

VALIDAZIONE SCIENTIFICA

Allo scopo di mostrare l'affidabilità del software utilizzato, si riportano di seguito i contenuti di una delle pubblicazioni relative al macro-elemento adottato, ed in particolare un articolo presentato al convegno ANIDIS del 2004: *Caliò, I., Marletta, M., Pantò, B., 2004. Un semplice macro elemento per la valutazione della vulnerabilità sismica di edifici in muratura. Atti del XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Genova 25-29 gennaio 2004.* Nel paragrafo relativo alle applicazioni numeriche sono riportati alcuni confronti tra i risultati ottenuti con il macro-elemento adottato e risultati sperimentali o relativi a modellazioni condotte con altri software.

1 INTRODUZIONE

La valutazione della resistenza sismica di un'opera civile esistente rappresenta un problema complesso di enorme rilevanza applicativa. Basti pensare che buona parte del patrimonio edilizio esistente ricade in zone che solo di recente sono state riconosciute a elevato rischio sismico. Per diversi anni tale problema è stato fortemente sottovalutato fino a quando, a seguito di drammatici crolli, ha assunto un'enorme rilevanza sociale e politica al punto che è in corso di totale ridefinizione sia la normativa sismica che la mappatura delle zone sismiche italiane. Tale presa di coscienza, senz'altro positiva, pone nello stesso tempo nuove e più complesse problematiche in ambito professionale che richiedono un insieme di strumenti e di competenze che, per cultura e per formazione, in genere non sono proprie del patrimonio di conoscenze del

professionista che opera nel settore dell'ingegneria strutturale. Il presente lavoro riporta i primi risultati di una ricerca che si prefigge come obiettivo la definizione di uno strumento di calcolo avanzato, ma nello stesso tempo applicabile in ambito professionale, per lo studio del comportamento sismico e le analisi di vulnerabilità di edifici in muratura. A tale scopo, prendendo spunto dalle modellazioni semplificate esistenti (Braga e Dolce 1990; Braga, Liberatore e Spera 1997; Brencich e Lagomarsino 1997; D'Asdia e Viskovic 1993; D'Asdia e Viskovic 1996; Magenes e Calvi 1996) e dall'esperienza maturata nell'ambito della modellazione semplificata di pareti in calcestruzzo armato (Vulcano, Bertero e Colotti 1988), è stato introdotto un modello discreto equivalente ad una porzione di muratura, macro-elemento, che con un costo computazionale estremamente ridotto rispetto a una modellazione agli elementi finiti, riesce a cogliere il comportamento non lineare di un'intera parete e, per assemblaggio, di un intero edificio. E' evidente che l'efficacia della macro-modellazione è strettamente legata a una corretta definizione dei parametri che stabiliscono l'equivalenza tra il modello continuo e quello discreto. Il macro-modello proposto può rappresentare un intero maschio murario sollecitato nel proprio piano, attraverso un singolo elemento o mediante una mesh di elementi. Tuttavia esso è stato concepito con l'obiettivo di rappresentare un intero maschio murario senza la necessità di utilizzare una mesh di elementi. Per raggiungere un tale obiettivo esso è stato concepito in modo da simulare il comportamento meccanico non-lineare della porzione di elemento murario che si vuole rappresentare considerandone la limitata resistenza a trazione e a taglio e descrivendone i principali meccanismi di rottura. L'efficacia della modellazione proposta è stata valutata mediante analisi

incrementali condotte su pannelli e pareti murarie che sono state oggetto di ricerca teorica e/o sperimentale. In particolare verranno effettuati alcuni confronti con i risultati ottenuti da altri autori utilizzando altre metodologie semplificate proposte nella letteratura (Magenes, Bolognini e Braggio 2000) o dal confronto con più onerose modellazioni agli elementi finiti (Gambarotta e Lagomarsino 1997).

2 IL MACROMODELLO PROPOSTO

Il modello proposto è costituito da un quadrilatero articolati i cui lati sono infinitamente rigidi e i cui vertici, incernierati, sono collegati da molle diagonali e da un insieme discreto di molle distribuite lungo il perimetro del quadrilatero (Fig. 1). Queste ultime stabiliscono il legame non-lineare con i quadrilateri eventualmente adiacenti o con i supporti.

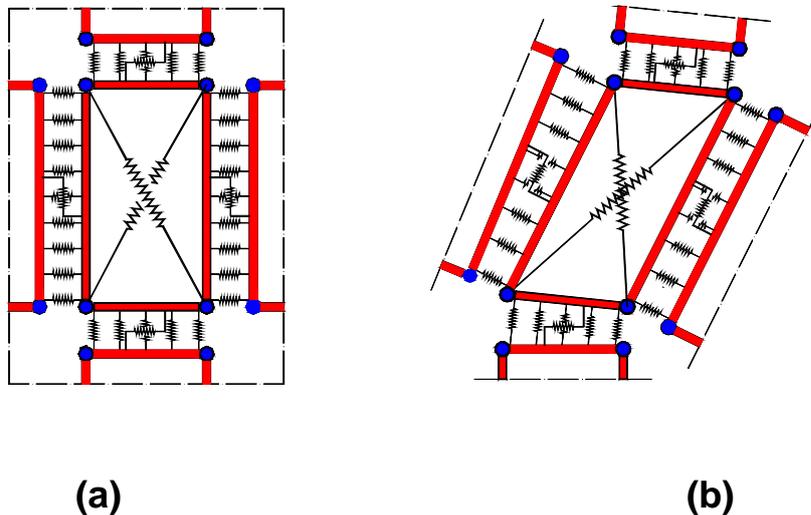


Figura 1. Porzione di parete modellata mediante una *mesh* di elementi *pannello*. (a) In configurazione indeformata; (b) in configurazione deformata.

Per comodità di trattazione l'insieme discreto delle molle distribuite lungo un generico lato nel seguito verrà denominato *interfaccia*, mentre il quadrilatero articolato con le due molle diagonali verrà denominato *pannello*.

L'interfaccia, che per scelta nella presente trattazione non è rappresentata da un elemento continuo ma piuttosto da un numero finito ma arbitrario di molle, oltre a costituire la connessione tra pannello e pannello, può rappresentare anche l'elemento di connessione tra un pannello e l'esterno.

Risulta facile verificare che una tale modellazione è in grado di schematizzare i principali meccanismi di collasso di una porzione di elemento murario soggetto ad azioni orizzontali nel proprio piano. Tali meccanismi sono schematicamente rappresentati in Figura 2 e possono essere così riassunti: rottura per schiacciamento e/o ribaltamento, rottura a taglio per fessurazione diagonale e rottura a taglio per scorrimento. A ciascuno dei meccanismi di rottura risulterà possibile associare criteri di resistenza differenti.

La Figura 3 mostra chiaramente che la cinematica del modello consente una schematizzazione semplice e realistica dei principali meccanismi di rottura di un elemento di parete soggetto ad azioni orizzontali nel proprio piano. Il letto di molle ortogonali ai lati del quadrilatero, oltre a concentrare la deformabilità assiale e flessionale della porzione di muratura che rappresentano, serve a simulare i meccanismi di rottura per schiacciamento e per ribaltamento (Fig. 3a). Il legame costitutivo delle

molle diagonali deve essere tale da descrivere la deformabilità a taglio della porzione di muratura che si vuole discretizzare e il corrispondente comportamento non-lineare a rottura per fessurazione diagonale. Il meccanismo di rottura a taglio per scorrimento risulta invece descritto dalle molle non lineari che risultano poste nella stessa direzione dei lati rigidi che connettono (Fig. 3b).

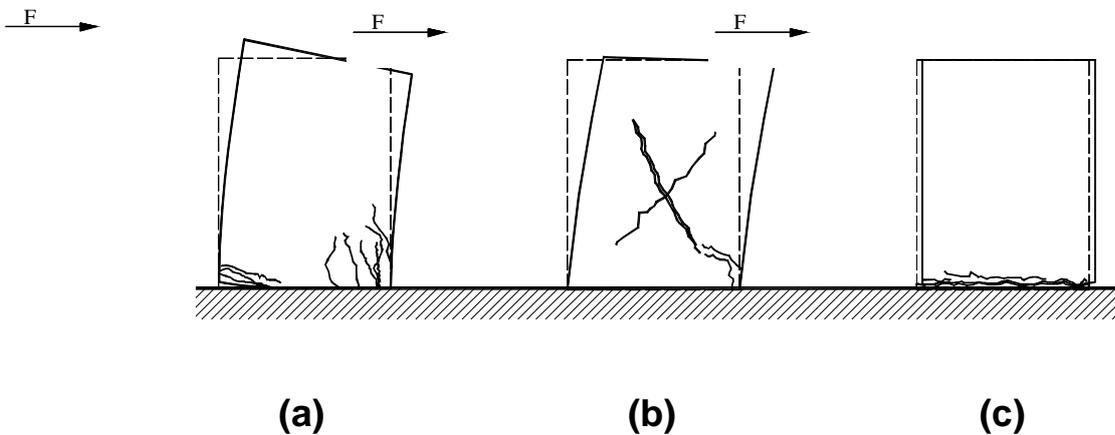


Figura 2. Meccanismi di rottura di un pannello murario o di una porzione di muratura; (a) rottura per schiacciamento e/o ribaltamento; (b) rottura a taglio per fessurazione diagonale; (c) rottura a taglio per scorrimento.

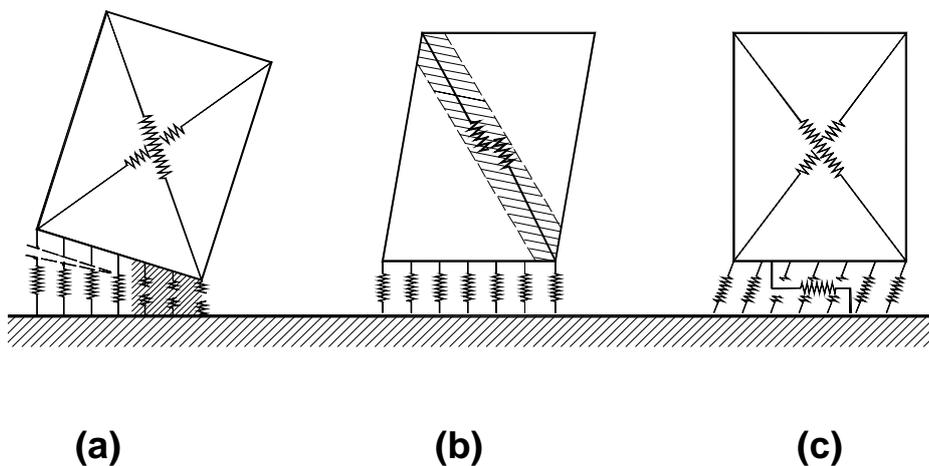


Figura 3. Simulazione dei meccanismi di rottura di un pannello murario mediante il macro-elemento. (a) rottura per schiacciamento e/o ribaltamento; (b) rottura a taglio per fessurazione diagonale; (c) rottura a taglio per scorrimento.

In alternativa ai quadrilateri articolati (pannelli), il modello proposto prevede anche la possibilità di inserire elementi poligonali rigidi. Tali elementi possono essere collegati mediante interfacce ad altri elementi rigidi o ai pannelli e possono risultare utili per la rappresentazione di geometrie complesse.

2.1 Pannello

Il *pannello* è costituito da un quadrilatero articolato piano nel quale i vertici opposti sono collegati tramite molle non-lineari, che simulano la resistenza e la deformabilità a taglio del pannello. E' evidente che per simulare tale legame sarebbe stata sufficiente un'unica molla posta lungo una delle due diagonali, tuttavia per comodità sia di trattazione che di rappresentazione si è preferito considerare due molle diagonali ciascuna delle quali possiede una limitata o nulla resistenza a trazione ed un legame non lineare a compressione. La cinematica del pannello nel piano è regolata da quattro gradi di libertà. Come parametri lagrangiani sono stati considerati le quattro traslazioni di ciascuno dei lati rigidi lungo la propria direzione (Fig. 4a). A tali parametri lagrangiani si associano le forze duali (Fig. 4b).

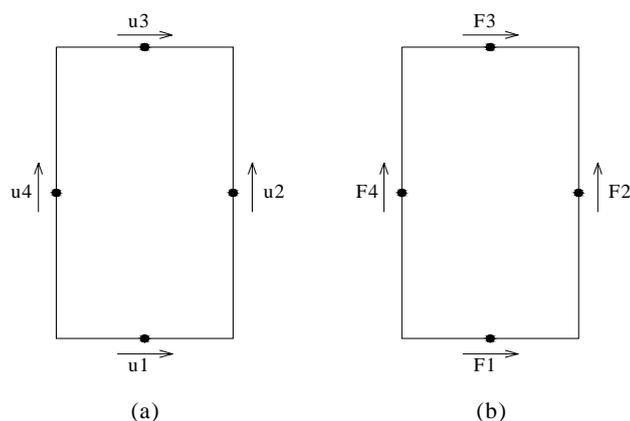


Figura 4. Scelta dei parametri lagrangiani relativi al pannello: (a) spostamenti nodali, (b) forze nodali.

2.2 Interfaccia

Se si considera la muratura come un corpo omogeneo, in cui cioè non si distingue tra elementi lapidei e malta di collegamento, il comportamento complessivo si può pensare dovuto in parte al suo comportamento flessionale e in parte al suo comportamento a taglio. Il comportamento flessionale viene simulato dall'insieme discreto di molle verticali poste nei lati del pannello. In corrispondenza di tali interfacce si considerano concentrate tutte le caratteristiche flessionali della porzione di muratura che si vuole rappresentare. La deformazione a taglio e i corrispondenti meccanismi di rottura vengono simulati dalle molle diagonali e dalle molle poste nelle direzioni dei lati del pannello. Nella Figura 5 a, b è schematicamente rappresentata un'interfaccia che, solo per comodità di rappresentazione, viene indicata con uno spessore finito, mentre nella formulazione analitica viene considerata priva di spessore. Per ogni

interfaccia è conveniente individuare due punti estremi (o nodi), che verranno indicati con i e j (Fig. 5b). Ad ognuno di tali estremi corrispondono in realtà due nodi del modello, appartenenti ciascuno a uno dei due elementi collegati dall'interfaccia. Tali nodi, pur avendo nella configurazione iniziale le medesime coordinate, sono fisicamente distinti e subiranno spostamenti differenti. I quattro nodi (due per ogni elemento di connessione) che corrispondono ai due estremi i e j dell'interfaccia vengono denominati *vertici* dell'interfaccia.

- Molle ortogonali d'interfaccia

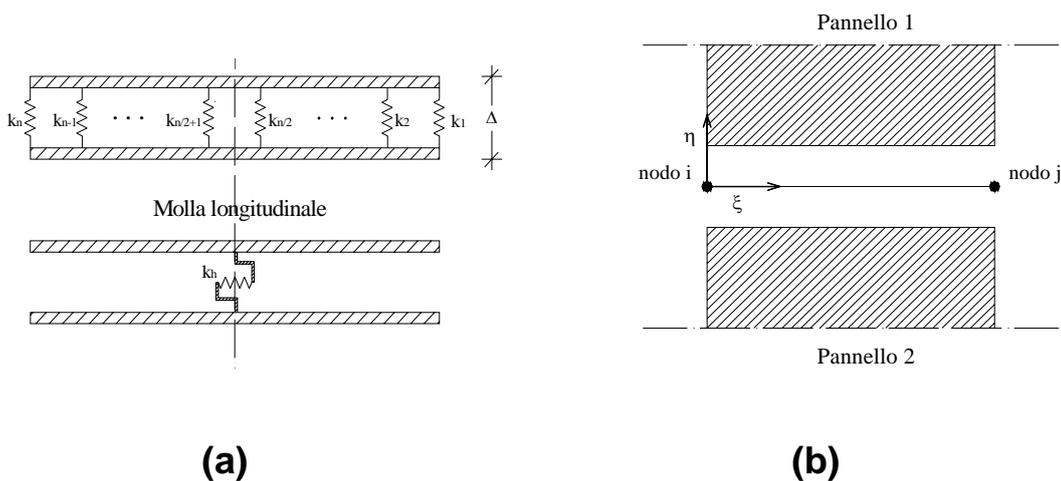


Figura 5. Interfaccia tra due pannelli: (a) Modello meccanico dell'inter-faccia; (b) Sistema di riferimento locale e individuazione dei nodi e dei pannelli.

Da un punto di vista meccanico l'interfaccia è rappresentata da un letto discreto di molle trasversali e da una singola molla longitudinale che contribuiscono alla simulazione del comportamento assiale/flessionale e dello scorrimento dei relativi pannelli.

La molla longitudinale, che ha il compito di simulare lo scorrimento dei due elementi corrispondenti, viene considerata attiva solo se vi sono molle ortogonali attive e inoltre la rigidezza di tale molla si considera dipendente dal numero di molle ortogonali attive ovvero dalla lunghezza di contatto della zona di interfaccia.

Lo stato di una generica interfaccia dipende da sei gradi di libertà, corrispondenti agli elementi cui risulta associata. Nel caso in cui l'interfaccia risulti collegata ad un supporto elastico (che può ad esempio rappresentare l'elasticità del suolo) lo stato dell'interfaccia potrà ancora essere rappresentato da 6 parametri lagrangiani di cui tre appartengono al pannello e tre al supporto elastico. E' evidente che se l'interfaccia risulta collegata ad un vincolo fisso saranno necessari soltanto tre gradi di libertà per definirne lo stato e vi possono essere casi intermedi in cui il supporto risulta cedevole elasticamente soltanto in corrispondenza di determinati gradi di libertà.

2.3 Taratura del modello

La cinematica del modello è in grado di cogliere i principali meccanismi di rottura di un elemento murario, tuttavia l'efficacia della macro-modellazione è strettamente legata ad una corretta definizione dei parametri che stabiliscono l'equivalenza tra la parete e la sua rappresentazione meccanica equivalente.

2.3.1 Definizione delle proprietà delle molle ortogonali d'interfaccia

Il comportamento assiale e flessionale di un pannello murario deve essere descritto attraverso le molle d'interfaccia ortogonali ai lati di pannelli che devono essere opportunamente tarate. Nelle applicazioni numeriche, riportate nel successivo paragrafo, a tali molle è stato attribuito un legame costitutivo elasto-plastico con limite negli spostamenti sia a compressione che a trazione.

Dovendo descrivere la deformabilità assiale e flessionale di due pannelli contigui, le proprietà meccaniche delle molle d'interfaccia dovranno essere ricavate a partire dalle caratteristiche di entrambi i pannelli. Per simulare il comportamento ortotropo del pannello murario occorre definire opportunamente le molle d'interfaccia che competono rispettivamente ai lati verticali e a quelli orizzontali del pannello.

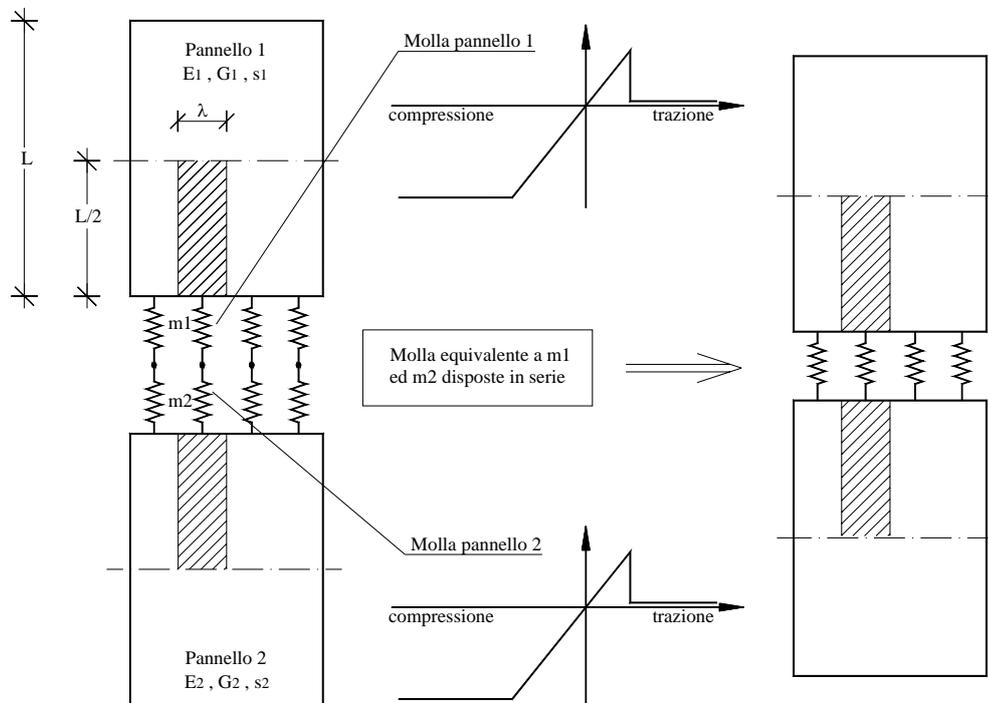


Figura 6. Taratura delle molle ortogonali d'interfaccia.

La procedura che è stata adottata per tarare le molle d'interfaccia sulla base delle proprietà della muratura è basata su una semplice equivalenza tra la singola molla e la porzione di muratura che le compete, in base alla propria area d'influenza, (Fig. 6). Tale equivalenza è stata condotta con riferimento ad un pannello soggetto ad uno sforzo di compressione e/o trazione uniforme.

I valori che definiscono il limite del comportamento elastico a trazione e a compressione e gli spostamenti ultimi discendono direttamente dalle proprietà della muratura, pensata come solido omogeneo. Ad esempio, indicando con E il modulo di elasticità normale della muratura nella direzione considerata, con σ_c e σ_t le tensioni limite a compressione e a trazione, con ε_{cu} e ε_{tu} le deformazioni ultime a compressione e a trazione, la rigidezza elastica iniziale di una molla relativa ad un'area d'influenza $\lambda \cdot L/2$ (essendo λ l'interasse delle molle e L l'altezza del pannello) risulta data da

$$K_p = 2 \frac{E \lambda s}{L} \quad (1)$$

in cui s rappresenta lo spessore del pannello.

Le forze al limite elastico, rispettivamente a compressione e a trazione, risultano semplicemente date da

$$F_{cu} = s \lambda \sigma_c ; \quad F_{tu} = s \lambda \sigma_t \quad (2 \text{ a,b})$$

mentre gli spostamenti ultimi si esprimono nella forma

$$u_{cu} = \frac{L}{2} \varepsilon_{cu} ; \quad u_{tu} = \frac{L}{2} \varepsilon_{tu} \quad (3 \text{ a,b})$$

Le proprietà della molla ortogonale d'interfaccia si ottengono considerando le due molle elasto-plastiche, rappresentative dei relativi pannelli, poste in serie.

2.3.2 Definizione delle proprietà della molla orizzontale d'interfaccia

Le molle orizzontali d'interfaccia servono a simulare il meccanismo di rottura associato allo scorrimento del concio murario. Nelle applicazioni numeriche tali molle sono state caratterizzate attraverso il criterio di Mohr-Coulomb per cui la forza al limite elastico della generica molla orizzontale risulta una funzione dello sforzo di compressione N cui è soggetta l'interfaccia, di un angolo d'attrito μ e di una forza coesiva corrispondente al valore della forza limite in corrispondenza di un valore nullo dello sforzo di compressione

$$F_{\text{lim}} = F_o + \mu N \quad (4)$$

La forza coesiva F_o è data dalla coesione f_o della muratura per l'area della porzione di muratura a contatto, μ è l'angolo d'attrito della potenziale superficie di scorrimento, N è la risultante degli sforzi di compressione sull'interfaccia. I valori di f_o e di μ possono essere determinati sperimentalmente o sulla base dell'esperienza in relazione al tipo di muratura da esaminare.

2.3.3 Definizione delle proprietà delle molle diagonali

Le molle diagonali nei pannelli devono simulare il comportamento a taglio della muratura e il relativo meccanismo di rottura per fessurazione diagonale. Nelle applicazioni numeriche è stato adottato per entrambe le molle un legame elastico perfettamente plastico con bassa resistenza a trazione spostamenti limitati sia a compressione che a trazione. I parametri che definiscono il legame costitutivo delle molle devono essere messi in relazione alle caratteristiche meccaniche della muratura.

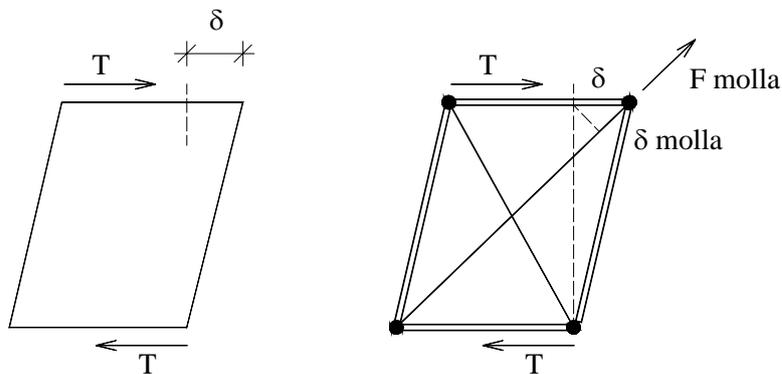


Figura 7. equivalenza a taglio tra il modello continuo e il modello discreto.

Ciò è stato fatto considerando un'equivalenza elastica tra un pannello murario, assimilato ad un solido omogeneo deformabile solo a taglio, e il modello discreto composto dal quadrilatero articolato in presenza delle sole due molle diagonali (Fig. 7).

Per quel che riguarda le caratteristiche elastiche del continuo si può fare riferimento semplicemente a un modulo di elasticità tangenziale della muratura per l'intero pannello. Per quanto riguarda il taglio ultimo sopportabile dal pannello, si dovrà fare riferimento a un opportuno

criterio di rottura come ad esempio il criterio di Turnsek e Cacovic (Turnsek e Cacovic 1971) o lo stesso criterio di Mohr-Coulomb i cui parametri dovranno essere determinati in relazione a dati sperimentali (Modena, Pineschi e Valluzzi 2000).

Nelle applicazioni numeriche riportate nel successivo paragrafo, relativi a casi di studio già affrontati da altri autori, è stato considerato il criterio di rottura di Turnsek e Cacovic, valutando i parametri necessari alla caratterizzazione della muratura tramite i dati sperimentali presenti in letteratura.

3 APPLICAZIONI NUMERICHE

Nel seguito vengono presentati i risultati di analisi incrementali condotte su alcune pareti murarie che sono già state oggetto di studi sperimentali e/o di simulazioni numeriche da parte di altri autori.

3.1 Parete soggetta a prove sperimentali presso l'Università di Pavia

Il primo caso esaminato consiste in una parete in muratura di blocchi squadrati, facente parte di un prototipo di edificio al vero sottoposto a sperimentazione presso l'Università di Pavia (Calvi e Magenes 1994), il cui schema geometrico è riportato in Figura 8a. Lo spessore della parete è costante e pari a 25 cm. Su tale prototipo sono state condotte prove di carico ciclico fino a rottura applicando due forze orizzontali cicliche F_1 e F_2 a livello dei solai, e dei carichi verticali costanti $p_1=14100$ N/m e

$p_2=13800$ N/m posti rispettivamente alla quota del solaio del primo e del secondo livello.

Oltre ai risultati sperimentali, per la parete in esame sono disponibili in letteratura i risultati di alcune simulazioni numeriche agli elementi finiti realizzate mediante un modello a piani di danneggiamento di Gambarotta e Lagomarsino (Gambarotta e Lagomarsino 1997) e nell'ambito del Progetto Catania mediante il modello SAM di Magenes e Calvi (Magenes e Calvi 1996).

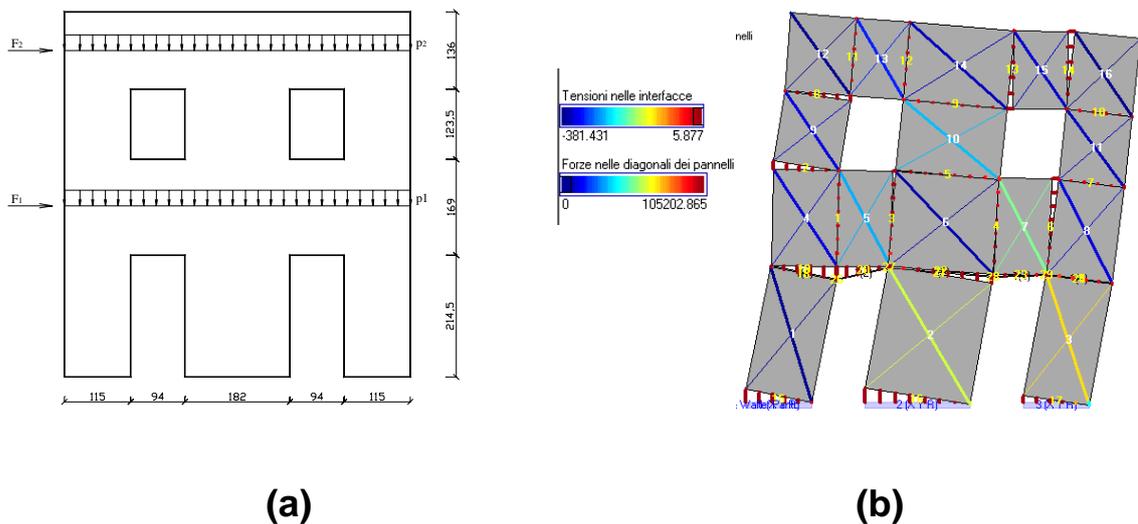


Figura 8. (a) Schema geometrico delle parete. (b) Schema della macromodellazione adottata.

La Figura 9 mostra che la macro-modellazione adottata è in buon accordo con i risultati sperimentali, tuttavia si riscontra una differenza nella rigidità iniziale.

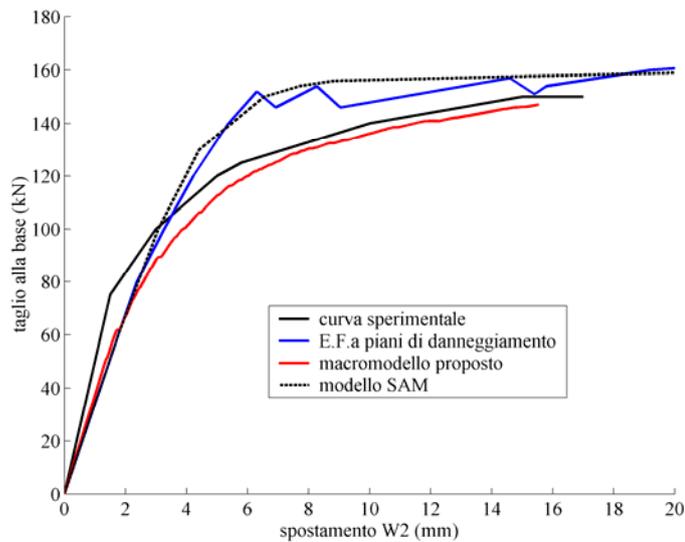
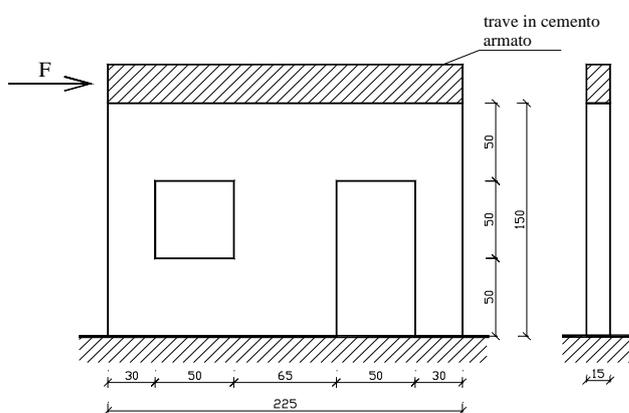


Figura 9. Parete sottoposta a sperimentazione presso l’Università di Pavia. Confronti tra la macromodellazione proposta ed i risultati numerici e sperimentali disponibili.

3.2 Parete soggetta a prove sperimentali presso l’Università di Catania

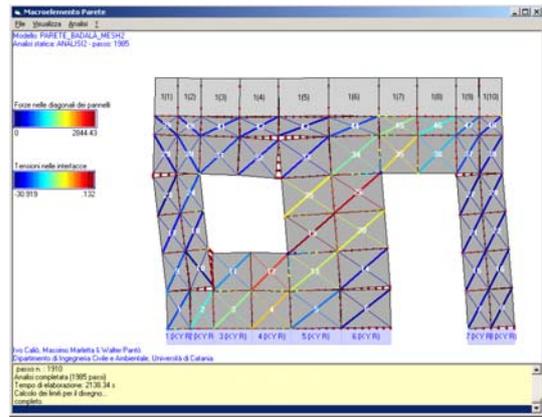
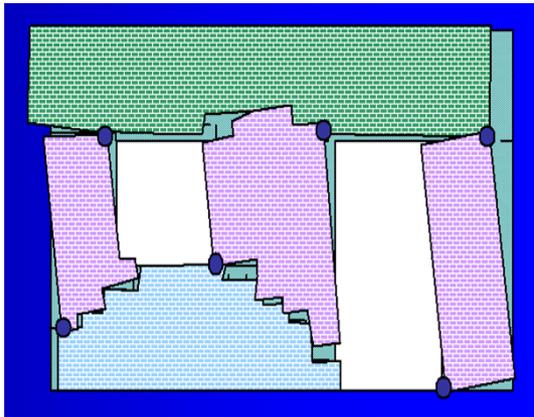
Il secondo caso di studio consiste in un prototipo, in scala 1:2, di parete in muratura di mattoni ad un solo piano dello spessore di 15 cm, costruita e sottoposta a sperimentazione presso l’Università di Catania da un gruppo di ricerca coordinato dal prof. Badalà (Anania, Badalà e Costa 1999).



(a)

(b)

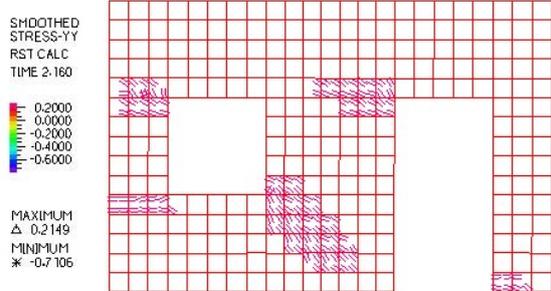
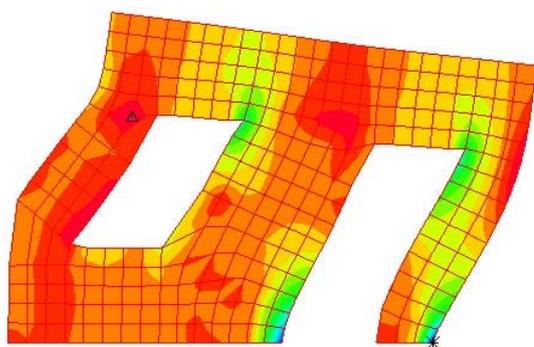
Figura 10. (a) Schema geometrico delle parete. (b) Fotografia del prototipo in scala 1:2.



(a)

(b)

Figura 11. (a) Meccanismo di collasso rilevato sperimentalmente. (b) Simulazione del meccanismo di collasso ottenuta dalla macro-modellazione proposta.



(a)

(b)

Figura 12. Modellazione agli elementi finiti non-lineari mediante ADINA; (a) Distribuzione tensioni normali in direzione verticale a collasso. (b) Stato fessurativo a collasso.

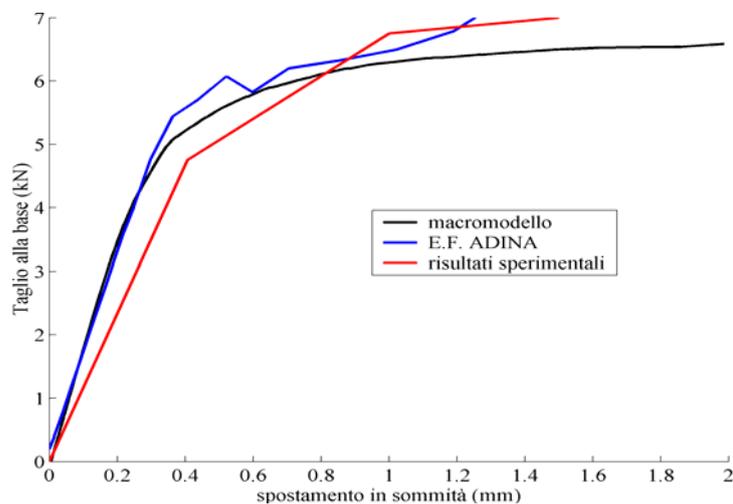


Figura 13. Parete sottoposta a sperimentazione presso l'Università di Catania. Confronti tra la macromodellazione proposta ed i risultati numerici e sperimentali disponibili.

In figura 13 è riportato un confronto tra i dati sperimentali e quelli ottenuti mediante una simulazione numerica utilizzando l'elemento finito bidimensionale *concrete* implementato in ADINA, di cui in Figura 12 è riportato un particolare di modellazione relativo ad un'analisi push-over.

3.3 Parete dell'edificio di via Martoglio (Progetto Catania)

La parete in esame fa parte di un edificio sito in via Martoglio a Catania che ha costituito un caso di studio nell'ambito del progetto Catania (Liberatore 2000). L'edificio, costruito intorno al 1950, ha pareti perimetrali in muratura di pietra lavica e pareti interne in mattoni di

laterizio. Gli orizzontamenti sono realizzati tramite solai latero-cementizi. L'edificio è stato considerato rappresentativo delle strutture in muratura che presentano un comportamento di tipo "scatolare". Le diverse unità di ricerca hanno studiato sia l'edificio nel suo complesso, sia la singola parete piana, il cui schema geometrico è riportato in Figura 14a. Quest'ultima è stata analizzata con il macromodello proposto al fine di confrontare i risultati con quelli ottenuti dalle unità di ricerca del Progetto Catania.

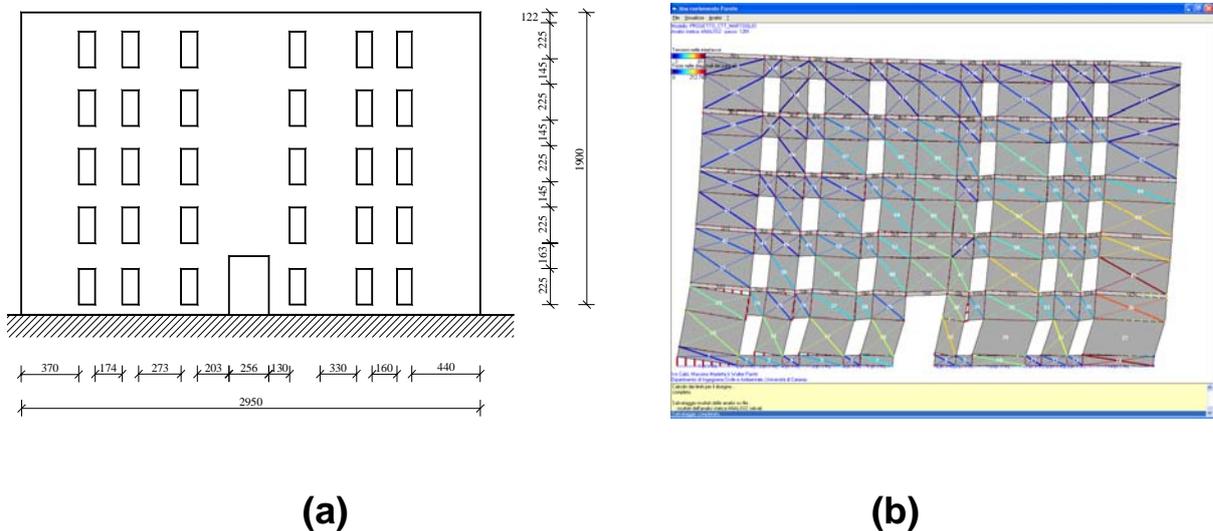


Figura 14. (a) Schema geometrico della parete. (b) Schema ai macro-elementi.

Il modello numerico considerato tiene conto della presenza dei cordoli di piano. Ciò è reso possibile dall'introduzione nel modello di elementi *cordolo* che sono composti da una serie di bracci rigidi connessi da interfacce bilaterale nelle quali vengono concentrate le effettive proprietà elastiche del cordolo di piano.

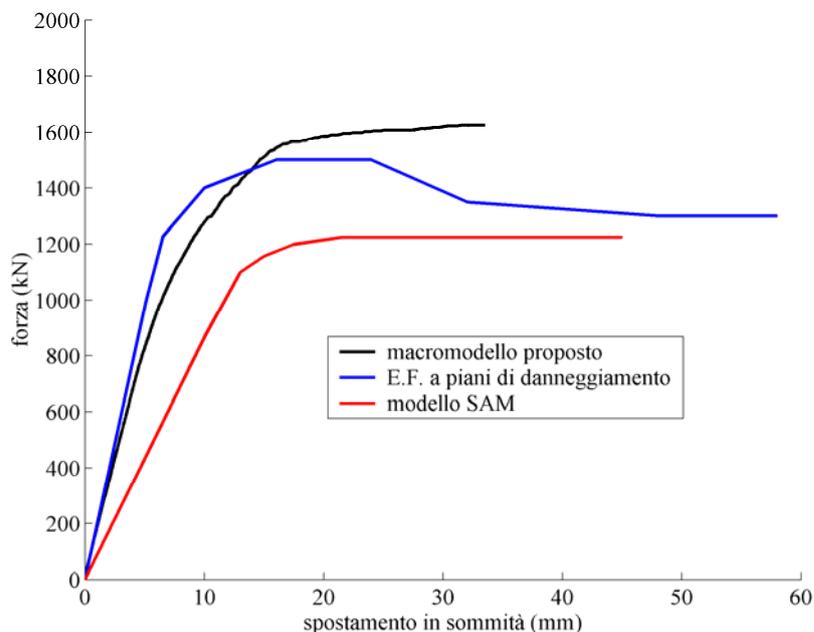


Figura 15. Edificio di via Martoglio. Confronto tra i risultati ottenuti tramite il macromodello proposto e altri modelli numerici presentati nell'ambito del Progetto Catania.

Il risultati ottenuti con il macromodello proposto indicano un meccanismo di collasso parziale che consiste nella rottura a taglio per fessurazione diagonale di quasi tutti i maschi del piano terra; tale risultato è in sostanziale accordo con i risultati ottenuti dalle unità di ricerca del Progetto Catania. In particolare si riscontra che solo nel pannello posto nell'estremità tesa le molle diagonali rimangono in campo elastico, tutti gli altri pannelli vedono snervarsi le proprie molle diagonali, inoltre i due pannelli tozzi posti alla destra della grande apertura centrale del piano terra, superano il limite ultimo di deformazione a taglio perdendo completamente la capacità di portare carico tagliante.

Dalla figura 15 si evince un buon accordo tra i risultati ottenuti con la macromodellazione proposta e quelli ottenuti utilizzando la modellazione agli elementi finiti a piani di danneggiamento proposta da Gambarotta e Lagomarsino.

3.4 Struttura muraria a blocchi

Fino ad ora sono stati riportati esempi di modellazione di strutture nelle quali la muratura può essere studiata come un corpo omogeneo. In tali casi non viene presa in esame la reale disposizione dei conci. Per alcune tipologie di strutture è invece necessario modellare la muratura mediante l'accostamento degli effettivi conci che la compongono secondo la loro reale disposizione. Per modellare tali tipi strutturali sono stati introdotti elementi rigidi di forma poligonale connessi tra loro, o a pannelli rettangolari deformabili a taglio, mediante interfacce.

Come esempio di applicazione si riportano i risultati relativi alla modellazione della facciata anteriore del tempio greco in stile dorico “della concordia”, situato nella valle dei templi di Agrigento.

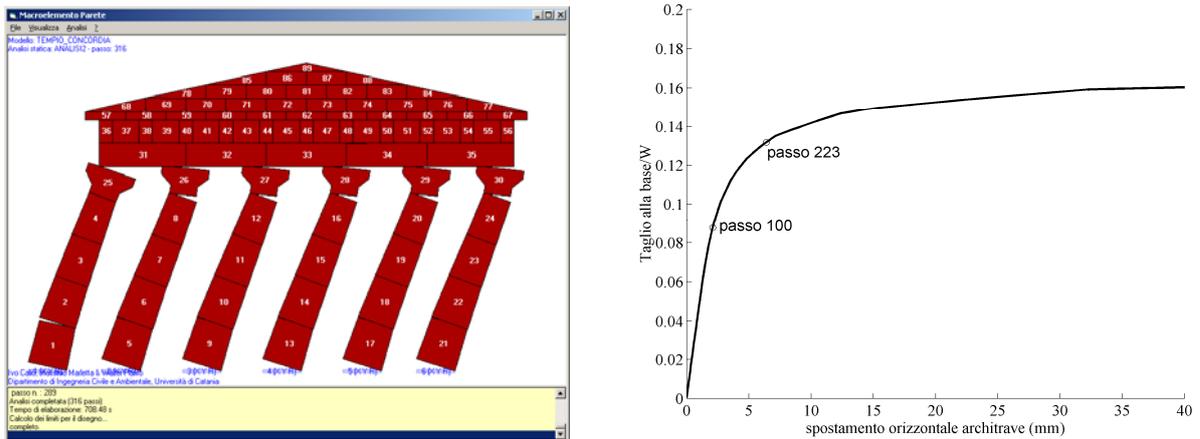


Figura 16. Tempio della Concordia. (a) Schema ai macro-elementi in situazione di incipiente collasso. (b) Curva di capacità.

E' stata condotta un'analisi statica incrementale considerando i carichi verticali dovuti al peso proprio e forze orizzontali proporzionali alla massa. I risultati di tali analisi sono riportati in figura 16, in cui è rappresentata la deformata corrispondente alla situazione di incipiente collasso e la curva di capacità del sistema. Il collasso si stabilisce in corrispondenza di un coefficiente di taglio alla base pari a circa 0.16. La curva di capacità così ottenuta può essere utilizzata per stimare la vulnerabilità sismica del tempio con i metodi descritti da Oliveto, Calì e Marletta, (Oliveto, Calì e Marletta 2002). Tuttavia con l'implementazione in campo dinamico del macro-modello proposto sarà possibile effettuare analisi nonlineari che consentiranno una valutazione più accurata della resistenza sismica anche di tali tipologie strutturali.

4 CONCLUSIONI

La valutazione della resistenza sismica di un'opera civile esistente rappresenta un problema complesso di enorme rilevanza applicativa ma

di difficile valutazione. Nel lavoro sono riportati i primi risultati di una ricerca che si prefigge come obiettivo la definizione di uno strumento di calcolo avanzato, ma nello stesso tempo applicabile in ambito professionale, per lo studio del comportamento sismico e le analisi di vulnerabilità di edifici in muratura. A tale scopo, prendendo spunto dalle modellazioni semplificate esistenti, è stato introdotto un modello discreto equivalente ad una porzione di muratura (macro-elemento) che, con un costo computazionale estremamente ridotto rispetto a una modellazione agli elementi finiti, riesce a cogliere il comportamento non lineare di un'intera parete e, per assemblaggio, di un intero edificio. E' evidente che l'efficacia della macro-modellazione è strettamente legata ad una corretta definizione dei parametri che stabiliscono l'equivalenza tra il modello continuo e quello discreto. Il macro-modello proposto può rappresentare un intero maschio murario sollecitato nel proprio piano attraverso un singolo elemento o mediante una mesh di elementi. Tuttavia esso è stato concepito con l'obiettivo di rappresentare un intero maschio murario senza la necessità di utilizzare una mesh di elementi. Per raggiungere un tale obiettivo esso è stato concepito in modo da simulare il comportamento meccanico non-lineare della porzione di elemento murario che si vuole rappresentare considerandone la limitata resistenza a trazione e a taglio e descrivendone i principali meccanismi di rottura. L'efficacia della modellazione proposta è stata valutata mediante analisi incrementali condotte su pannelli e pareti murarie che sono state oggetto di ricerca teorica e/o sperimentale.

5 riferimenti bibliografici

- [1] Anania, L., Badalà, A., Costa, S. 1999. Retrofitting of buildings constituted by calcareous block stone: teoretical and sxperimental analysis. *Computational Methods in Engineerin*. P. M. Pimentra; R. M. L. F. Brasil; E. S. Almeida N (ed).
- [2] Braga, F. Liberatore, D. 1990. A finite element for the analysis of the response of masonty buildings. 5th North American Masonry Conference, 201-212. Proc. Inter. Symp., Urbana, 1990.
- [3] Braga, F., Liberatore, D., Spera, G. 1997. A computer program for the seismic analysis of complex masonry duildings. In G.N. Pande, J. Middleton & B.Kralj (ed.), *Computer Methods in Strustural Masonry – 4*, 309-316. Proc. Inter. Symp., Firenze, 3-5 Settembre 1997. London: E& FN spons.
- [4] Brencich, A., Lagomarsino, S. 1997. Un modello a macroelementi per l'analisi ciclica di pareti murarie. Atti 6° convegno nazionale ANIDIS, Taormina, 21-24 Settembre 1997.
- [5] Calvi, M. G., Magenes, G. 1994. Experimental research on response of URM building system. In D.P. Abrams and G. M. Calvi (ed.), *Italy workshop on guidelines for seismic evaluation and rehabilitation of unreinforced masonry buildings*, State University of New York at Buffalo, NCEER-94-2001, 3-41/57. Proc. intern. symp., Pavia, 1994.
- [6] D'Asdia, P., Viskovic, A. 1993. Un modello di calcolo della resistenza ultima delle pareti in muratura. Atti 6° convegno nazionale ANIDIS, Perugia, 13-15 Ottobre 1993.
- [7] D'Asdia, P., Viskovic, A. 1996. Analisi tridimensionale della resistenza di edifici in muratura, storici o recenti, soggetti ad azioni orizzontali di tipo

sismico. Atti del Convegno nazionale “La meccanica delle murature tra teoria e progetto”, Messina, 18-20 Settembre 1996, 463-472. Bologna: Pitagora Editrice.

[8] Gambarotta, L., Lagomarsino, S. 1997. Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. Part II: The continuum model and its application. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 26: 424-462.

[9] Liberatore, D. (A cura di) 2000. Indagine sulla risposta sismica di due edifici in muratura. CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti. Roma.

[10] Magenes, G., Calvi, G.M. 1996. Prospettive per la calibrazione di metodi semplificati per l’analisi sismica di pareti murarie. Atti del Convegno nazionale “La meccanica delle murature tra teoria e progetto”, Messina, 18-20 Settembre 1996, 503-512. Bologna: Pitagora Editrice.

[11] Magenes, G., Bolognini, D., Braggio, C (A cura di) 2000. Metodi semplificati per l’analisi sismica non lineare di edifici in muratura. CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti. Roma.

[12] Modena, C., Pineschi, F., Valluzzi, M.R. (A cura di) 2000. Valutazione della vulnerabilità sismica di alcune classi di strutture esistenti – Sviluppo e valutazione di metodi di rinforzo. CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti. Roma.

[13] Oliveto, G., Calì, I., Marletta, M. 2002. Seismic resistance and vulnerability of reinforced concrete buildings not designed for earthquake action. In G. Oliveto (ed), *Innovative Approaches to Earthquake Engineering*, WIT Press, ISBN: 1-85312-885-6, ISSN: 1361-617X, 2002.

[14] Turnsek, V. Cacovic, F. 1971. Some experimental result on the strength of brick masonry walls. 2th Int. Brick Masonry Conference, 149-156. Proc. intern. symp., Stoke-on-Trent 1971.

[15] Vulcano, A., Bertero, V.V., Colotti, V. 1988. Analytical modelling of R/C structural walls. 9th W.C.E.E.. Proc. intern. symp., Tokyo-Kyoto, Japan 1988, Vol VI.