

Ruolo delle murature leggere portate nel comportamento sismico di strutture intelaiate in cemento armato

S. Albanesi, F. Carboni

Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia

T. Albanesi

Dipartimento di Progettazione, Riabilitazione e Controllo delle Strutture Architettoniche, Università degli Studi "G. d'Annunzio" di Chieti, Pescara, Italia

SOMMARIO: Si propone un modello non lineare agli elementi finiti per l'analisi sismica di telai tamponati. La sperimentazione numerica condotta porta a definire le caratteristiche di due bielle no-tension per interpretare il contributo della muratura portata inserita in una maglia di telaio, anche nel caso che questa sia interessata da aperture di finestra o di porta. I risultati mostrano la possibilità di introdurre due distinti coefficienti di riduzione, della rigidezza e della resistenza, per interpretare gli effetti delle bucatore rispetto al pannello intero. Si dimostra l'importanza del ruolo delle murature leggere anche forate.

ABSTRACT: A non linear finite element model for the seismic analysis of infilled frames is proposed. Two no-tension struts to simulate interaction between r.c. frame and infill wall, including windows and door openings, are calibrated on numerical evaluations. Results show that two different reduction factors have to be applied to stiffness and strength in order to consider the effects of openings compared to the full infill panel. The role of light infill walls – even with openings – is proved to be important.

1 INTRODUZIONE

Le murature di chiusura verticale e di partizione interna svolgono un ruolo importante nella risposta sismica di edifici intelaiati in cemento armato condizionandone l'intero sviluppo della risposta evolutiva (Albanesi et al.2003).

La maggior parte degli studi mirati ad individuare il funzionamento dei pannelli murari è volto a riconoscere le garanzie di resistenza che questi offrono in vista dell'inserimento del loro contributo nella stima della capacità resistente di un organismo edilizio esistente. Minore attenzione è stata invece posta alla modellazione del contributo dei pannelli murari nell'interazione con lo scheletro strutturale, al fine di individuarne la funzione nel condizionare la risposta evolutiva. Il celeberrimo caso della cosiddetta "torsio-casa" di Artegna, dapprima danneggiata e poi distrutta dai due sismi che colpiscono il Friuli nel 1976, basta a convincere dell'importanza di murature per le quali la norma non consente di stimare il contributo perché considerate troppo deboli.

Nel presente lavoro si presenta e discute un modello evolutivo per la valutazione del funzionamento dei pannelli murari, anche interessati da bucatore di finestra e di porta, con lo scopo di definire le caratteristiche di un puntone equivalente modificato.

2 INTERAZIONE TRA SCHELETRO STRUTTURALE E PANNELLI MURARI PORTATI

Aspetti fondamentali per descrivere l'interazione pannello struttura sono:

- Valutazione della rigidezza del puntone equivalente che modella il pannello murario ed individuazione delle zone di applicazione delle reazioni;
- Stima della resistenza del puntone equivalente e del suo comportamento a valle della frattura;
- Controllo della capacità di permanere in situ evitando la caduta fuori dal piano.

La valutazione di tali elementi, almeno con l'approssimazione richiesta nelle applicazioni correnti, permette di padroneggiare l'interazione pannelli murari – struttura ed in particolare di controllare l'andamento della deformazione globale in altezza, nonché la posizione del centro istantaneo di rotazione dell'edificio man mano che si fratturano i vari pannelli.

Il collasso dei pannelli murari deve precedere la plasticizzazione della struttura e progredire in modo che i centri di rigidità dei pannelli efficienti rimangano quanto più possibile vicini ai baricentri di piano (gerarchia di resistenza).

La deformazione globale ottimale deve presentare una diminuzione dello spostamento di piano relativo dall'alto verso il basso in modo da evitare la formazione di un piano flessibile ai piani inferiori.

In tal caso le murature portate possono elevare significativamente la rigidità e la resistenza dell'edificio a fronte di sismi di modesta intensità, provvedendo così ad innalzare la soglia limite di primo danneggiamento, mentre per sismi più severi i pannelli possono concorrere ad una significativa quota di dissipazione energetica.

3 MODELLAZIONE PROPOSTA

Nel presente lavoro la struttura in c.a. è stata modellata con elementi *frame* analogamente a quanto operato da altri Autori (Badalà 1997), mentre il pannello è stato modellato con elementi finiti quadrangolari di 125x125 mm² (Fig. 1). Questa dimensione è risultata quella ottimale per ottenere il giusto compromesso tra velocità di elaborazione, precisione dei risultati e riproducibilità delle geometrie reali (Barsotti et al. 1997, Gambarotta e Lagomarsino 1997, Dentamaro e Uva 2000).

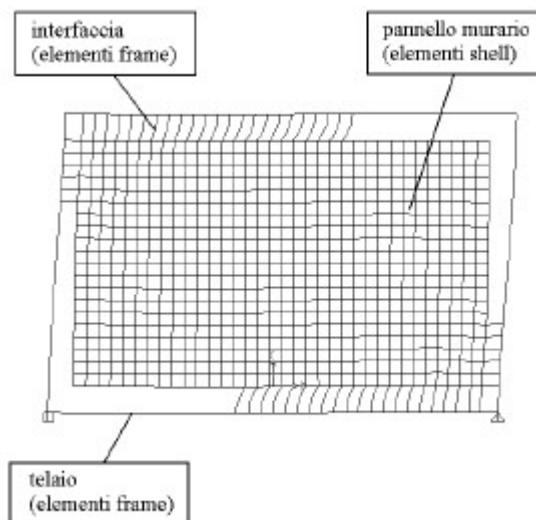


Figura 1. Schema del modello proposto.

La resistenza a taglio degli elementi di interfaccia è stata considerata nulla poiché indagini condotte considerando tale contributo hanno prodotto risultati poco attendibili.

L'analisi procede iterativamente eliminando, di volta in volta, la sola connessione soggetta alla trazione maggiore: si ottengono così, al termine della procedura evolutiva, le sole interazioni di compressione che individuano l'estensione della zona di contatto tra pannello e telaio.

Successivamente, si introducono opportune sconnessioni all'interno della muratura che definiscono le fessure che si originano in prossimità degli spigoli delle eventuali aperture e si propagano poi diagonalmente sino a che la tensione minima non risulta ovunque di compressione o di trazione trascurabile ($<0.125 \text{ Nmm}^{-2}$).

Le caratteristiche meccaniche dei laterizi ($f_{m,ave}(f_{t,ave})$ = resistenza media a compressione(trazione), $E_{m,ave}(G)$ = modulo elastico (a taglio) medio fra il 10 e il 40 % della resistenza, $f_{v0,ave}$ = resistenza media a taglio in assenza di carico verticale (coesione)) sono state dedotte da risultati di prove sperimentali (Calvi e Bolognini 2001) relativi a elementi rispondenti agli attuali stan-

dard di produzione ed impiego edilizio, tenendo anche conto delle argomentazioni generali espresse da alcuni Autori in proposito (Dezi et al. 1998).

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche dei laterizi

| Tipo di carico | $f_{m,ave}$ [N/mm ²] | $E_{m,ave}$ [N/mm ²] |
|--|----------------------------------|----------------------------------|
| Carico parallelo ai fori, costruzione con fori verticali | 3.970 | 5646 |
| Carico parallelo ai fori, costruzione con fori orizzontali | 1.110 | 991 |
| Carico perpendicolare ai fori | 1.100 | 1873 |

| Tipo di carico | $f_{t,ave}$ [N/mm ²] | $f_{v0,ave}$ [N/mm ²] | G [N/mm ²] |
|------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Carico diagonale | 0.150 | 0.090 | 1039 |

Si sono considerati laterizi con fori disposti in orizzontale. Indagini hanno mostrato che oltre il 75% dei pannelli esistenti risulta così realizzato e che in tali casi la rigidezza e la resistenza in direzione verticale ed orizzontale sono simili.

Lo spessore effettivo della tamponatura adottato è pari a 135 mm (blocchi di laterizio da 115 mm e strato di intonaco da 10 mm sulle due facce). La massa volumica adottata è pari a 5.00 kNm⁻³ (valore conforme a quello fornito dalle case produttrici).

Il comportamento del pannello è descritto mediante un mezzo omogeneo ortotropo, con modulo di Poisson pari a 0.25, mentre quello del cemento armato è stato assimilato a quello di un mezzo omogeneo ed isotropo con modulo di Young e di Poisson pari rispettivamente a 25000 Nmm⁻² ed a 0.15, valori desunti da precedenti indagini (Pagano 1994).

Il modello adottato è stato quindi validato confrontando i risultati con quelli sperimentali (Badalà 1997, Calvi e Bolognini 2001).

Si sottolinea che il modello non tiene conto del fatto che, al procedere dei fenomeni di distacco tra pannello e telaio, si verifica una redistribuzione delle tensioni che, in alcune zone, potrebbe ripristinare il contatto perso precedentemente. Tale fenomeno risulta in effetti poco influente (differenze dell'1÷2%) come si è potuto verificare in una seconda fase inserendo ulteriori elementi frame all'interfaccia (a rigidezza assiale nulla) che si attivano in caso di perdita del contatto, consentendo di monitorare le deformazioni e quindi di ripristinare la connessione ove le parti si riacvicinano tra loro. Pertanto il modello proposto è da considerarsi comunque accurato.

4 MODELLO DI PUNTO EQUIVALENTE IN PRESENZA DI APERTURE

Il pannello con aperture può essere modellato come un pannello intero avente resistenza ultima, rigidezza (iniziale e secante) e carico di prima fessurazione ridotti (Decanini et al. 1994, Papia e Cavalieri 1999).

In sostanza la dimensione trasversale della biella equivalente $w_{p,f}$ va ridotta rispetto a quella corrispondente al pannello intero $w_{p,p}$: $w_{p,f} = \mathbf{r} w_{p,p}$.

In letteratura sono proposti modelli semplificati nei quali gli spostamenti di fessurazione per il pannello pieno e quello forato sono assunti uguali, per cui alla riduzione di rigidezza corrisponde la medesima riduzione di resistenza: $f_{p,f} = \mathbf{r} f_{p,p}$.

In presenza di apertura eccentrica, le caratteristiche dei puntoni equivalenti da considerare nelle due direzioni di carico sono differenti. Dalle elaborazioni numeriche eseguite e presentate sinteticamente nel paragrafo successivo è stato possibile definire accuratamente rigidezza e resistenza di tali puntoni in funzione dei valori relativi al pannello intero.

In particolare, confrontando la risposta del telaio tamponato con e senza aperture si sono ricavati i valori dei fattori riduttivi della rigidezza \mathbf{r}_s e della resistenza \mathbf{r}_r al variare della dimensione e della posizione della buca e della dimensione dei telai, risultando $\mathbf{r}_s = w_{p,f} / w_{p,p}$.

Considerando i meccanismi di crisi individuati nella normativa italiana (AA. VV. 1997, AA. VV. 1999) si è definito $\mathbf{r}_r = \min(S_{p,p}^i, S_{p,f}^i)$ dove S^i rappresenta la generica tensione di compressione, di trazione o di taglio (normalizzato quest'ultimo in funzione della compressione verticale agente). Questa assunzione è approssimata in quanto si dovrebbe scegliere \mathbf{r}_r in funzione del tipo di sollecitazione che determina il collasso.

Il valore di \mathbf{r}_r è determinato quindi dalla seguente equazione:

$$r_r = \min \left\{ \begin{array}{l} s_{\min, pp}^- / s_{\min, pf}^- \\ s_{\max, pp}^+ / s_{\max, pf}^+ \\ [t / (c + \mu_0 s_v)]_{\max, pp} / [t / (c + \mu_0 s_v)]_{\max, pf} \end{array} \right\} \quad (1)$$

dove s^- = tensione in direzione delle isostatiche di compressione, s^+ = tensione in direzione delle isostatiche di trazione, s_v = tensione di compressione in direzione verticale, t = tensione tangenziale nel piano orizzontale, c = coesione del pannello murario, μ_0 = coefficiente di attrito del pannello murario, gli indici pp e pf fanno riferimento ai valori calcolati rispettivamente nel pannello pieno e nel pannello forato.

Le analisi condotte permettono di risolvere un problema evidenziato da alcuni autori (Braga e Liberatore 1991) circa l'affidabilità dei modelli macroscopici: il metodo della biella compressa, assumendo un andamento costante delle tensioni, non è in grado di cogliere i picchi di sforzo ai vertici del pannello e quindi sovrastima la resistenza a taglio del pannello medesimo.

5 ANALISI NUMERICA

Sono state condotte analisi numeriche su telai tamponati al fine di definire le caratteristiche geometriche e meccaniche del tradizionale modello di puntone diagonale in funzione della reale conformazione del pannello murario.

Si sono considerate due tipologie di telai: forte (Tipo A) e debole (Tipo B) le cui caratteristiche geometriche sono riportate in Figura 2.

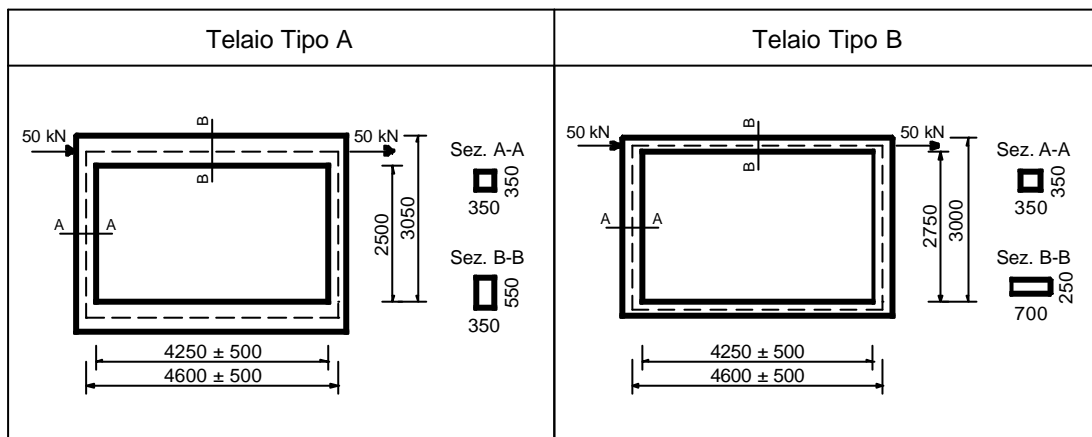


Figura 2. Geometria dei telai.

Si sono considerate tamponature costituite da laterizi con percentuali di foratura (60÷70%) ben superiori a quelle imposte dalla normativa italiana per i pannelli murari a funzione strutturale garantita ($\leq 45\%$) così da trovare corrispondenza con le più diffuse applicazioni reali.

Oltre a studiare la situazione di telaio con tamponatura intera, si è indagato il caso di tamponatura con bucatore di porta e di finestra, di varie dimensioni e con differenti posizioni in orizzontale, al fine di valutare l'influenza di tali singolarità geometriche sul comportamento dell'intero pannello.

Tabella 2. Caratteristiche geometriche delle aperture

| | |
|--|------------------------------|
| Altezza della soglia finestra dalla trave inferiore [mm] | 875 |
| Finestra ($a \times b$) [mm ²] | $(1250 \pm 250) \times 1375$ |
| Porta ($a \times b$) [mm ²] | $(1250 \pm 250) \times 2250$ |

Per il telaio TIPO A si è anche considerata un'apertura estesa per l'intera altezza del pannello, ma i risultati hanno evidenziato come in tali situazioni il contributo in rigidità conferito dalla tamponatura sia pressoché nullo.

Per il telaio TIPO A si è inoltre variato lo spessore del pannello di tamponatura; tale analisi ha mostrato che lo spessore è praticamente ininfluenza sul fattore di riduzione della rigidità mentre incide sul fattore di riduzione della resistenza potendo variare il meccanismo di crisi a seguito della differente rigidità del pannello.

6 RISULTATI DELL'ANALISI NUMERICA

Per brevità si riportano solo alcuni dei risultati delle analisi eseguite.

In Figura 3 e in Figura 4 è mostrato l'andamento delle tensioni di compressione all'interno del pannello del telaio Tipo A e all'interno del telaio Tipo B rispettivamente per apertura di finestra e di porta ($a = 1250$ mm). I segmenti di colore bianco rappresentano le sconessioni all'interno del pannello.

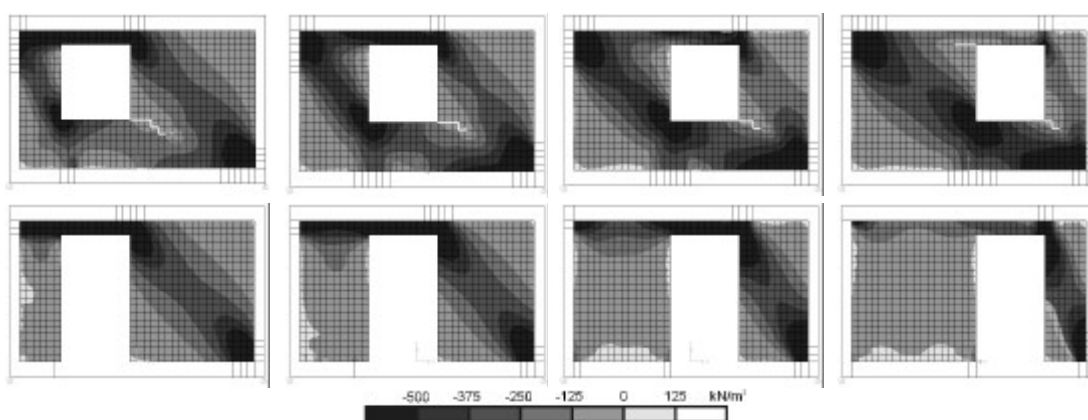


Figura 3. Telaio Tipo A con finestra e con porta – andamento delle tensioni.

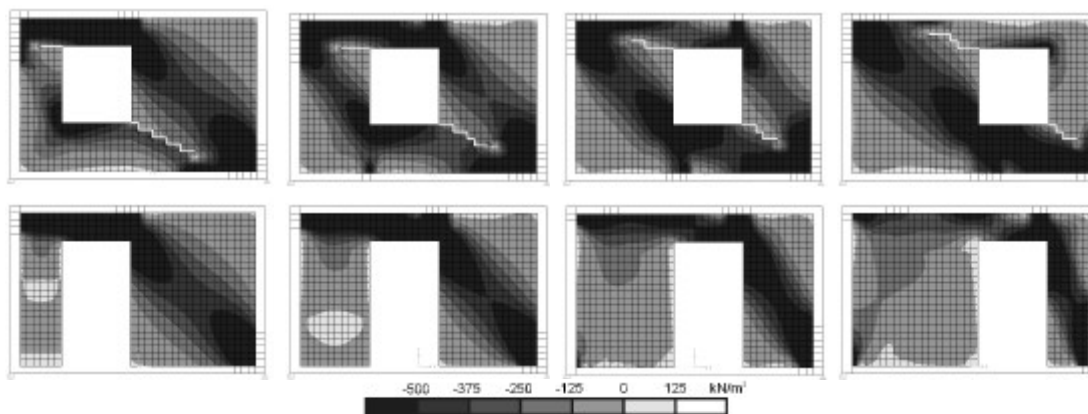


Figura 4. Telaio Tipo B con finestra e con porta – andamento delle tensioni.

È emerso come in presenza di aperture aumenti il numero dei possibili meccanismi di collasso del pannello, potendosi generare ulteriori rotture per schiacciamento, scorrimento o eccessiva trazione diagonale in uno spigolo o in prossimità di queste. A tali meccanismi è dovuta la caduta di resistenza osservata nelle tamponature con porta; l'effetto è poco risentito invece nelle tamponature con finestra dove i flussi di tensione passano prevalentemente al di sotto dell'apertura lasciandoci lo spigolo superiore perlopiù scarico.

In Figura 5 e Figura 6 è diagrammato l'andamento di r_s e r_r in funzione della posizione x e della larghezza a della bucatura di finestra o di porta rispettivamente per il telaio Tipo A e Tipo B (essendo costante la geometria del pannello $l \times h$ e l'altezza dell'apertura b).

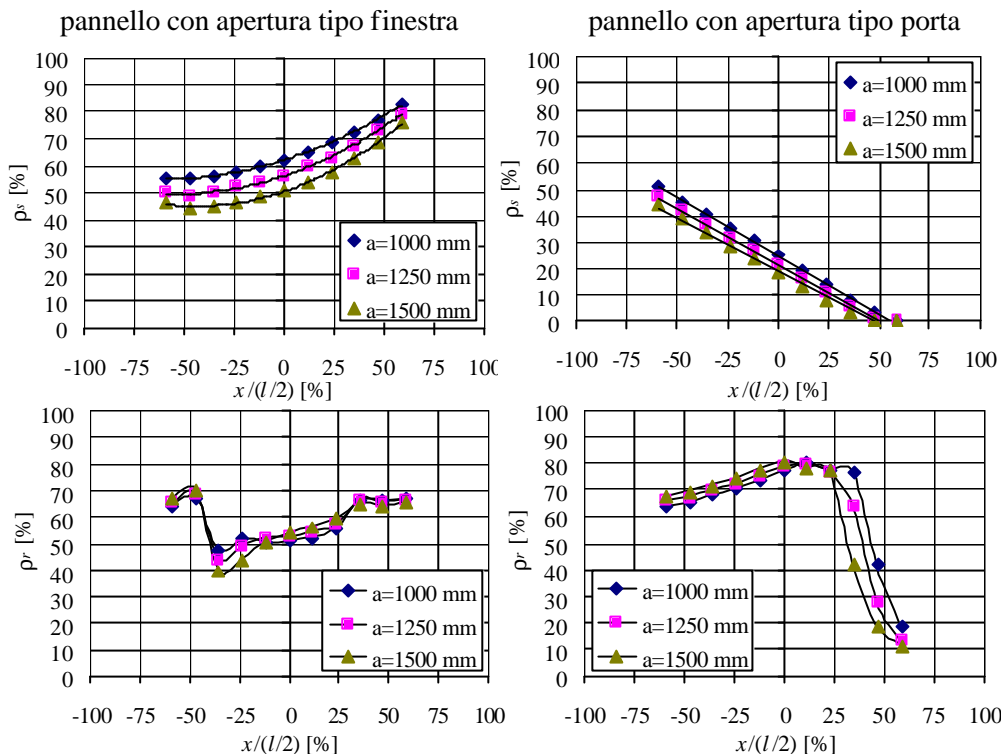


Figura 5. Telaio Tipo A con finestra e con porta – andamento di r_s (sopra) e r_r (sotto).

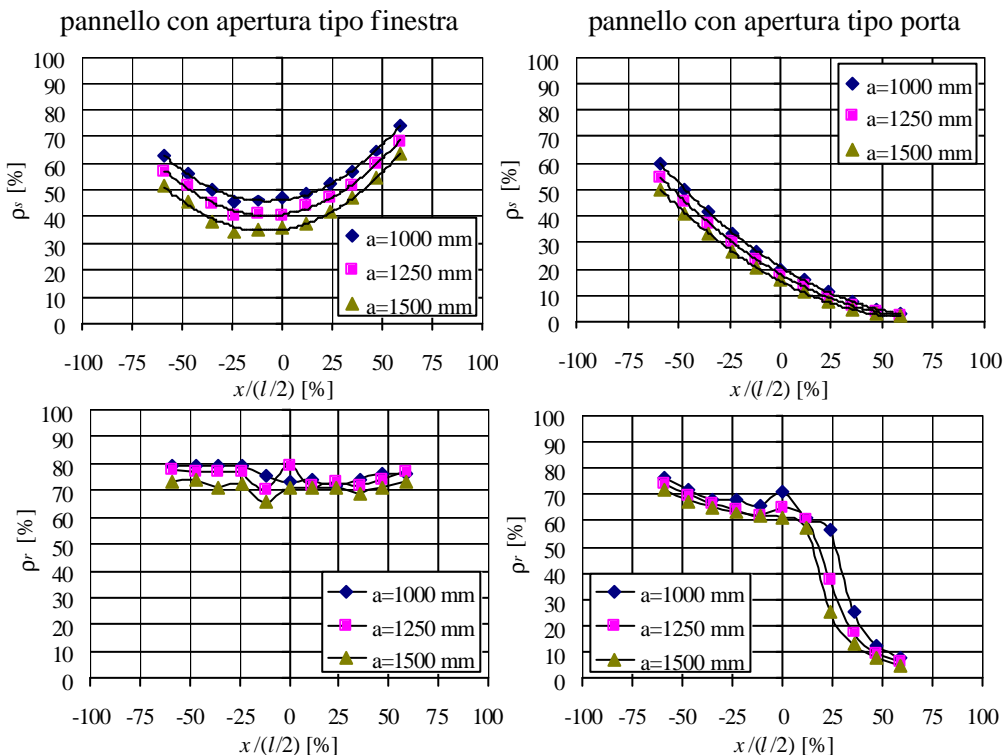


Figura 6. Telaio Tipo B con finestra e con porta – andamento di r_s (sopra) e r_r (sotto).

In Figura 7 e Figura 8 è diagrammato l'andamento di r_s e r_r in funzione della posizione x della bucatura di finestra o di porta e della lunghezza l del pannello rispettivamente per il telaio Tipo A e Tipo B (essendo costante la geometria dell'apertura $a \times b$ e l'altezza del pannello h).

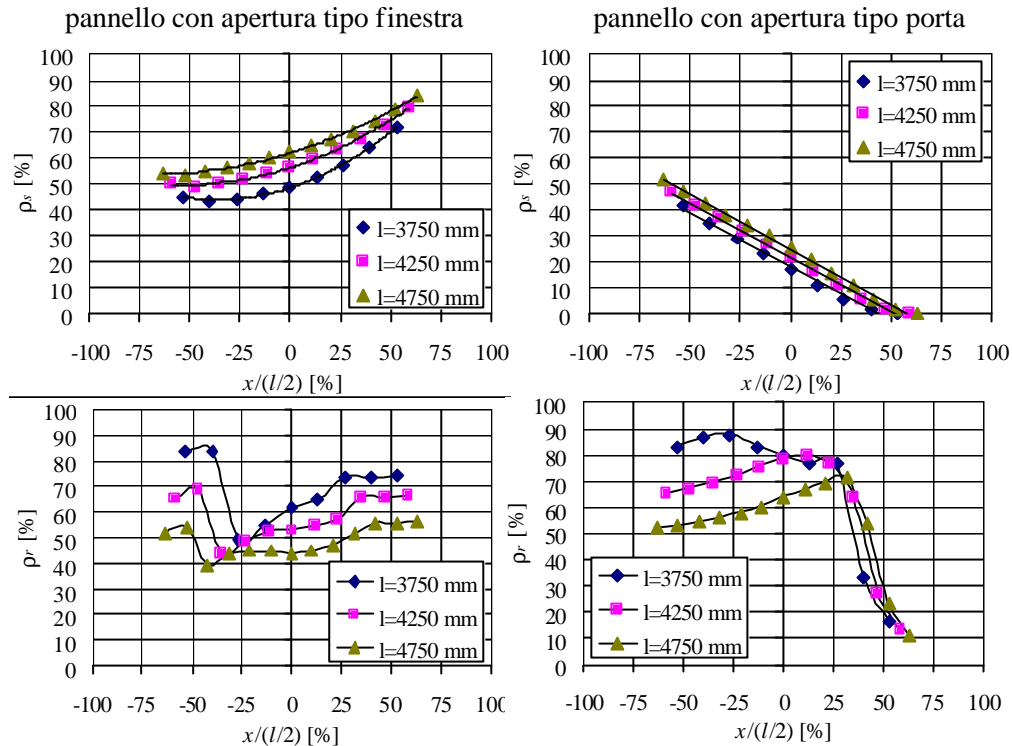


Figura 7. Telaio Tipo A con finestra e con porta – andamento di r_s (sopra) e r_r (sotto).

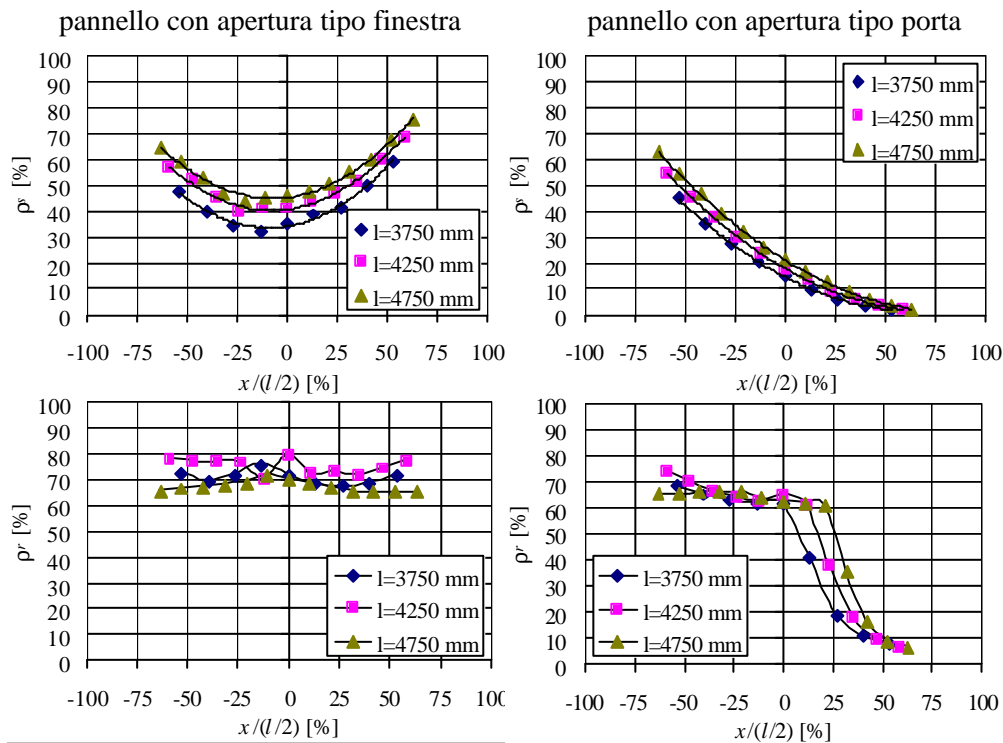


Figura 8. Telaio Tipo B con finestra e con porta – andamento di r_s (sopra) e r_r (sotto).

Nel caso di apertura centrata in Figura 9 è riportato l'andamento di r_s e r_r in funzione della larghezza a della bucatura di finestra o di porta per il telaio Tipo A e Tipo B.

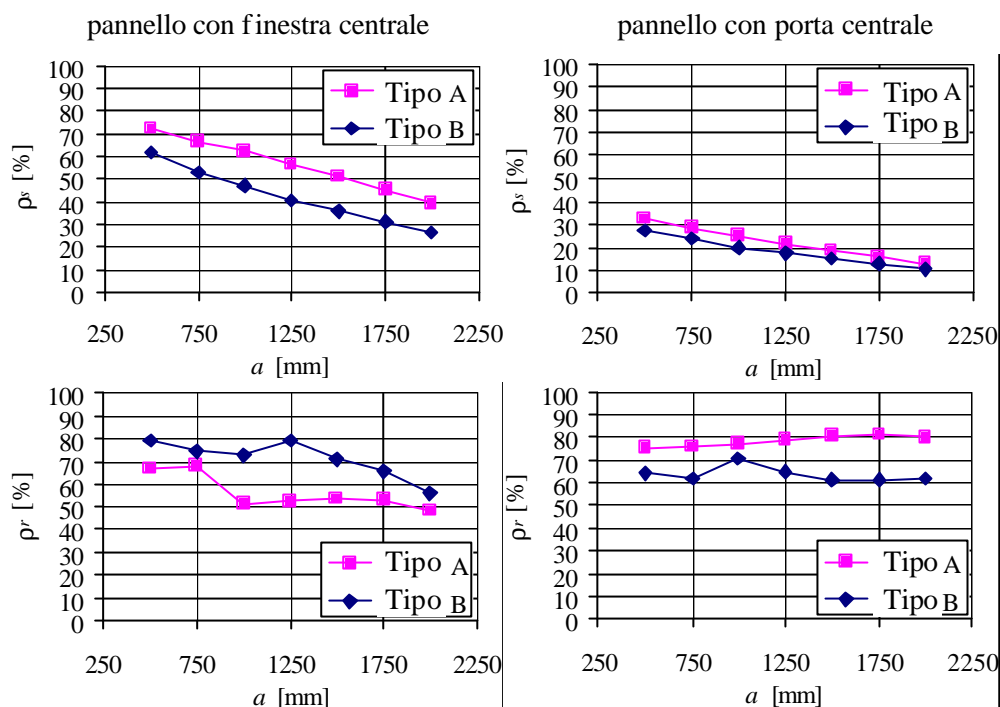


Figura 9. Telaio Tipo A e Tipo B con apertura centrale – andamento di r_s (sopra) e r_r (sotto).

Sia per il telaio Tipo A che Tipo B r_s decresce linearmente al crescere della larghezza dell'apertura di porta o di finestra ed al ridursi della larghezza del pannello. In particolare risulta $\Delta r_s \cong -22\Delta a$ in presenza di finestre e $\Delta r_s \cong -12\Delta a$ in presenza di porte.

In presenza di finestra nel telaio Tipo A la rigidezza delle due bielle è tanto più differente tanto più eccentrica risulta l'apertura, con r_s che, rispetto al valore di 55% per apertura centrata, può scendere fino al 50% per una biella e salire fino al 80% per l'altra. Nel telaio Tipo B invece la rigidezza delle due bielle è praticamente uguale con r_s che può variare tra il 40% (finestra centrata) e il 60% (finestra eccentrica). Si può osservare una sorta di anomalia localizzata nell'andamento di r_r dovuta ad una diversa attitudine dell'apertura a far passare il flusso di tensioni o prevalentemente al di sotto (tratto di destra) o al di sopra di essa (tratto di sinistra).

In presenza di porta la differenza tra i due telai è meno marcata. In entrambi i casi le due bielle presentano differenze in rigidezza tanto più forti tanto più eccentrica risulta l'apertura con r_s che, rispetto al valore di 20% per apertura centrata, può salire fino al 50% per una e scendere a valori trascurabili per l'altra.

Sia per il telaio Tipo A che Tipo B r_r decresce linearmente al crescere della larghezza dell'apertura di finestra mentre resta praticamente costante in presenza di porta, dove per apertura centrata è pari ad 80% e a 60% rispettivamente per il primo e il secondo tipo di telaio. La larghezza del pannello incide significativamente su r_r solo per il telaio Tipo A. In particolare la differenza in resistenza tra le due bielle diventa tanto più marcata quanto più corto è il pannello in dipendenza del fatto che i fenomeni di rottura a taglio del pannello diventano più importanti.

Per entrambi i telai in presenza di finestra la resistenza delle due bielle è analoga con r_r che può variare tra il 50% (eccentricità < 25% della semi-larghezza del pannello) e il 65% per il telaio Tipo A e con r_r praticamente costante pari a 75% per il telaio Tipo B.

In presenza di porta la resistenza delle due bielle diventa sensibilmente diversa quando l'eccentricità dell'apertura è superiore al 25% (15%) della semi-larghezza del pannello per il telaio Tipo A (Tipo B), con r_r che può variare tra il 65-75% per una biella e scendere fino al 10% per la biella in direzione opposta. La brusca caduta di resistenza è attribuibile a fenomeni di scorrimento e di trazione che provocano la rottura della porzione di pannello compresa tra lo spigolo superiore dell'apertura e lo spigolo vicino del telaio.

I risultati esposti sono stati ottenuti per un sovraccarico nullo sulle travi del telaio. Studiando l'influenza dei carichi distribuiti, si osserva un andamento di r_s costante e quindi indipendente dal carico ed un valore di r_r decrescente con l'entità dei carichi. L'andamento dei fattori di riduzione

al variare dell'entità del carico lineare applicato sulle travi del telaio, per un pannello con apertura centrata ($a = 1250$ mm, $l = 4250$ mm) è riportato in Figura 10.

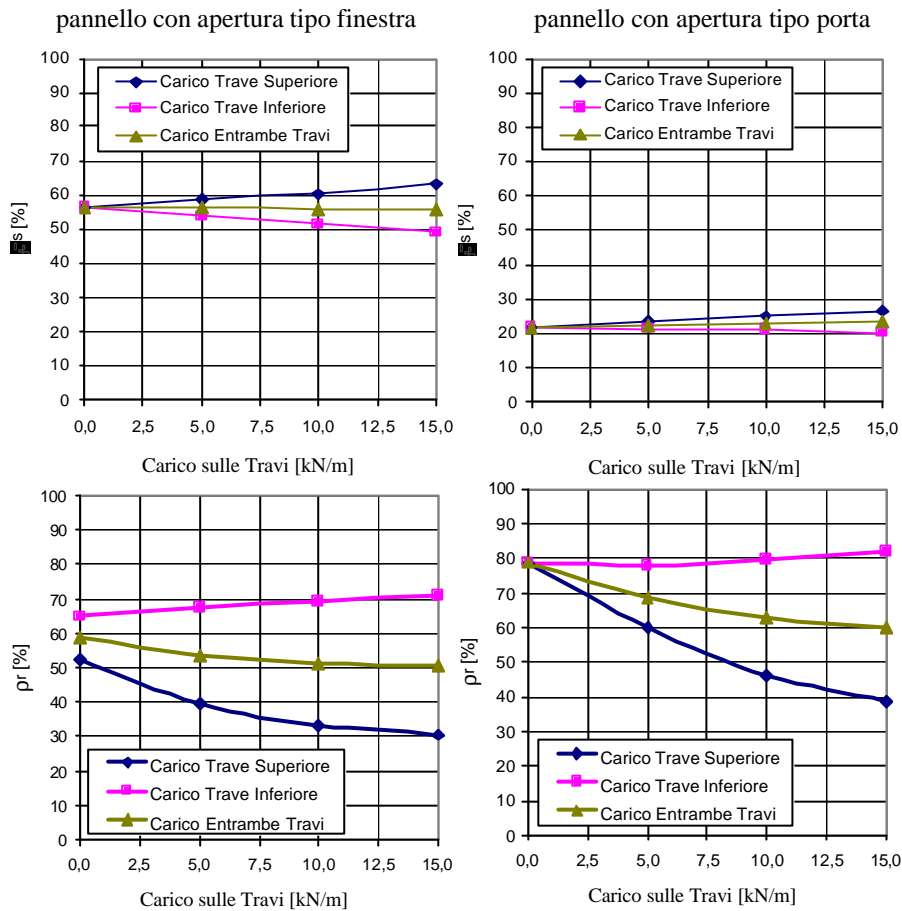


Figura 10. Telaio Tipo A con finestra e con porta – andamento di r_s (sopra) e r_r (sotto).

7 LUNGHEZZA EFFICACE DELLA BIELLA EQUIVALENTE

Dalle analisi condotte si è potuto evidenziare come sia possibile correlare (seppure con approssimazione) l'andamento del fattore riduttivo in rigidezza con un parametro geometrico espressione dell'interferenza generata dall'apertura nella formazione del meccanismo resistente del puntone equivalente.

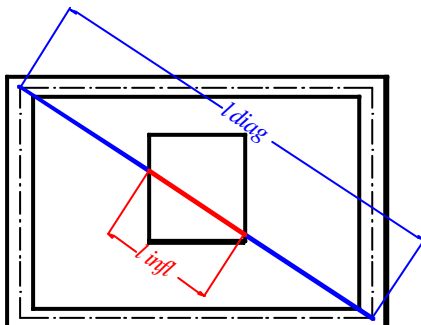


Figura 11. Lunghezza di influenza dell'apertura.

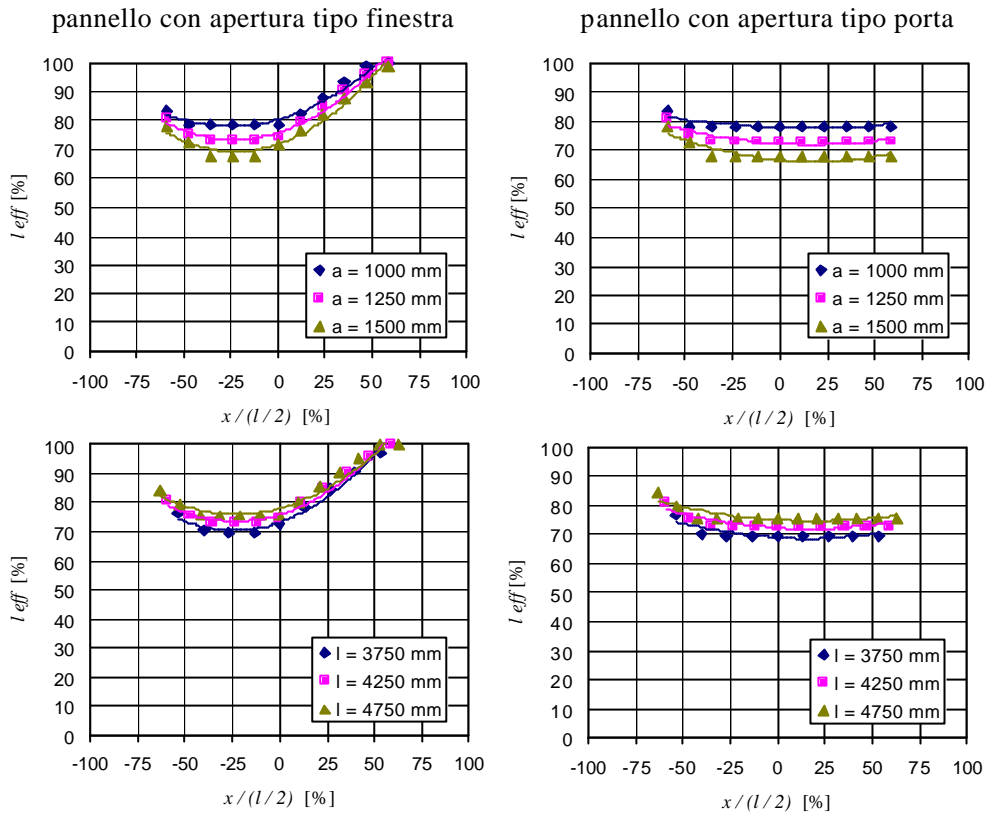


Figura 12. Telaio tipo A con finestra e con porta – andamento di l_{eff} .

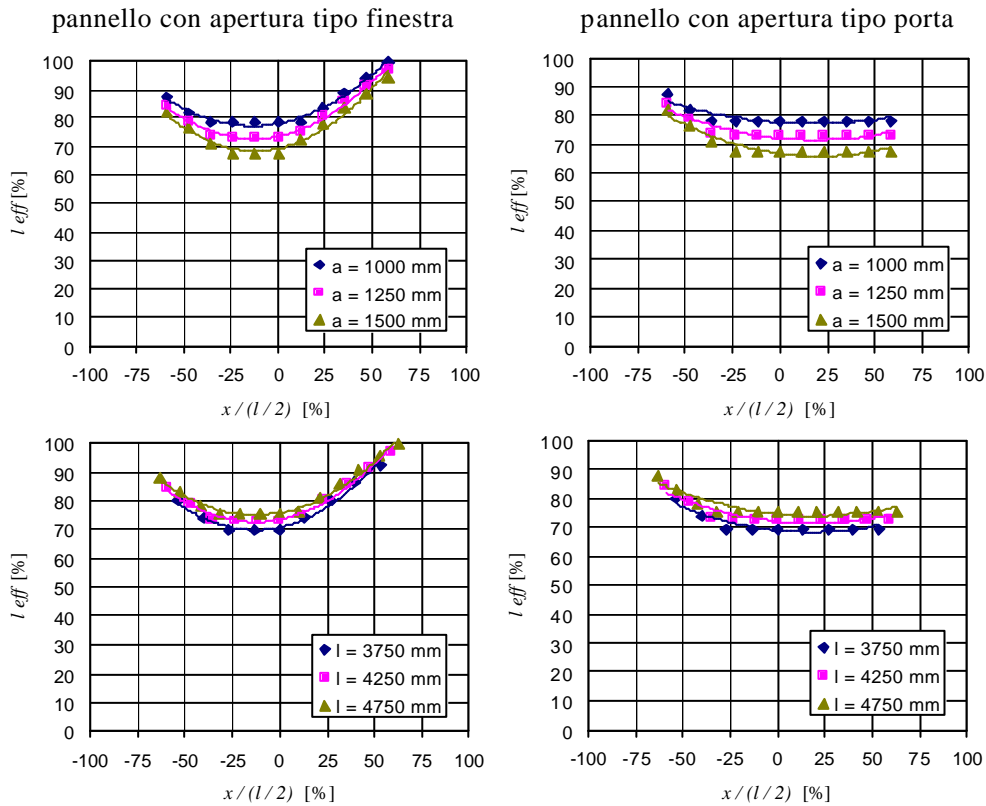


Figura 13. Telaio tipo B con finestra e con porta – andamento di l_{eff} .

Considerando il tratto di puntone diagonale (di lunghezza l_{diag}) attraversato dall'apertura (per la lunghezza l_{infl}) (Fig. 11) si definisce lunghezza efficace del puntone equivalente l_{eff} :

$$l_{eff} = (l_{diag} - l_{infl}) / l_{diag} \quad (2)$$

Analizzando i valori di l_{eff} si osserva che (specie nel caso di pannello di tamponamento con finestra) nei casi esaminati esiste una legge di proporzionalità diretta con r_s . È auspicabile un approfondimento di questo interessante aspetto onde poterne valutare la concretezza e l'attuabilità nella pratica professionale.

8 CONCLUSIONI

Si è proposto un modello agli elementi finiti che tiene conto evolutivamente del quadro fessurativo che si attiva all'interfaccia pannello-telaio ed all'interno della tamponatura. La sperimentazione numerica condotta con il modello proposto consente di valicare la consueta tecnica di considerare due bielle no-tension per interpretare il contributo della muratura portata inserita in una maglia di telaio, anche nel caso che questa sia interessata da aperture di finestra o di porta.

I risultati mostrano la possibilità di introdurre due distinti coefficienti di riduzione, della rigidezza e della resistenza, che, applicati al puntone equivalente che modella un pannello integro, permettono di considerare gli effetti di porte e finestre, anche tenendo conto della loro posizione.

Tali coefficienti riduttivi assumono andamenti anche diversi tra loro, specie in dipendenza della posizione delle aperture.

Ai fini di un'accurata descrizione di un edificio intelaiato, le significative rigidezze di murature leggere anche forate, in genere trascurate dalla normativa ai fini della garanzia della sicurezza, non possono essere ignorate.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AA.VV. 1997. Circ. Min. LL.PP. n.° 65, AA.GG. 10 aprile 1997, Istruzioni per l'applicazione delle «Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche» di cui al D.M. 16 gennaio 1996. *Gazzetta Ufficiale* n.° 97 suppl., 28 aprile 1997.
- AA.VV. 1999. D.G.R. Umbria 5180/98 e D.G.R. Marche 2153/98 in Attuazione L. 61/98, Terremoto in Umbria e Marche del 1997: Criteri di calcolo per la progettazione degli interventi. Roma: Ed. Sallustiana.
- Albanesi, S., Albanesi, T., Carboni, F. 2003. The influence of infill walls in r.c. frame seismic response. *Proceedings of the International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures*. Ancona, 2003. (in stampa)
- Badalà, A. 1997. L'effetto dissipativi delle tamponature negli edifici in c.a. *Proceedings of the Workshop Testing and Modelling Innovative System for Seismic Response Control of Building and Bridges*. Napoli, 1996, 139-158.
- Barsotti, R., Ligarò, S., Royer-Carfagni, G. 1997. Sul comportamento in fase II di telai in c.a. con tamponamento in muratura soggetti a carichi orizzontali. *Atti del Convegno L'Ingegneria Sismica in Italia*. Taormina, 1997, 297-304.
- Braga, F., Liberatore, D. 1991. Domini di resistenza di pannelli in muratura secondo il modello del campo di tensione a ventaglio multiplo. *Atti del Convegno L'Ingegneria Sismica in Italia*. Palermo, 1991, 371-383.
- Calvi, G.M., Bolognini, D. 2001. Risposta sismica di telai in c.a. tamponati con pannelli in muratura debolmente armati. *Costruire in Laterizio*, 80: 64-71.
- Decanini, L.D., Gavarini, C., Bertoldi, S.H., Mollaioli, F. 1994. Modelo simplificado de paneles de mamposteria con aberturas incluidos en marcos de concreto reforzado y metalicos. Comparacion y calibration con resultados experimentales y numericos. *Proceedings of the International Seminar Earthquake Prognostics*. San José, September 1994.
- Dentamaro, C., Uva, G.R. 2000. Modellazione del danneggiamento nelle murature armate soggette a forze orizzontali cicliche. *Ingegneria Sismica*, 3: 34-41.
- Dezi, L., Nuti, C., Vestroni, F., Albanesi, S. 1998. Rapporto sulle tipologie edilizie e sui danni. Comitato Tecnico-Scientifico della Regione Marche, Sisma Marche-Umbria 1997/1998.
- Gambarotta, L., Lagomarsino, S. 1997. Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. Part II: The continuum model and its applications. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26: 441-462.
- Pagano, M. 1994. Contributo statico dei mattoni forati nei telai in cemento armato. *Costruire in Laterizio*, 42: 550-557.
- Papia, M., Cavaleri, L. 1999. Effetto irrigidente dei tamponamenti nei telai in c.a.. *Proceedings of the Meeting PRIN*. 1999.