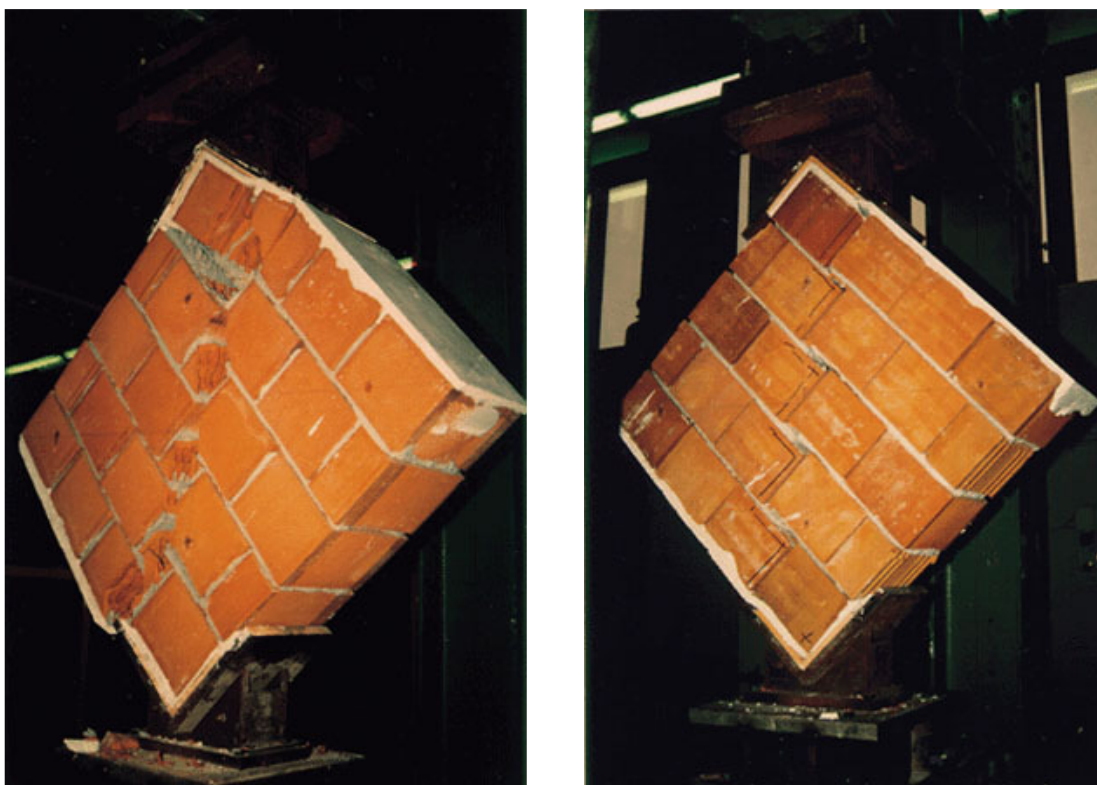


Fig. 8 – Prove a compressione diagonale: rottura dei blocchi nel pannello A_s (a); rottura dei giunti nel pannello A_t (b).

Influenza della bagnatura dei blocchi

Nel corso della sperimentazione sono stati esaminati anche pannelli costruiti mettendo in opera i laterizi asciutti, privi cioè della bagnatura necessaria per evitare che venga sottratta acqua di idratazione al cemento con conseguente "bruciatura" della malta.

Compressione nella direzione dei fori

Nelle tabelle 3 e 4 sono riportati i valori dei carichi necessari per portare a rottura i pannelli, costruiti sia con blocchi asciutti che bagnati.

Tab. 3 – Prove a carico verticale. Riepilogo dei carichi di rottura dei muretti.

Blocchi a facce lisce	kN			kN media
giunti verticali e orizzontali continui, blocchi bagnati	3385	2658	2890	2978
giunti verticali e orizzontali continui, blocchi asciutti	2451	2634	2567	2250
giunti con interruzione 50 mm, blocchi bagnati	2219	2404	2526	2383
giunti con interruzione 150 mm, blocchi bagnati	1446	1418	1299	1388
giunto solo orizzontale, con interruzione 150 mm, blocchi bagnati	1373	1030	1318	1240
giunto solo orizzontale, con interruzione 150 mm, blocchi asciutti	1021	1157	1076	1085

Blocchi ad incastro	kN			kN media
giunto orizzontale continuo, blocchi bagnati	2802	2628	2389	2606
giunto orizzontale continuo, blocchi asciutti	1748	2118	2250	2038
giunto orizzontale con interruzione 150 mm, blocchi bagnati	1715	1603	1090	1469
giunto orizzontale con interruzione 150 mm, blocchi asciutti	1457	1771	1300	1509

Prendendo a riferimento il valore di resistenza ai cardini verticali del pannello confezionato secondo le regole tradizionali (giunti orizzontali e verticali continui, blocchi bagnati), dai dati di tab. 3 si rileva che:

- la posa a blocchi asciutti provoca, nei pannelli costruiti a giunti continui verticali ed orizzontali, una non trascurabile riduzione di resistenza (20%);
- la posa a blocchi asciutti nei muretti realizzati con giunti orizzontali interrotti per 15 cm e privi di giunti verticali riduce la resistenza di oltre il 13% rispetto agli stessi pannelli costruiti con blocchi bagnati.

Analogamente nei pannelli realizzati con blocchi a incastro, l'assenza di bagnatura provoca una diminuzione di resistenza di oltre il 20% nel caso di posa a giunti orizzontali continui; mentre risultano dispersi i risultati relativi alla posa a giunti orizzontali interrotti.

Compressione diagonale

La tab. 4 evidenzia come la posa a blocchi asciutti provochi, nei pannelli a giunti continui verticali e orizzontali, una riduzione di resistenza al taglio di oltre il 30%, mentre la posa a blocchi asciutti nei pannelli realizzati con giunti orizzontali interrotti per 15 cm e privi di giunti verticali riduce la resistenza di oltre il 60% rispetto agli stessi muretti costruiti con blocchi bagnati.

Tab. 4 – Prove a compressione diagonale. Riepilogo dei carichi di rottura dei muretti.

Blocchi a facce lisce	kN			kN media
giunti verticali e orizzontali continui, blocchi bagnati	441,5	451,2	316,6	403,1
giunti verticali e orizzontali continui, blocchi asciutti	248,4	336,7	226,3	270,5
giunti con interruzione 50 mm, blocchi bagnati	386,3	379,4	400,1	388,6
giunti con interruzione 150 mm, blocchi bagnati	331,2	328,5	350,7	336,8
giunto solo orizzontale, con interruzione 150 mm, blocchi bagnati	83,6	108,0	115,4	102,3
giunto solo orizzontale, con interruzione 150 mm, blocchi asciutti	46,9	34,5	51,1	44,3

Blocchi ad incastro	kN			kN media
giunto orizzontale continuo, blocchi bagnati	142,1	174,5	176,6	164,4
giunto orizzontale continuo, blocchi asciutti	44,7	78,0	73,1	65,3
giunto orizzontale con interruzione 150 mm, blocchi bagnati	178,0	94,8	106,4	126,4
giunto orizzontale con interruzione 150 mm, blocchi asciutti	100,9	35,9	45,8	60,8

Anche nei pannelli realizzati con blocchi ad incastro, l'assenza di bagnatura provoca una diminuzione di resistenza al taglio del 60% nel caso di posa a giunti orizzontali continui e del 50% nel caso di posa a giunti interrotti per 15 cm.

Poiché sono da escludere variabili legate alla qualità della malta e della posa in opera (eseguita sempre dallo stesso operatore), tutte le informazioni ricavate dalla ricerca indicano nelle caratteristiche dei giunti e nella bagnatura del laterizio gli elementi fondamentali per ottenere murature affidabili e di elevata qualità. È quindi consigliabile un attento controllo in corso d'opera dell'esecuzione.

Bibliografia

- Atkinson R.H., Amadei B.P., Saeb S., Sture S., *Response of masonry bed joints in direct shear*, J. of Structural Engineering, vol. 115, n. 9, pp. 2276-2296, 1989.
- Hegemeir G.A., Nunn R.O., Arya S.K., *On the behaviour of joints in concrete masonry*, Proc. North American Masonry Conference, U.S.A., pp. 4.2-4.21, 1978.
- Hendry A.W., Sinha B.P., *Shear tests on full scale single storey brickwork structures subjected to precompression*, Civil Engineering and Public Works Review, pp. 1339-1334, 1971.
- Al Hashimi K., Curtin W.G., *Principal tensile strength and vertical shear resistance of high strength brickwork*, Proc. 8th Int. Brick-Block Masonry Conference, Dublin, pp. 571-582, 1988.
- Turnesec V., Cacovic F., *Some experimental results on the strength of brick masonry walls*, Proc 2nd Int. Brick Masonry Conference, Stoke on Trent, pp. 149-156, 1971.
- Tomazevic M., *Seismic design of masonry structures*. Construction Research Communications Limited ISSN 1365-556, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, pp. 88-95, 1977.
- D.M. 02 luglio 1981, *Normativa per le riparazioni ed il rafforzamento degli edifici danneggiati dal sisma nelle regioni Basilicata, Campania e Puglia*.
- Yokel F.Y., Fattal S.G., *Failure Hypothesis for Masonry Shear walls*, Journal of the Structural Division ASCE, vol. 102, n. ST3, pp. 515-532, 1976.
- Cantù E., Zanon P., *Combined cyclic testing procedures in diagonal compression on hollow clay block reinforced masonry*, Proc. 6th Int. Brick Masonry Conference, Roma, pp. 1007-1020, 1982.

Calvi B.M., Macchi G., Zanon P., *Random cyclic behaviour of reinforced masonry under shear action*, Proc. 7th Int. Brick Masonry Conference, Melbourne, Australia, 1985.

D.M. 20 Novembre 1987, *Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento*.

European Committee for Standardisation, EC6, *Design of Masonry Structures, Part 1-1: general rules for buildings – rules for reinforced and unreinforced masonry*, ENV 1996 1-1: CEN, 1995.