

Muratura armata

Caratterizzazione meccanica con blocchi a 'C' e ad 'H'.

F. da Porto (*), F. Mosele (*), M. Dalla Benetta (*), C. Modena (*)

(*) Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Università di Padova

Sommario

Nell'ambito del progetto di ricerca DISWall, cofinanziato dalla Comunità Europea, da sei aziende operanti nel settore delle costruzioni e dalle associazioni nazionali dei laterizi italiana e tedesca, sono stati sviluppati e studiati diversi sistemi per muratura armata.

In particolare, in collaborazione con il Consorzio POROTON® Italia ed una delle aziende ad esso associate, si sono studiati due sistemi realizzati con blocchi di laterizio porizzato a fori verticali, che utilizzano rispettivamente elementi con forma ad 'H' e a 'C' per l'inserimento dell'armatura.

Nel presente contributo si illustrano i risultati delle prove di caratterizzazione meccanica sui due sistemi allo studio.

Introduzione

La **muratura armata e confinata (o intelaiata)** sono state sviluppate per sfruttare le potenziali capacità della muratura, risolvendo il noto problema della scarsa resistenza a trazione intrinseca del materiale.

L'introduzione dell'armatura, oltre a migliorare in tal senso la resistenza della muratura, migliora anche caratteristiche del comportamento quali la duttilità e la capacità di dissipare energia che sono necessarie per ottenere un comportamento adeguato in caso di **azioni sismiche**.

Negli ultimi anni sono state sviluppate una gran quantità di soluzioni tecnologiche, che vedono l'utilizzo di differenti tipi di elementi resistenti (per materiale componente e geometria), differenti composizioni di malte o conglomerati, differenti percentuali e disposizioni delle armature (1).

Tali sviluppi sono in genere finalizzati a migliorare il comportamento nel piano delle pareti, dato che il principio di funzionamento per gli edifici in muratura nuovi, in particolare in zona sismica, si basa sul concetto di **"edificio scatolare"**.

Secondo tale principio, i solai rigidi distribuiscono le azioni sismiche orizzontali alle pareti di controvento, parallele all'azione del sisma.

La normativa attuale (2) impone comunque di effettuare le verifiche fuori dal piano delle pareti e stabilisce dei requisiti geometrici che devono essere rispettati dalle pareti resistenti al sisma, sia in termini di spessori minimi (240 mm) che di massima snellezza (pari a 12 e 15 rispettivamente per muratura in elementi artificiali non armata ed armata).

In questo contesto e nell'ambito del **progetto di ricerca europeo DISWall** (3) si è condotta una ricerca finalizzata a caratterizzare il comportamento meccanico di due sistemi di muratura armata, che impiegano rispettivamente **blocchi con forma ad 'H' e a 'C'** per l'inserimento dell'armatura.

I blocchi sono sviluppati a partire da disegni simili della filiera [fig. 1] e sono utilizzabili assieme nella costruzione delle pareti.

L'interesse principale della ricerca è stato rivolto alla caratterizzazione del comportamento fuori piano dei due sistemi di muratura armata, sia mediante semplici prove di flessione, descritte nel presente contributo, sia mediante prove cicliche fuori piano su pareti alte, che saranno descritte in un successivo articolo.

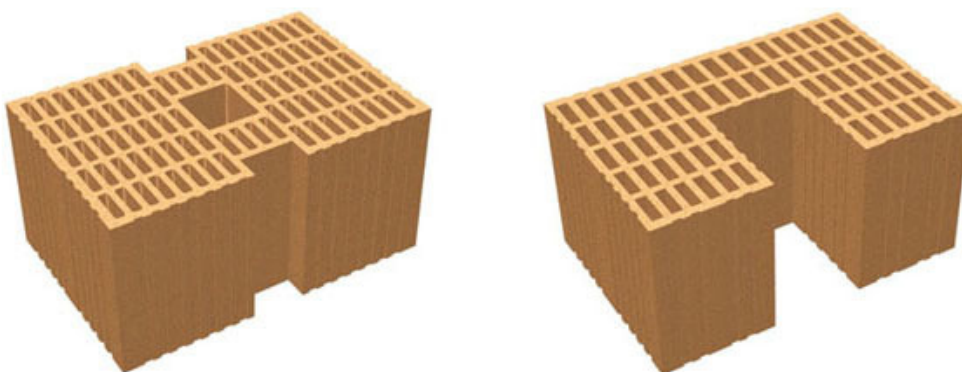


Fig. 1 - Vista d'insieme del blocco ad 'H' (sinistra) e del blocco a 'C' (destra).

I sistemi per muratura armata studiati

I sistemi di muratura armata studiati utilizzano blocchi di **laterizio porizzati semipieni**, con fori verticali e spessore di 380 mm, e adottano un sistema di **armatura concentrata**.

Il primo sistema [fig. 2a] si basa sull'utilizzo di blocchi ad 'H', nei quali è possibile inserire una quantità limitata di armatura verticale allineata sulla mezzeria della parete.

Il secondo sistema, sviluppato a partire dal primo [fig. 2b], si basa sull'alternanza di blocchi a 'C' con quelli ad 'H'.

I blocchi a 'C' hanno una cavità centrale più ampia (140x110 mm), che consente non solo l'introduzione di una maggiore quantità di armatura, ma anche il disaccoppiamento della stessa, rispetto alla mezzeria della parete.

Nel caso di azioni fuori piano, quindi, si migliorano le performance della parete, il cui funzionamento si avvicina a quello tipico di una sezione in cemento armato sollecitata a flessione.

Inoltre, anche dal punto di vista costruttivo, si ottimizzano le procedure di cantiere, in quanto con l'utilizzo del blocco a 'C' è possibile posare il blocco attorno all'armatura, posta già in opera, mentre con il blocco ad 'H', a corsi alterni, l'armatura sta all'interno del foro centrale del blocco, che deve quindi essere "infilato" sull'armatura.

Con questo secondo sistema sono necessarie delle sovrapposizioni lungo l'altezza dell'armatura verticale, mentre con il blocco a 'C' è possibile utilizzare anche armature a tutta altezza tra due livelli di orizzontamento.

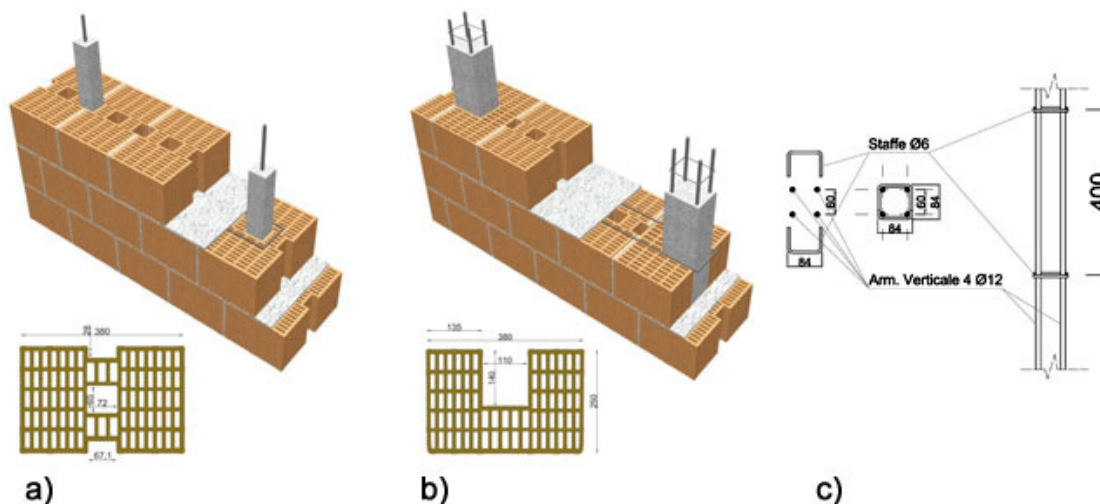


Fig. 2 - Sistema RM con blocchi ad 'H'(a) e con blocchi a 'C' (b); dettaglio dell'armatura verticale per il sistema rmC (c).

Nella presente sperimentazione, l'armatura verticale utilizzata per il sistema con blocco a 'H' è costituita da barre ad aderenza migliorata di diametro $\phi 16$ mm (vedasi fig. 2a), mentre per il sistema con blocco ad 'C' l'armatura è costituita da un traliccio tridimensionale composto da quattro barre ad aderenza migliorata di diametro $\phi 12$ mm, poste in opera senza sovrapposizioni e chiuse da piccole staffe ad interasse regolare in altezza [fig. 2b].

In entrambi i casi, le posizioni d'armatura sono distanziate di 780 mm (un blocco armato ogni tre). Si ottiene quindi una percentuale di armatura verticale pari a 0,10% nel caso delle pareti con blocco ad 'H', e pari a 0,20% per le pareti con blocco a 'C'.

L'armatura orizzontale è realizzata con 2 barre ad aderenza migliorata di diametro $\phi 6$ mm, distribuite a corsi alterni, per una percentuale sulla sezione della parete pari a 0,04%.

L'armatura è tutta costituita da acciaio di tipo B450C. La malta è stata sviluppata appositamente per poter essere utilizzata sia nei giunti orizzontali che per il riempimento delle cavità verticali armate.

Programma sperimentale

Lo scopo principale della ricerca, come già detto, era quello di **caratterizzare il comportamento meccanico**, in particolar modo per azioni fuori piano, dei due sistemi di muratura armata descritti.

Oltre quindi alla caratterizzazione sperimentale dei singoli componenti della muratura (blocchi, malta, armature) sono stati eseguiti test su **campioni di muratura**.

In particolare, sono state eseguite prove di compressione monoassiale, secondo la UNI EN 1052-1 (4), e prove di flessione fuori piano con piano di rottura parallelo ai giunti orizzontali, adattando la UNI EN 1052-2 (5) per muratura semplice al caso della muratura armata.

Ogni tipo di prova è stata ripetuta su sei campioni, tre della serie costruita con blocchi ad 'H' e tre della serie costruita con blocchi a 'C', per un numero complessivo di dodici campioni testati con prove standard.

Come già anticipato, sono state infine realizzate prove cicliche fuori piano su pareti alte, che verranno descritte in un successivo contributo.

Caratterizzazione dei materiali

Per determinare le proprietà meccaniche dei materiali, sono state effettuate prove di compressione sui blocchi, prove di flessione e compressione sulle malte e prove di trazione sulle armature.

I due tipi di blocco (ad 'H' e a 'C') hanno le stesse dimensioni di massima (250x380x190 mm rispettivamente in lunghezza, larghezza ed altezza). La percentuali di foratura è per entrambi del 45%.

Il comportamento e il valore di resistenza a compressione sono risultati simili per entrambi i tipi di blocco, con solo una differente distribuzione del danneggiamento nel blocco, più uniforme nel caso del blocco ad 'H'.

L'alta porosità ha fatto sì che la rottura venisse raggiunta in modo meno fragile rispetto a quanto atteso, tipicamente, per elementi di laterizio.

Per la valutazione della resistenza a compressione del blocco a 'C' l'area lorda della sezione orizzontale è stata calcolata

sottraendo l'area nominale della cavità centrale per l'inserimento dell'armatura.

In Tabella 1 sono riassunti i valori medi di peso dei blocchi, la resistenza a compressione media e caratteristica (f_{bm} e f_{bk}), il modulo elastico ed il coefficiente di Poisson (E_b e ν_b).

La nuova malta T300 M10 DISWall è stata sviluppata a partire da una malta con leganti idraulici e granulometria massima di 4 mm, per mezzo di aggiunta di additivi plasticizzanti.

La tab. 1 riporta anche i valori medi delle principali proprietà della malta: resistenza a flessione f_{mt} , resistenza a compressione cubica f_m , modulo elastico E_m e coefficiente di Poisson ν_m .

Le caratteristiche delle armature (tensione di snervamento f_y , resistenza ultima a trazione f_u e modulo elastico E) sono riportate in tab. 2.

I campioni di malta e gli spezzi d'armatura per la caratterizzazione dei materiali sono stati prelevati durante la costruzione dei pannelli di muratura per le prove sperimentali in laboratorio.

Tab.1 - Proprietà meccaniche dei blocchi e della malta.

Blocco	Peso (kg)	f_{bm} (N/mm ²)	f_{bk} (N/mm ²)	E_b (N/mm ²)	ν_b
'H'	15.4	11.3	9.9	10302	-0.21
'C'	13.9	12.7	9.5	12927	-0.15
Malta	Stagionatura (giorni)	f_{mt} (N/mm ²)	f_m (N/mm ²)	E_m (N/mm ²)	ν_m
T300 M10 DISWall	41-51	3.8	11.1	11250	-0.16

Tab. 2 - Proprietà meccaniche dell'armatura.

Armatura	Diametro (mm)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	E (N/mm ²)
Orizzontale	ø 6	438	670	192992
Verticale (RM-c)	ø 12	517	587	205369
Verticale (RM-h)	ø 16	506	628	196507

Prove di compressione monoassiale

Le prove di compressione monoassiale sono state condotte su campioni delle dimensioni di circa 1 m di lunghezza per 1 m di altezza in una pressa di tipo Amsler con massima capacità di 10.000 kN [fig. 3].

Due strati di Teflon sono stati disposti tra le estremità del campione e le superfici delle travi di carico, per minimizzare gli effetti dell'attrito e favorire una distribuzione omogenea delle tensioni.

I test sono stati condotti in controllo di carico, con incrementi di circa 0.5 kN/s, previa applicazione di un precarico di circa 15 kN, pari all'1% del carico massimo previsto.

Dopo il raggiungimento della resistenza massima, il campione è stato mantenuto sotto carico sino a raggiungere l'80% circa del carico massimo, in modo da verificare il degrado conseguente alla propagazione del danno.

I campioni sono stati strumentati con trasduttori di posizione potenziometrici (± 50 mm) ed LVDT (± 25 mm) in modo da misurare le deformazioni orizzontali, verticali e trasversali.

La fig. 3 mostra una vista generale di un campione in prova e le sezioni orizzontali dei campioni rmH e rmC rispettivamente.

Globalmente, il comportamento dei due sistemi per muratura armata si è rivelato abbastanza simile. Le prime lesioni subverticali sono apparse a circa l'80% del carico massimo per i campioni rmH e a circa 60% per i campioni rmC, sia sullo spessore che sulle facciate dei campioni, e localizzate in vicinanza delle estremità armate verticalmente.

Successivamente, la larghezza ed il numero delle lesioni incrementa ed il quadro fessurativo si diffonde su tutte le facciate dei campioni. La resistenza massima è stata raggiunta all'iniziare dello scartellamento dei blocchi.

I campioni sono inoltre stati caratterizzati da un rilevante danneggiamento alle estremità, a causa della deformazione trasversale delle cavità armate e riempite di malta.

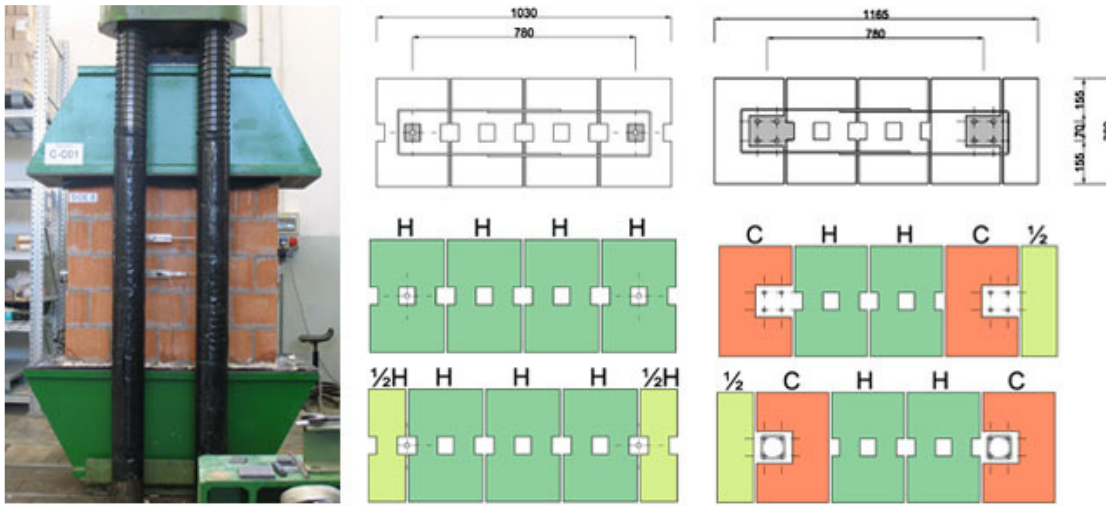


Fig. 3 - Prova di compressione monoassiale (sinistra) e sezioni orizzontali dei campioni testati (destra).

La fig. 4 mostra il diagramma tensioni deformazioni per due campioni, uno per ciascuna serie sperimentale.

La tab. 3 presenta i risultati medi per le due serie in termini resistenza massima a compressione σ_{max} (sull'area lorda), deformazioni verticali ed orizzontali (ϵ_{vmax} , ϵ_{hmax}) e loro rapporto al carico massimo, modulo elastico E, (tra 10-40% e tra 30-60% del carico ultimo) e coefficiente di Poisson ν , valutato sul tratto lineare individuato tra 10-60% del carico ultimo.

Si riporta inoltre la media globale per i sei campioni delle due serie testati, giacché, come si può notare, le differenze tra le due serie sono decisamente limitate, inferiori al 10%.

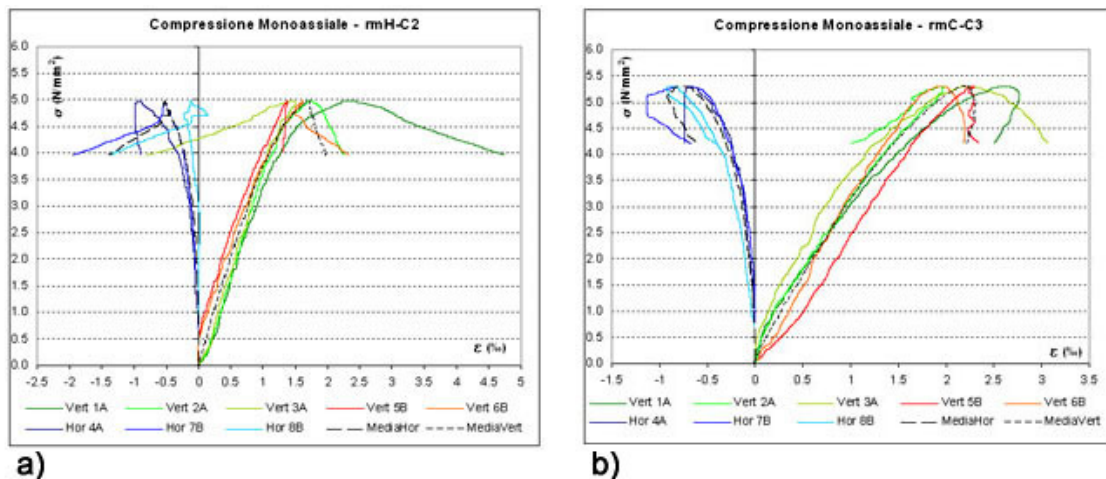


Fig. 4 - Diagrammi tensioni-deformazioni: campione rmH-C2 (a) e rmC-C3 (b).

Tab. 3 - Risultati medi delle prove di compressione monoassiale.

Serie	σ_{max} (N/mm ²)	ϵ_{vmax} ‰	ϵ_{hmax} ‰	$\epsilon_{hmax} / \epsilon_{vmax}$ ‰	$E_{10-40\%}$ (N/mm ²)	$E_{30-60\%}$ (N/mm ²)	ν ‰
rmH-C	4.50	1.49	-0.67	-0.48	3940	3539	-0.11
rmC-C	4.73	1.76	-0.87	-0.50	3561	3152	-0.12
Media Tot	4.62	1.63	-0.77	-0.49	3751	3346	-0.115

Prove di flessione

Le prove di flessione fuori piano sono state condotte su campioni delle dimensioni di circa 1 m di lunghezza per 2.79 m di altezza.

Lo schema di prova scelto per tali test può essere ricondotto alla tipica configurazione di flessione su quattro punti, descritta anche nella UNI EN 1052-2 (5).

La spaziatura tra i punti di applicazione del carico e gli appoggi, però, trattandosi di muratura armata e quindi resistente a flessione, è stata aumentata rispetto a quanto prescritto nella norma, in modo da evitare l'insorgenza di rotture per taglio. La fig. 5 mostra il set-up di prova adottato. Le sezioni orizzontali delle due serie di campioni testati sono le stesse già mostrate in fig. 3.

Il carico fuori piano è stato applicato per mezzo di un attuatore idraulico in controllo di spostamento (0.04 mm/s) ed è stato misurato per mezzo di una cella di carico disposta tra l'attuatore stesso e le travi di ripartizione del carico.

I test sono stati condotti in modalità ciclica, caricando i campioni sino a 20 kN, 40 kN e 60 kN (muratura tipo rmH) e fino a 40 kN, 80 kN e 120 kN per la muratura di tipo rmC, e scaricando i campioni al termine di ogni ciclo. Successivamente, i campioni sono stati portati a carico massimo, e quindi la freccia in mezzeria è stata incrementata sino ad ottenere un degrado di resistenza di almeno 20% del carico massimo.

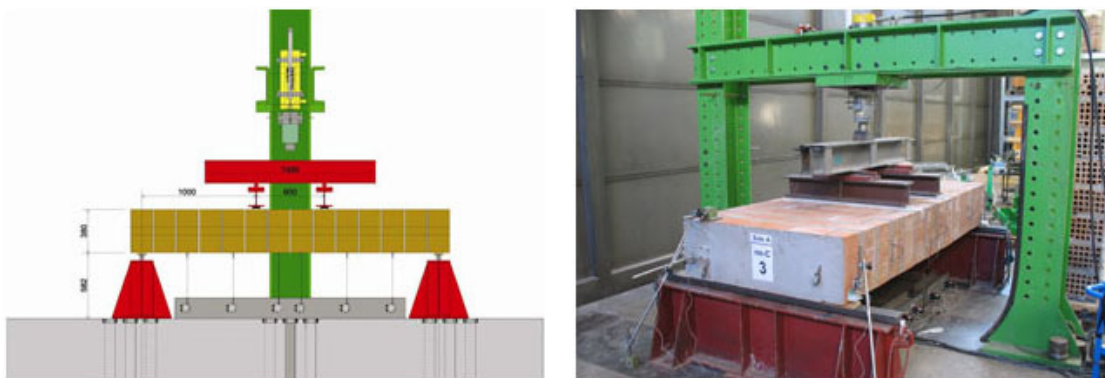


Fig. 5 - Set-up sperimentale per la prova di flessione: schema e vista generale.

Il precarico legato al peso proprio del campione e delle travi di ripartizione del carico (10.3 kN e 12.8 kN rispettivamente per i campioni rmH e rmC) inducono nei campioni un momento flettente in mezzeria pari a 4.2 kNm e 5.0 kNm, che sono all'incirca il 33% del carico di fessurazione atteso.

La deformata è stata rilevata mediante 12 potenziometri a filo (500 mm) collocati all'intradosso dei campioni, 6 lungo ognuna delle due posizioni di armatura verticale [fig. 5].

Si è inoltre monitorato, con altri potenziometri, il cedimento degli appoggi e l'eventuale scorrimento delle barre verticali, e con degli strain gauges, la deformazione delle barre in mezzeria.

L'osservazione sperimentale ha consentito di individuare il raggiungimento di tre stati limite principali durante i test. L'apertura della prima lesione flessionale avviene all'applicazione del carico L_{cr} (corrispondente alla freccia in mezzeria d_{cr}).

Quindi, si raggiunge la resistenza massima L_{max} , in corrispondenza della freccia d_{Lmax} . Infine, lo stato ultimo è stato arbitrariamente fissato ad un valore di carico L_u (corrispondente freccia d_u), al quale si raggiunge un degrado di resistenza pari al 20%, nonostante le prove siano proseguite per livelli di spostamento anche superiori.

Tali valori, insieme ai corrispondenti rapporti tra valori di carico e freccia ai diversi stati limite, sono riportati in tab. 4.

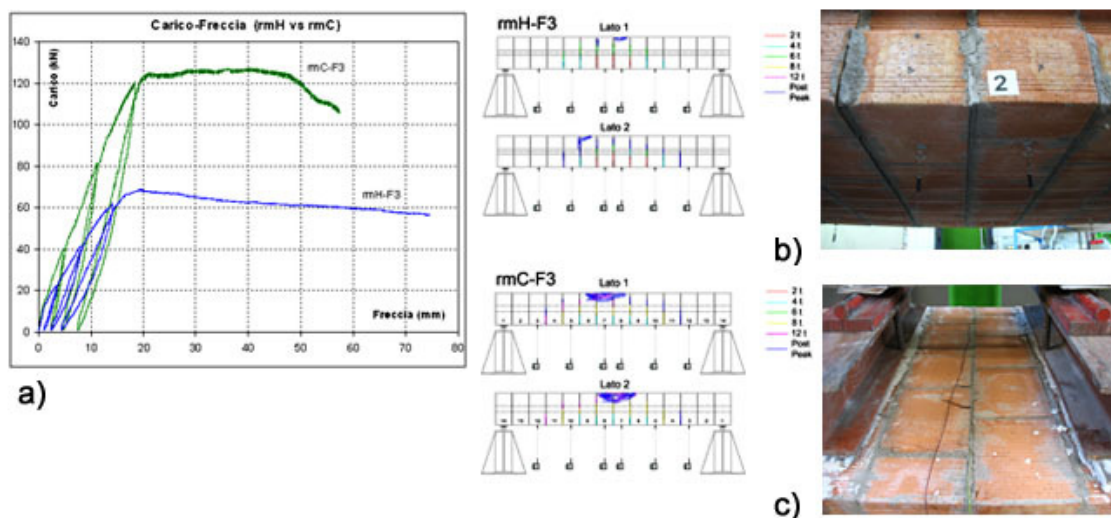


Fig. 6 - a) Diagramma carico-freccia in mezzeria per i due campioni;
b) quadro fessurativo e dettaglio a carico massimo per i campioni rmH;
c) quadro fessurativo e dettaglio a carico massimo per i campioni rmC.

Il comportamento a flessione fino al raggiungimento del primo stato limite, caratterizzato dall'apertura delle prime lesioni all'intradosso nei tre giunti centrali dei campioni per un carico pari al 25% e al 13% del carico massimo, è stato simile per le due serie. In fase fessurata, si osserva chiaramente la maggiore rigidità flessionale dei campioni rmC (valori di rigidità tangente uguali a 7000 N/mm), legata alla maggiore quantità di armatura presente, rispetto ai campioni rmH (4200 N/mm, fig. 6a).

Questo porta allo sviluppo di differenti meccanismi a rottura: snervamento dell'armatura tesa per i campioni rmH [fig. 6b], snervamento dell'armatura e crushing della muratura in zona compressa per gli rmC [fig. 6c].

Tab. 4 - Risultati medi delle prove di flessione.

Serie	L_{cr} (kN)	d_{cr} (mm)	L_{max} (kN)	d_{Lmax} (mm)	L_u (kN)	d_u (mm)	L_{cr}/max (-)	d_{cr}/L_{max} (-)	d_u/L_{max} (-)
rmH-F	17.5	1.9	69.2	17.4	55.3	74.7	0.25	0.11	4.29
rmC-F	16.9	1.3	132.2	23.4	105.5	56.9	0.13	0.06	2.43

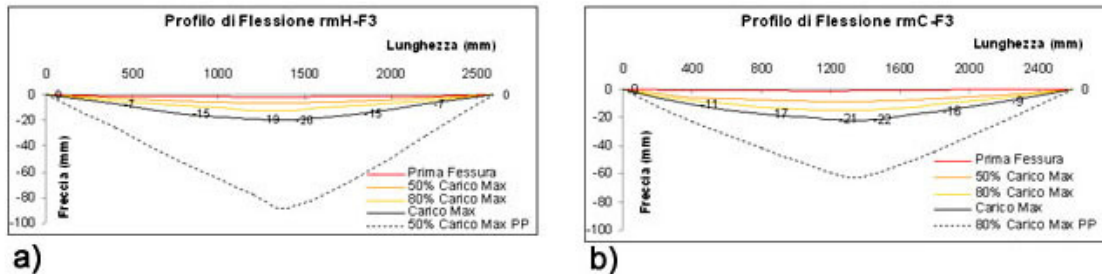


Fig. 7 - Inflessione agli stati limite principali per un campione rmH (a) ed rmC (b).

La resistenza massima per i campioni rmC si è rivelata doppia rispetto a quella dei campioni rmH, in linea con quantità d'armatura verticale inserita.

Il raggiungimento di più alte resistenze collegate a meccanismi di rottura differenti influenza la capacità di deformazione dei campioni rmC, che allo stato limite ultimo si è rivelata più piccola del 24% (57 mm) rispetto a quella dei campioni rmH.

Questo può essere osservato anche dai diagrammi di fig. 7 e dai rapporti di spostamento indicati in tab. 4.

Conclusioni

Nel corso della ricerca sperimentale condotta si è caratterizzato il comportamento meccanico di due sistemi per muratura armata realizzati con blocchi di laterizio a 'C' e ad 'H'.

Dal punto di vista costruttivo, il sistema con blocco a 'C', che consente il posizionamento di una maggiore quantità d'armatura verticale, il disaccoppiamento della stessa, e l'eliminazione delle sovrapposizioni per le armature, si è rivelato anche economicamente competitivo.

Al maggior consumo di malta legato al riempimento delle cavità verticali più ampie del blocco a 'C', infatti, (all'incirca +35% a metro quadrato per l'interasse delle armature utilizzato) corrisponde una riduzione dei tempi di messa in opera (all'incirca -25% a metro quadrato).

I due blocchi di partenza hanno resistenza a compressione simile, quindi i due sistemi per muratura hanno fatto rilevare un comportamento a compressione molto simile, con differenze di appena 5% per la resistenza ed intorno al 10% per i moduli elastici. In caso di flessione fuori piano, invece, la diversa armatura che è possibile disporre influenza significativamente le prestazioni.

Al di là della differente rigidità in fase fessurata per il sistema con blocco a 'C' (quasi il doppio rispetto all'altra tipologia) anche il carico massimo arriva ad essere quasi doppio, pur con una riduzione della capacità deformativa, legata alla diversa modalità di rottura.

I valori di momento massimo sperimentalmente ottenuti sono in linea, o addirittura leggermente superiori, rispetto a quelli che è possibile ricavare mediante un calcolo a rottura che adotti le proprietà dei materiali e le ipotesi comunemente impiegate per le sezioni di cemento armato.

Ringraziamenti

La ricerca descritta nel presente articolo è stata svolta nell'ambito del contratto di ricerca Europeo COOP-CT-2005-018120: 'Developing Innovative Systems for Reinforced Masonry Walls - DISWall'.

Le prove sono state condotte presso il Laboratorio Prove su Materiali Strutturali dell'Università di Padova. L'azienda coinvolta nella produzione dei blocchi e dei campioni sperimentali, Cis Edil S.r.l., e l'azienda che ha fornito la malta per muratura, Tassullo S.p.A., sono partner del progetto.

Si ringraziano gli Ingg. Barbiero e Biliato per il contributo apportato alla ricerca nel corso dello svolgimento della tesi di laurea.

Riferimenti bibliografici

- Zanarini, G., 2000, La muratura armata. Costruire in Laterizio, n. 76, pp.65-71.
- Ministero delle infrastrutture: DM 14/01/2008, Norme Tecniche per le Costruzioni.
- DISWALL, 2005-2007, COOP-CT-2005-18120 "Developing innovative systems for reinforced masonry walls"; coordinatore scientifico: C. Modena, Università di Padova.
- UNI-EN 1052-1 (2001) Metodi di prova per muratura - Determinazione della resistenza a compressione.
- UNI-EN 1052-2 (2001) Metodo di prova per muratura - Determinazione della resistenza a flessione.

