

Risposta sismica delle strutture in muratura confinata.

Aspetti tecnico costruttivi, modalità di collasso, modelli di calcolo e caso studio

Cosimo e Maria Rosa ALVARO – Amministratori STACEC S.r.l

1. PREMESSA

Nel presente articolo viene analizzata la risposta sismica delle strutture in muratura confinata. Tale tipologia strutturale, nonostante la trattazione presente nelle norme tecniche delle costruzioni di cui al D.M.14.01.2008 (Verifiche di edifici esistenti) e D.M.17.01.2018 (Verifiche edifici esistenti e progettazione ex-novo) passa inosservata a volte confusa con la muratura armata. Si tratta di una tipologia che si affermò all'inizi del 1900 con la ricostruzione post-sisma del terremoto di Messina nel 1908, a seguito dell'emanazione il 18/04/1909 del Regio Decreto n°193 che presentò novità assolute nell'ambito delle norme costruttive nel territorio italiano. Dopo una trattazione storica dell'utilizzo della muratura confinata, l'entrata nelle nuove norme tecniche anche per la costruzione del nuovo, la risposta sismica e i principali meccanismi di danneggiamento, vengono proposti i modelli di calcolo e metodi di analisi più utilizzati. Un caso di studio su una parete 2D multipiano permetterà di valutare l'effetto del confinamento che caratterizza questo sistema rispetto alla muratura ordinaria e telai tamponati.

2. CENNI STORICI SULLE TIPOLOGIE IN MURATURA CONFINATA

L'impiego delle costruzioni in muratura confinata proviene da un'evoluzione tecnologico-costruttiva che negli anni ha fornito buone prestazioni nei confronti di eventi sismici di medio ed elevata intensità.

La tipologia è costituita da pannelli di muratura portante che sono incorniciati con dei telai in calcestruzzo armato la cui funzione è quella di migliorare il comportamento sismico della muratura grazie ad un effetto confinamento del telaio.

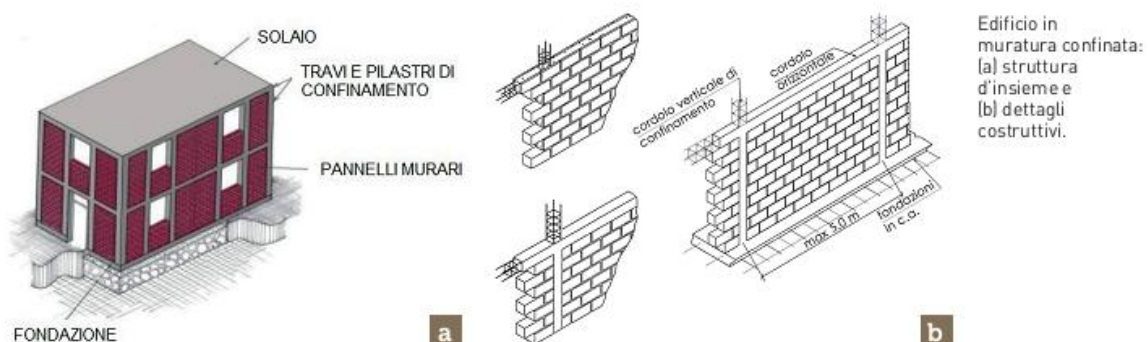


Figura 2.1: Edificio in muratura confinata: (a) struttura d'insieme e (b) dettagli costruttivi.

L'impiego di tale tecnologia in Italia riguarda la ricostruzione post-sisma del terremoto di Messina (magnitudo M7.2) del 1908 (fig.2.2).



Figura 2.2: Fasi costruttive di edifici in muratura confinata tipici della ricostruzione di Messina e Reggio Calabria dopo il terremoto del 1908.

Negli ultimi decenni le costruzioni in muratura confinata sono state adottate in Europa (Slovenia, Serbia), in America Latina (Messico, Cile, Perù, Colombia, Argentina), in Medio Oriente e nei paesi arabi (Iran, Algeria, Marocco) e in Asia (Indonesia, Cina).

È importante notare come le strutture in muratura confinata siano diffuse in aree caratterizzate da una pericolosità sismica estremamente elevata. Gli edifici in muratura confinata ben realizzati sono capaci di contrastare le azioni di terremoti con elevata intensità senza arrivare al collasso ed in alcuni casi con assenza di danni significativi.

Le prestazioni sismiche degli edifici in muratura confinata risalgono al terremoto del Cile 1939 (M7.8), dove nella cittadina di Chillán, il sisma ha raggiunto il IX grado di intensità della scala Mercalli, causando un bilancio di 30.000 vittime, oltre il 50% di tutti gli edifici in muratura confinata ispezionati è sopravvissuto al terremoto senza danni.

Successivamente gli edifici in muratura confinata sono stati interessati da diversi e importanti terremoti, a seguito dei quali sono state osservate delle buone performance al danneggiamento. Da ricordare sono il terremoto di Llole del 1985 (M7.8) e, più recentemente, del terremoto di Maule del 2010 (M8.8) in Cile e del terremoto di Pisco in Perù del 2007 (M8.0).

3. LE NOVITÀ INTRODOTTE DALLE NTC 2018

In Italia la muratura confinata trova la collocazione normativa a seguito della pubblicazione in Gazzetta Ufficiale del DM.17/01/2018. Tutti i precedenti Decreti, emanati in attuazione della Legge 64 del 1974, non hanno mai riconosciuto questo sistema costruttivo per resistere alle azioni sismiche.

Infatti soltanto attraverso l'applicazione di quanto riportato negli Eurocodici 6 e 8, antecedentemente all'uscita del D.M. 17/01/2018, si potevano progettare edifici in muratura confinata. I paragrafi 4.5.8, 7.8.4 e 7.8.6.3 delle NTC 2018 trattano questa "nuova" tipologia di edifici in muratura portante caratterizzati da elementi di confinamento realizzati "in calcestruzzo armato o in muratura armata".

Il par. 7.8.6.3 stabilisce le regole di dettaglio per la definizione dei particolari costruttivi necessari al raggiungimento dell'obiettivo proprio della suddetta tipologia strutturale, nella fattispecie l'incremento delle caratteristiche capacitive dei pannelli murari per il tramite dell'ingranamento con gli elementi perimetrali di bordatura, a loro volta mutuamente collegati. La Circolare esplicativa n.7 del C.S.LL.PP. del 21/01/2019 chiarisce inoltre, al par. C.8.7.6.3, un aspetto non trascurabile per edifici in muratura,

ovvero che “come per le costruzioni in muratura armata è possibile derogare dal requisito di avere agli incroci delle pareti perimetrali zone di parete muraria di lunghezza non inferiore ad un metro su ciascun lato dell’angolo”. Per quanto sopra riportato, l’utilizzo della muratura confinata in zona sismica rappresenta, tenendo in considerazione anche gli elevati valori sia del fattore di comportamento q che del rapporto di sovrarresistenza α_u/α_1 ad essi assegnati dalle NTC2018, una “nuova” efficiente tecnica per resistere alle azioni sismiche di progetto e per garantire ridotti livelli di danneggiamento anche per sismi di significativa entità.

4. TIPOLOGIA E TECNICHE COSTRUTTIVE

Per ottenere strutture sicure e convenienti preservando al contempo l’autenticità della costruzione in muratura, nel corso degli anni sono stati sviluppati vari metodi per rinforzare le pareti in muratura. La muratura confinata (CM) è una di queste tipologie abitative che ha dimostrato di essere sicura ed economica. Inizialmente sviluppata per ricostruire gli edifici danneggiati durante il terremoto di Messina (Italia) del 1908 di magnitudo 7,2, la tecnica CM si è poi diffusa in paesi ad alto rischio sismico come Messico, Colombia, Cile e vari altri paesi. La muratura confinata è stata utilizzata nell’edilizia residenziale con realizzazione di strutture che vanno da uno a sei piani. Il sistema CM prevede la realizzazione di pareti in muratura, seguita dal getto in opera di colonne e travi in ca nominalmente armate in corrispondenza perimetro di ciascuna parete e attorno alle aperture. I componenti chiave di un tipico edificio CM sono illustrati nella Figura 4.1.

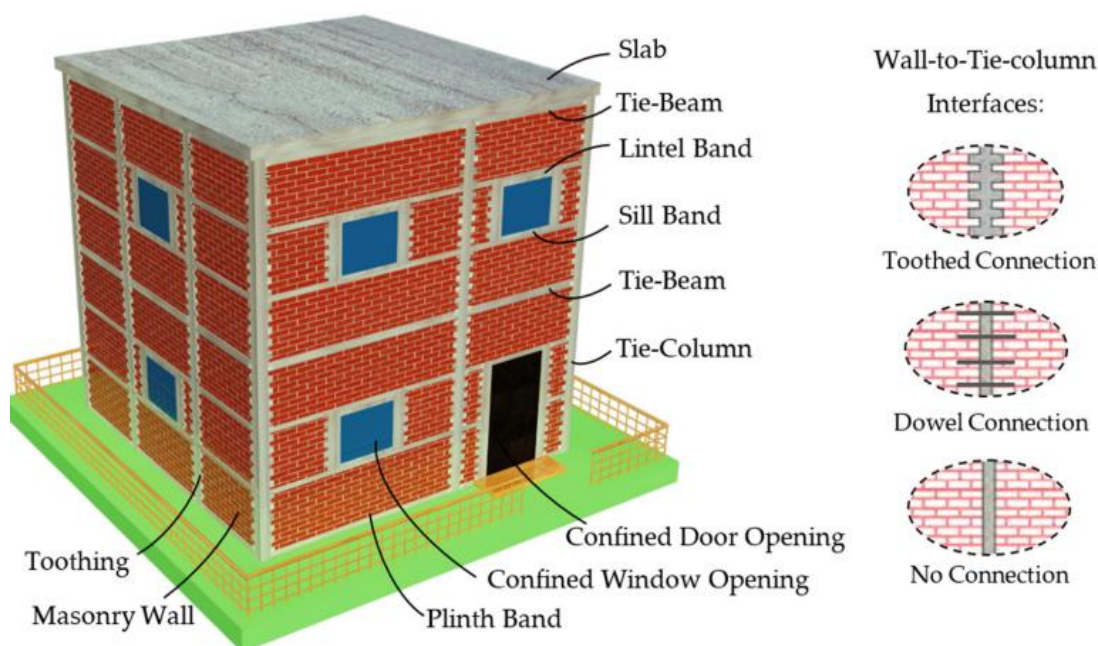


Figura 4.1. Caratteristiche dell’edificio in muratura confinata.

I carichi verticali e quelli laterali vengono trasmessi dalle solette dei solai alle pareti. Nella costruzione CM, la parete in muratura trasmette il carico verticale dei solai alla fondazione e garantisce l’adeguata resistenza alle azioni sismiche. I pilastri e le travi in c.a. della cornice forniscono sostegno alle pareti in muratura, migliorandone la stabilità laterale e impedendo la completa disgregazione nel caso di forti terremoti. Per migliorare il contatto (aderenza) tra le pareti in muratura e gli elementi di collegamento in c.a., vengono utilizzati bordi dentati, ovvero elementi di muratura sfalsati in corrispondenza delle

posizioni dei pilastri. Negli edifici CM sono previste fasce orizzontali continue per proteggere la parete dalla possibilità di collasso durante un terremoto, queste fasce orizzontali con elementi di confinamento verticale si estendono solo fino all'altezza dell'apertura e fungono da confinamento delle stesse. La risposta della parete migliora in presenza di cedimenti eccessivi in condizioni di terreno soffice. La Figura 4.2 mostra un semplice confronto tra le tre tipologie di costruzione:

- *Muratura ordinaria (MO);*
- *Telai in c.a. con tamponature (TT);*
- *Muratura confinata (CM).*

al fine di fornire una comprensione di base del loro comportamento sotto carico.

Nella muratura tradizionale, le pareti sono progettate per resistere alle azioni sismiche orizzontali e verticali le quali si danneggiano e/o collassano gerarchicamente con modalità di pressoflessione/rocking e taglio per fessurazione diagonale o scorrimento nel piano.

Le altre due tipologie costruttive, invece, utilizzano anche elementi in calcestruzzo armato diversi da quelli in muratura. Sebbene i telai in c.a. tamponati e le strutture in muratura confinata possano apparire simili, il loro comportamento meccanico sotto azioni gravitazionali e sismiche differisce in modo significativo. Negli edifici con telaio in c.a. con muratura di tamponamento, gli elementi in c.a. vengono prima gettati e progettati per resistere a tutti i carichi previsti sulla struttura, successivamente viene realizzato un pannello di tamponamento. Di solito esiste un piccolo spazio tra l'intradosso della trave e il pannello di muratura dovuto al fatto che il carico di gravità trasferito al pannello di tamponamento è quasi trascurabile. Sotto carico laterale, il telaio in c.a. tenta di deformarsi in modalità flessionale, mentre il tamponamento primario si deforma sotto sollecitazione di taglio, causando la separazione tra gli elementi del telaio e le pareti lungo l'interfaccia.

Nelle strutture in muratura confinata CM, la cornice di calcestruzzo viene gettata in opera dopo la parete in muratura, determinando un'azione composita integrale tra telaio e pannello. La parete in muratura è l'elemento portante principale, lo scopo principale delle cornici in c.a. con piccole dimensioni è quello di migliorare la stabilità laterale della parete in muratura, potenziandone la capacità di deformazione duttile e il grado di connessione con altre pareti e diaframmi di solaio. La muratura confinata offre vantaggi economici, poiché sfrutta tutta la resistenza della muratura nell'elemento portante principale invece del telaio di confinamento in ca. In sintesi, tale tipologia è un metodo sicuro, conveniente ed efficace per costruire edifici in muratura in grado di resistere all'attività sismica ed è stato utilizzato con successo in vari paesi in tutto il mondo.

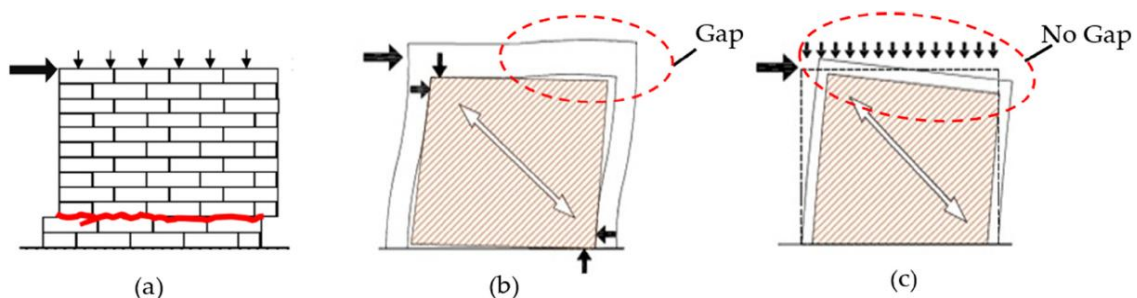


Figura 4.2. Confronto tra (a) muratura tradizionale, (b) telaio in c.a. tamponato e (c) parete in cm.

5. COMPORTAMENTO STRUTTURALE E MECCANISMI DI DANNO

La capacità delle strutture in muratura confinata di resistere alle azioni orizzontali è ottenuta attraverso l'azione combinata delle pareti in muratura e degli elementi di confinamento in ca adiacenti, inclusi pilastri e travi, nonché una combinazione delle fasce murarie e dei solai. Nel CM, il cedimento dovuto al solo carico verticale non è considerato un problema critico poiché le pareti in muratura sono sempre progettate in modo tale da essere soggette a sollecitazioni di compressione assiale relativamente minori. Nonostante siano progettate per resistere a carichi verticali, le strutture in muratura possono comunque subire modalità di cedimento critiche se soggette a gravità e carichi sismici laterali, poiché la bassa resistenza a trazione della muratura può diventare un fattore limitante. Come riportato nella letteratura passata, gli edifici CM hanno funzionato in modo eccellente durante i terremoti.

Le osservazioni effettuate durante i terremoti passati hanno rivelato danni agli edifici CM che presentavano alcuni difetti di progettazione e costruzione. Questi difetti includevano:

- *l'uso di materiali di scarsa qualità;*
- *colonne di collegamento insufficienti alle intersezioni delle pareti e intorno alle aperture;*
- *una mancanza di dettagli nelle colonne di collegamento in c.a.;*
- *ancoraggio insufficiente del rinforzo negli elementi di collegamento;*
- *collegamenti inadeguati del diaframma e problemi torsionali a causa di irregolarità.*

Precedenti rapporti sui danni sismici e studi di ricerca hanno identificato diverse potenziali modalità di fallimento degli edifici in muratura confinata, che includono:

- *il cedimento nel piano;*
- *il ribaltamento o il cedimento fuori dal piano;*
- *il cedimento del diaframma;*
- *il cedimento della connessione e il cedimento non strutturale.*

Le pareti di un edificio sono generalmente classificate come pareti nel piano o fuori piano (Figura 5.1), ed è necessario che le stesse abbiano una resistenza sufficiente per resistere ad entrambe le azioni. Gli effetti sismici nel piano risultano critici nelle pareti del piano terra. D'altra parte, gli effetti fuori piano sono prevalenti nei piani superiori.

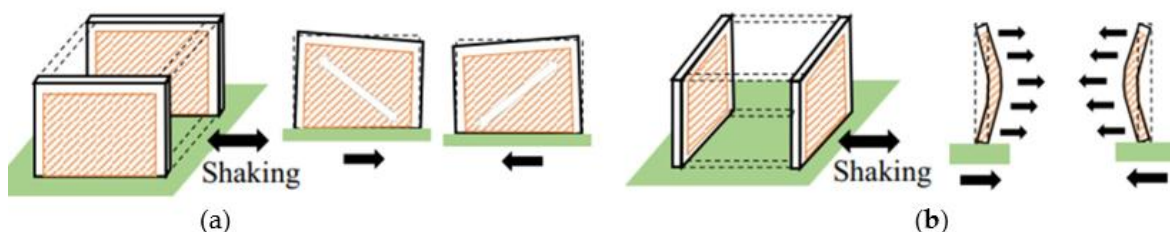


Figura 5.1. Descrizione del comportamento delle strutture in muratura confinata
(a) direzione nel piano e (b) direzione fuori dal piano.

La modalità di rottura nel piano è particolarmente critica per le pareti in muratura confinata perché si verifica lungo il percorso di trasferimento del carico laterale primario (Figura 5.1a).

Quando sottoposte a carico laterale in direzione fuori piano (come mostrato nella Figura 5.1b), le pareti in muratura subiscono sollecitazioni di flessione e taglio che possono causare fessurazioni a causa

della limitata resistenza a trazione della muratura, aumentando il rischio di collasso dovuto al ribaltamento. Il cedimento fuori piano in una parete può essere verticale o orizzontale a seconda delle distanze relative tra i supporti laterali verticali e orizzontali.

Fattori come la geometria della parete, la flessibilità del diaframma e la connessione con elementi di confinamento adiacenti influenzano la risposta fuori piano.

Nei terremoti, il cedimento fuori dal piano delle pareti murarie (muratura ordinaria - MO) è una delle modalità di cedimento più comunemente osservate.

Inoltre, si è riscontrato che la muratura allentata sotto la trave dei telai in c.a. tamponati (TT) è abbastanza comune, con conseguente collasso fuori piano dei pannelli.

Invece, le pareti in muratura confinata presentano un'integrazione superiore tra le stesse e gli elementi di collegamento in c.a. adiacenti grazie alle loro sequenze costruttive. Il legame efficace tra il telaio confinante e il e la parete in muratura negli edifici CM crea una spinta sulle travi e sulle colonne, formando un meccanismo di arco, migliorandone la resistenza fuori dal piano rispetto alle tipologie in muratura ordinaria e telai tamponati.

Le modalità di collasso della muratura confinata CM possono variare in base a una serie di fattori, inclusi parametri geometrici quali proporzioni e snellezza, nonché il tipo e l'entità del carico, come osservato in diversi studi precedenti (Tabella 5.1). Come mostrato nella tabella 5.1,

- *La rottura a taglio e quella per flessione sono le due principali modalità di rottura delle pareti in CM quando sottoposte a carico laterale nel piano.*
- *Si sviluppano fessurazioni nel pannello di muratura di una parete CM quando la resistenza a trazione della muratura è insufficiente a sopportare la richiesta di sollecitazione. La struttura di queste fessure dipende dalla resistenza relativa dei giunti di malta, dall'interfaccia della malta del mattone e dalle unità del mattone; possono seguire i giunti di malta (a gradini) o passare attraverso i mattoni.*
- *L'applicazione del carico laterale nel piano può portare a una modalità di rottura a compressione caratterizzata dallo schiacciamento della muratura, in particolare quando è presente un grande carico verticale sulla parete o quando nella costruzione viene utilizzata una muratura a bassa resistenza a compressione (Figura 5.2a).*
- *Al contrario, i carichi sismici possono causare la rottura per taglio scorrevole del giunto letto della parete (Figura 5.2b) quando vi è un basso carico verticale, un giunto di malta orizzontale debole e una bassa resistenza al taglio del calcestruzzo.*
- *Nella maggior parte dei casi, la parete in muratura sviluppa un puntone diagonale di compressione perpendicolare alle sollecitazioni di trazione quando sottoposta a carico laterale (Figura 5.2c).*
- *In alcuni casi (specialmente per pareti sottili in CM), una porzione del muro può subire sollecitazioni di trazione, che si traducono in fessure per flessione orizzontale nei corsi inferiori del muro (Figura 5.2d).*

Tipo di azione	Modalità di rottura	Riferimenti
Nel piano	Rottura a compressione	Sebbene in quasi tutti gli studi si osservi lo schiacciamento della muratura, il cedimento per compressione non è considerato una modalità di cedimento maggiore.
	Rottura a taglio per scorrimento	La rottura per scorrimento per taglio è stata osservata in studi limitati e principalmente in pareti CM che hanno proporzioni molto basse e carichi di gravità bassi, come riportato da Yoshimura et al. [39,40], Kuroki et al. [41], Wijaya et al. [42], Gavilán et al. [43], ecc.
	Rottura taglio-trazione diagonale	La formazione di fessure di taglio diagonali con conseguente rottura per tensione diagonale del CM è il tipo più comune di rottura osservato negli studi precedenti di Kato et al. [44], Aguilar et al. [45], Iba et al. [46], Yoshimura et al. [39], Tomažević, Gouveia and Lourenço [52], ecc.
	Fessure a flessione	Il cedimento per flessione non è generalmente osservato nelle pareti CM, ma sono state segnalate fessure per flessione da Kato et al. [44], Iba et al. [46], Yoshimura et al. [40,48], Zabala et al. [51], Gouveia e Lourenço [52], ecc.
Fuori piano	Fessurazioni verticali e orizzontali	La rottura fuori piano non è generalmente osservata nelle pareti in CM a causa degli effetti di confinamento dei tiranti in ca. Alcuni studi di Varela-Rivera et al. [56], Singhal et al. [35,36], ecc., hanno riportato fessurazioni verticali/orizzontali dovute alla risposta fuori piano delle pareti CM.

Tabella 1. Modalità di collasso di base delle pareti CM in precedenti studi sperimentali

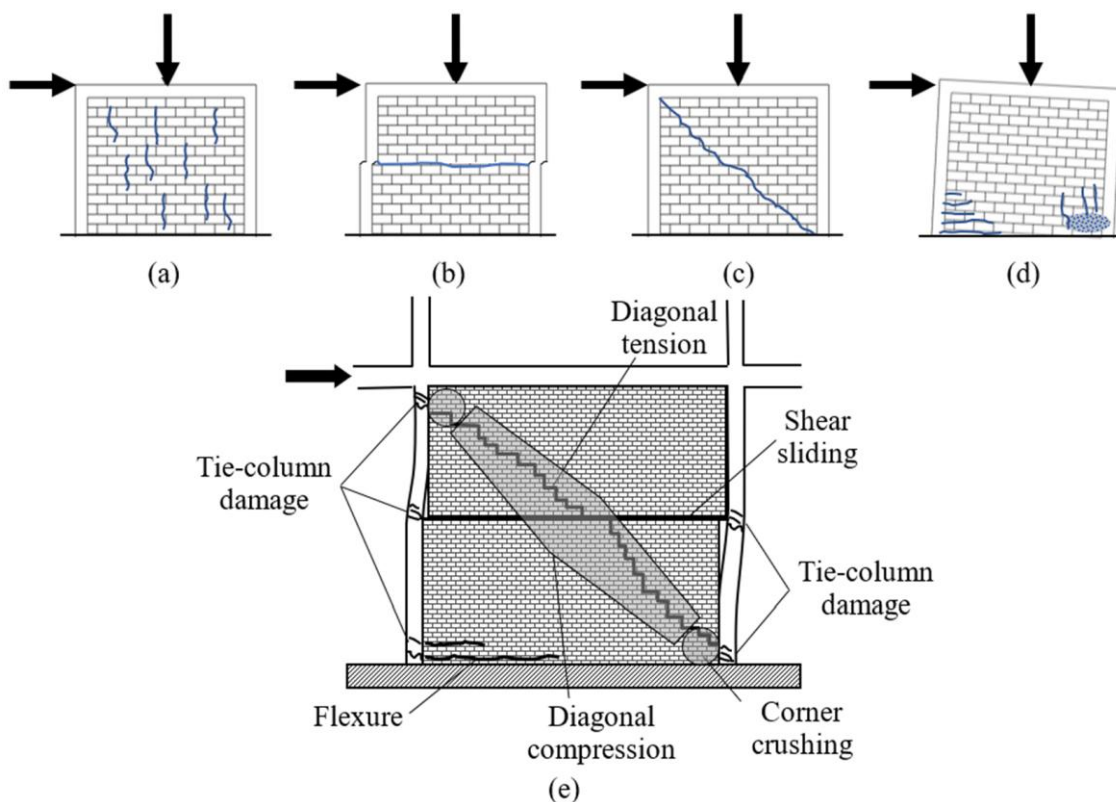


Figura 5.2. Possibili modalità di rottura nel piano delle pareti in CM:

(a) rottura per compressione della parete in muratura, (b) scorrimento a taglio del giunto del letto di malta nella parete in muratura, (c) rottura a taglio diagonale nella parete in muratura, (d) rottura per flessione nella parete in muratura (e) combinazione di diverse modalità di nel piano in CM.

Sebbene teoricamente possano verificarsi meccanismi di collasso individuali, i danni osservati nelle strutture CM di solito coinvolgono una combinazione di diverse modalità; ad esempio, Figura 5.2e.

È comune osservare nelle strutture CM danni nel piano indotti dal taglio, che possono assumere forme diverse, come scorrimento del giunto del letto, compressione diagonale o azione del puntone, e tensione diagonale in cui le fessure taglio iniziano dalla parete in muratura e si propagano a- verso le colonne di collegamento.

Tipicamente, si osservano fessure diagonali ben sviluppate negli edifici CM con telai leggeri, cioè quelli con piccole sezioni trasversali di colonne di collegamento e una percentuale inferiore di acciaio, come spesso accade.

Tuttavia, per telai robusti dove la rigidezza relativa del telaio in ca è significativa rispetto alla parete in muratura, o dove gli elementi di collegamento hanno sezioni maggiori, il comportamento della parete in cm può essere simile a quello dei telai in ca tamponati in muratura. In tali casi, le pareti in muratura cedono attraverso diversi meccanismi come lo scorrimento dei giunti del letto, la fessurazione diagonale e lo schiacciamento agli spigoli.

I danni nel piano indotti da flessione, come mostrato nella Figura 5.2e, sono relativamente rari e comprendono fessurazioni da trazione orizzontali nei corsi inferiori della muratura e nei pilastri di collegamento all'estremità tesa del muro, e comprendono anche la rottura di mattoni e calcestruzzo nella zona compressa e cedimento dell'armatura nei pilastri di collegamento. È più probabile che i danni da flessione nel piano si verifichino in pareti con un rapporto di aspetto più elevato (cioè pareti sottili) o un rapporto momento-taglio più elevato.

Le pareti CM con un rapporto elevato (ovvero, larghezza ridotta rispetto all'altezza) sono più soggette a rottura flessionale nel piano sotto carico sismico. Ciò è particolarmente comune nei pilastri tra aperture o in muri con basso carico di sovraccarico, nonché in muri con resistenza a flessione insufficiente a causa di una percentuale inferiore di armatura nei pilastri di collegamento.

Ci si può aspettare che un cedimento misto taglio-flessione si verifichi più frequentemente nelle strutture CM, sebbene il cedimento flessionale puro non sia comunemente osservato.

Negli edifici CM i tiranti in c.a. svolgono un ruolo importante nel fornire ulteriore supporto laterale alle pareti in muratura. In caso di gravi danni alle pareti in muratura, i tiranti assumono la funzione portante e impediscono il crollo dell'edificio.

Questo è il motivo per cui è importante garantire che i pilastri di collegamento siano adeguatamente progettati e costruiti per resistere ai carichi e alle forze previsti. Secondo la letteratura, sotto carico laterale, i tiranti delle pareti in CM possono agire sia durante la trazione che durante la compressione, a seconda della direzione e della magnitudo del terremoto e dei carichi gravitazionali.

Inoltre, quando sottoposta a un carico assiale combinato e a un momento flettente, la sezione trasversale della parete sviluppa sollecitazioni di trazione e compressione. Tuttavia, la muratura e il calcestruzzo hanno una bassa resistenza a trazione, quindi il rinforzo longitudinale dei pilastri trasferisce le sollecitazioni di trazione, mentre una combinazione di calcestruzzo, muratura e rinforzo longitudinale resiste alle sollecitazioni di compressione.

Nel caso dei pilastri di collegamento, osservazioni hanno dimostrato che possono verificarsi fessurazioni di taglio alle estremità e di flessione lungo l'altezza, inoltre può verificarsi schiacciamento

del calcestruzzo alle estremità a causa della compressione e le armature possono cedere per trazione eccessiva.

6. MODELLI DI CALCOLO

6.1. Generalità

Nonostante il sistema strutturale della muratura confinata sia abbastanza antico, le tecniche di modellazione e analisi si sono affermate solo negli ultimi anni.

Ciò è dovuto alla significativa variazione dei materiali e delle metodologie di costruzione, che ha portato ad una comprensione limitata del complesso comportamento composito delle pareti per diverse condizioni di carico.

Le strategie di modellazione numerica per l'analisi degli edifici CM, data la loro complessità può essere affrontata con rigore solo tramite modelli 3D agli elementi finiti non lineari che tuttavia si scontrano con un onere computazionale eccessivo e l'utilizzo di molti parametri meccanici per descrivere il comportamento del sistema muratura-c.a.

Per affrontare queste problematiche, nel corso degli anni sono state sviluppate diverse tecniche di modellazione per l'analisi delle pareti in CM.

Queste strategie di modellazione, come riepilogato nella Figura 6.1, hanno vari gradi di raffinatezza e precisione per catturare le modalità di collasso e il comportamento meccanico per azioni laterali.

Nei modelli di elementi lineari 2D semplificati, gli elementi di costruzione vengono modellati utilizzando elementi trave-colonna a due nodi o elementi guscio a quattro nodi.

L'uso di modelli semplificati è diventato popolare in letteratura grazie alla loro applicabilità pratica.

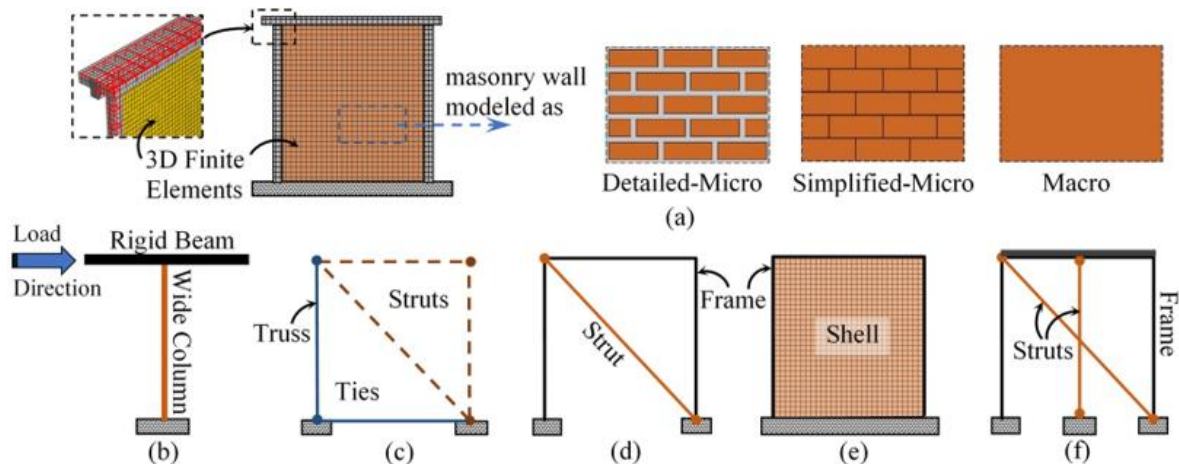


Figura 6.1. Diverse strategie di modellazione per murature confinate: (a) metodi degli elementi finiti, (b) metodo delle colonne larghe, (c) metodo puntone e tirante, (d) metodo puntone equivalente, (e) metodo guscio equivalente e (f) metodo del puntone verticale-diagonale.

Sono stati sviluppati vari modelli semplificati, come WCM (modello a colonna larga), STM (modello puntone e tirante), ESM (modello equivalente puntone/guscio), ETM (modello equivalente traliccio) e VDSM (puntone verticale-diagonale modello).

L'applicabilità di diversi modelli semplificati è stata valutata da Borah et al., analizzando le pareti a un piano ed edifici a tre piani mediante analisi lineare e analisi non lineare statica tipo pushover. Nel complesso, nonostante le tecniche di modellazione analitica siano progredite nel corso degli anni, è

ancora difficile ottenere modelli FE affidabili e pratici, in particolare per le strutture di grandi dimensioni.

6.2. Modellazione a macroelementi MDEM

La strategia di modellazione utilizzata per le analisi di strutture in muratura confinata proposta segue l'approccio MDEM (Masonry Discrete Element Method) e precisamente del macro-elemento 3D sviluppato all'Università di Catania (I. Calio, M. Marletta, B. Pantò et.al.) implementato nel software Fata Next della Stacec S.r.l. L'utilizzo della macro-modellazione specialmente in strutture irregolari e miste, consente di ottenere una risposta strutturale più realistica rispetto ai classici metodi che utilizzano il modello a telaio equivalente tipo metodo SAM e derivati. Tale macro-elemento viene utilizzato per discretizzare un pannello murario secondo le sue reali dimensioni nel piano ed il suo spessore, il suo comportamento meccanico riproduce i tre principali meccanismi di rottura dell'elemento strutturale, ovvero presso-flessione, taglio e scorrimento dei giunti. Nella figura 7.1 vengono schematizzati i tre comportamenti dell'elemento strutturale nel suo piano ed il rispettivo approccio utilizzato nella modellazione. La risposta a pressoflessione viene ottenuta mediante integrazione delle tensioni fornite da un letto di molle normali ai lati del pannello, la risposta a taglio mediante le forze fornite da una coppia di molle diagonali e la risposta a scorrimento grazie alla presenza di una molla trasversale posta in interfaccia.

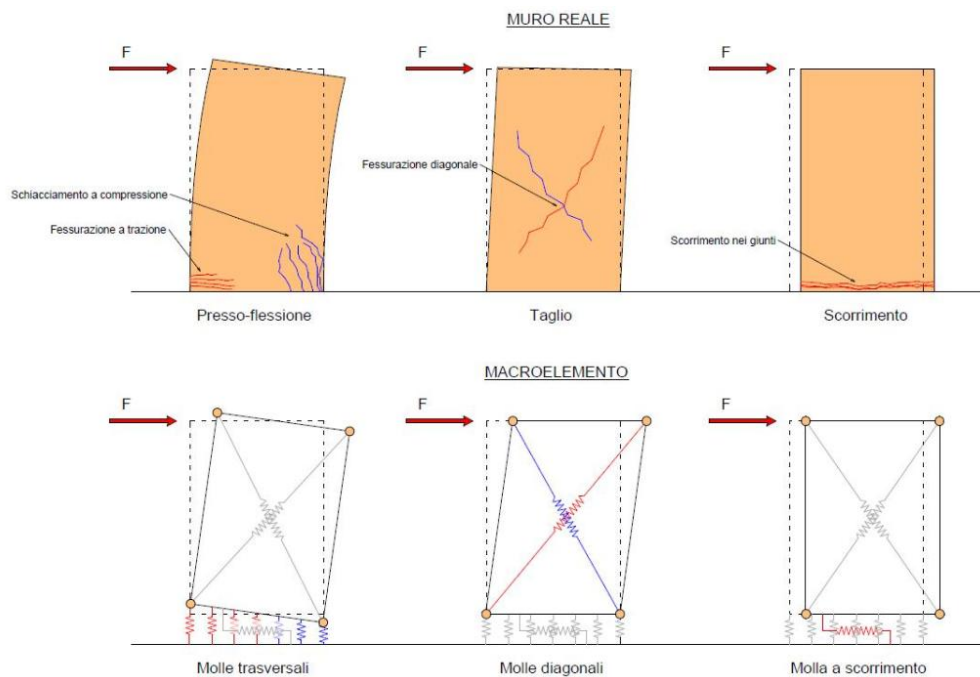


Figura 6.2. Modellazione meccanica macroelemento: muro reale e idealizzazione a macroelementi tramite calibrazione di NLINKS non lineari (da I. Calio, B. Pantò, M. Marletta et. AI-UNICT)

Il comportamento fuori piano del macro-elemento viene ottenuto mediante l'estensione tridimensionale di quanto già visto nella risposta di interfaccia. In particolare, vengono disposte diverse file di molle normali in grado di cogliere la risposta a pressoflessione deviata in interfaccia ed un'ulteriore coppia di molle a scorrimento anch'esse in interfaccia disposte secondo la direzione ortogonale al pannello.

La cinematica del macro-elemento viene descritta attraverso 7 gradi di libertà di cui 6 sono necessari per controllare il moto da corpo rigido ed uno per rendere articolato il pannello e quindi cogliere la risposta a taglio nel suo piano. Ogni singolo pannello è connesso a quello adiacente mediante degli elementi di interfaccia, in modo da creare una mesh di macroelementi.

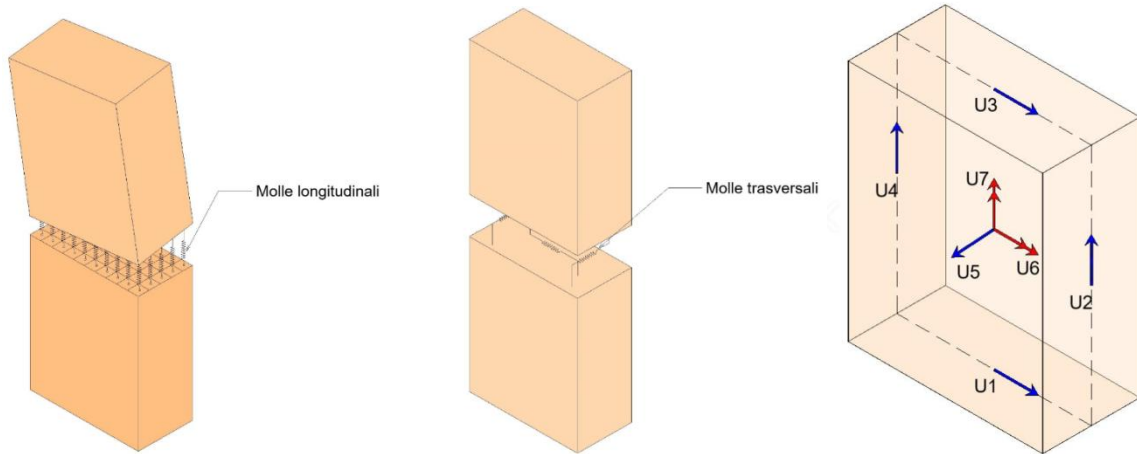


Figura 6.3. Macroelemento 3D risposta fuori piano e definizione dei gradi di libertà (da I. Calio, B. Pantò, M. Marletta et. Al-UNICT)

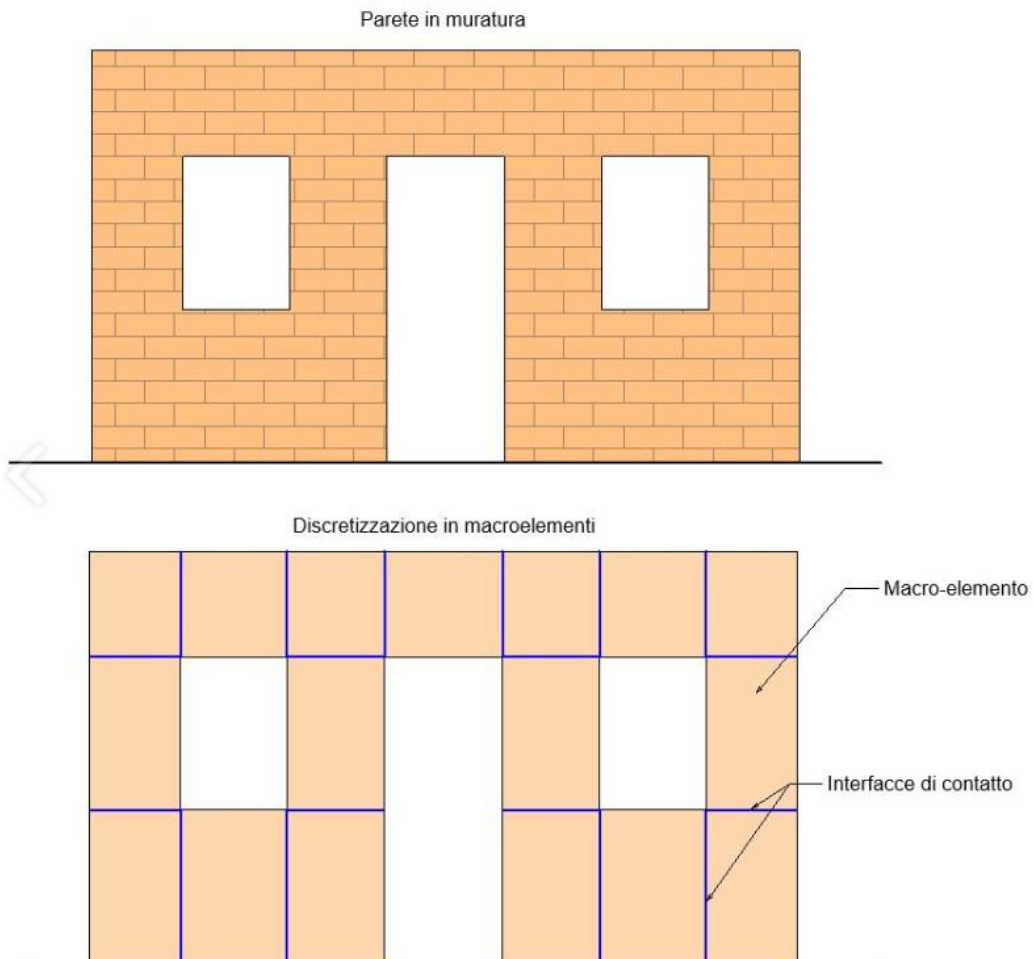


Figura 6.4. Strategie di modellazione a macroelementi parete (da I. Calio, B. Pantò, M. Marletta et. Al-UNICT)

I legami costitutivi implementati per le molle di interfaccia sono del tipo elastico perfettamente plastico con duttilità limitata sia in trazione che in compressione, per le molle a scorrimento si utilizza un legame rigido- plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb e per le molle diagonali resistenti a

taglio nel piano del pannello si utilizza un legame elasto-plastico con incrudimento dipendente dallo sforzo normale medio del pannello e criterio di rottura alla Mohr-Coulomb o Turnšek e Cačovic.

6.3. Interazione macroelemento-elementi in c.a.

Sebbene la tecnica di modellazione per elementi mono e bidimensionale comunemente utilizzata nelle analisi strutturali in campo sismico sia quella del metodo degli elementi finiti (FEM), l'approccio utilizzato nel caso del macro-elemento è tipico del metodo degli elementi discreti (DEM), il solutore deve quindi essere capace di trattare entrambi gli approcci e l'interazione tra queste due famiglie di elementi attraverso opportuni elementi detti "links".

A tal fine il solutore FEM di Fata-Next è stato ulteriormente potenziato in modo da rispondere a tale esigenza consentendo la modellazione anche di strutture miste quali in muratura confinata.

Per quanto riguarda la risposta non lineare degli elementi asta questa viene ottenuta mediante una modellazione tramite cerniere plastiche con sezione a fibre (zero length) in cui il controllo della plasticizzazione degli elementi in c.a. avviene lungo tutto l'elemento fig.7.3 (Caliò and Pantò, 2014). Le modalità di collasso sono rappresentate nella figura 7.4 (Caliò and Pantò, 2014), dove si evince che oltre ai classici meccanismi di rottura delle pareti in muratura, l'interazione con l'intelaiatura in c.a. comporta rottura a taglio o flessione in elementi colonna e plasticizzazione a flessione in elementi trave.

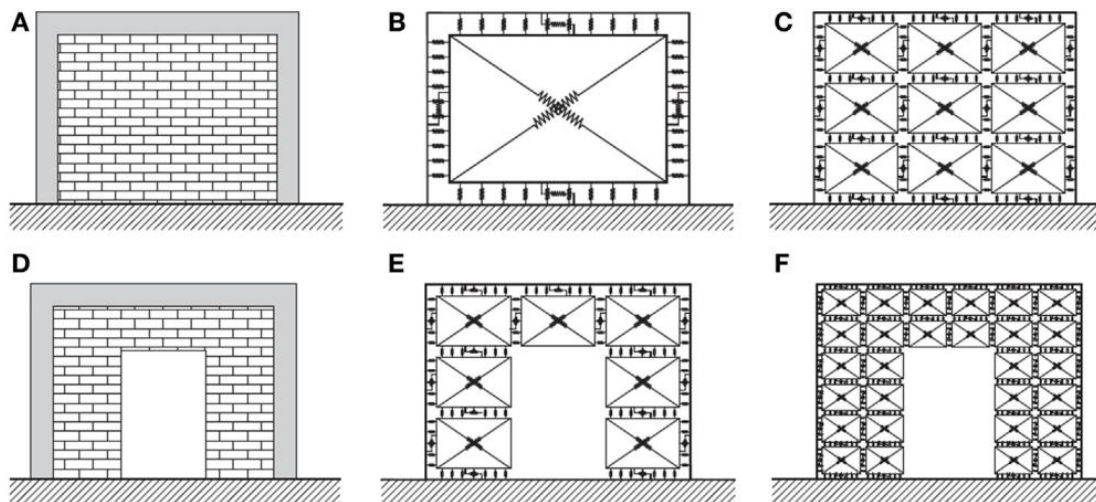


Figura 7.3. Qualitative representation of full unfilled (A) and opened infilled frame (D) and their modeling by the basic mesh (B,E) and a more refined mesh (C,F) of macroelements (Caliò and Pantò, 2014).

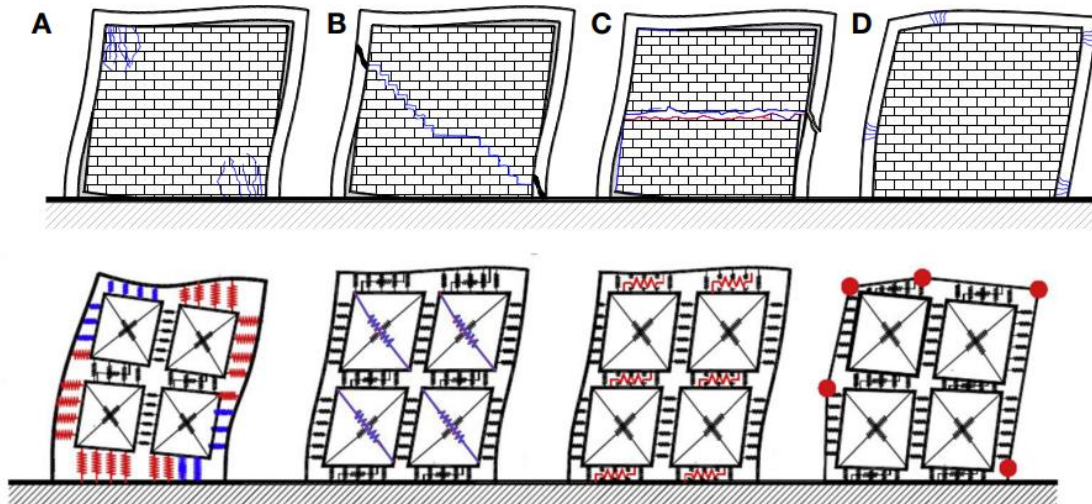


Figura 7.4. Qualitative representation of the typical collapse mechanisms of infill frame and their simulation by the proposed hybrid FE-macro-model approach. Corner crush (A); diagonal cracking (B), sliding shear (C), and frame failure (D) (Calio and Pantò, 2014).

7. MURATURE CONFINATE E TELAI TAMPONATI

7.1. Comportamento meccanico a confronto

La differenza di comportamento meccanico ai fini della risposta sismica tra le murature confinate e i telai tamponati dipende essenzialmente:

- Dalle fasi di realizzazione
- Dalla qualità e dettagli strutturali dei materiali muratura e c.a.

Tutto ciò comporta l'attivazione di meccanismi resistenti e di collasso diversi.

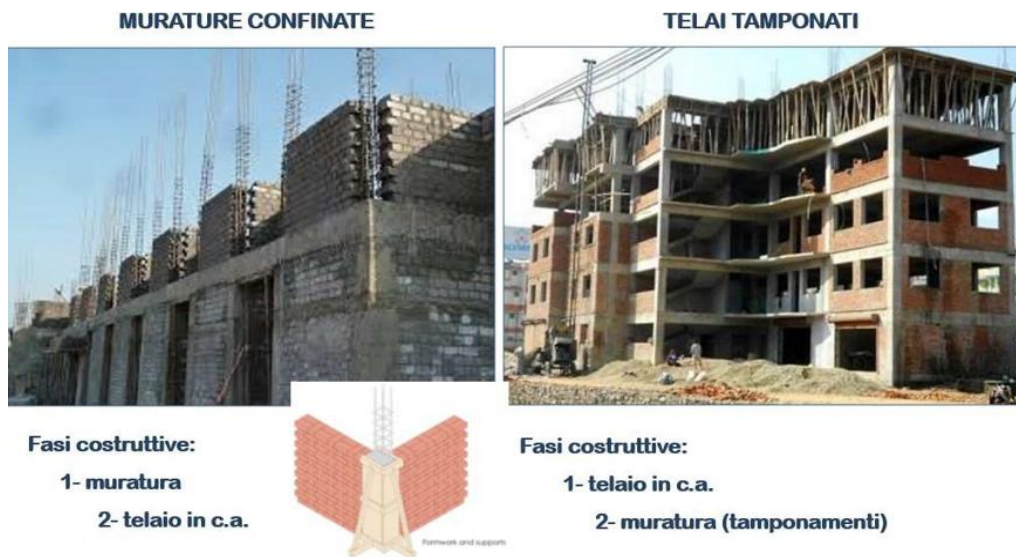


Figura 7.1: Fasi di realizzazione per edifici in muratura confinata e telai tamponati (Calio et.al)

In una muratura confinata vengono realizzati per prima i pannelli murari con relative aperture ed architravi poi i telai di confinamento costituito da pilastri e travi.

Il getto dei solai e delle travi viene effettuato contemporaneamente piano per piano, in tal modo i pannelli murari si caricano per effetto dei carichi verticali ed esibiscono una resistenza a taglio e pressoflessione elevata. Inoltre il confinamento dei telai indirizza il meccanismo di collasso delle pareti

per taglio diagonale (fortemente dissipativo) impedendo l'attivazione per pressoflessione-rocking e taglio-scorrimento (poco dissipativi).

La muratura confinata grazie all'elevato grado di collegamento tra telaio è pannello risulta poco vulnerabile a meccanismi di I modo fuori piano.

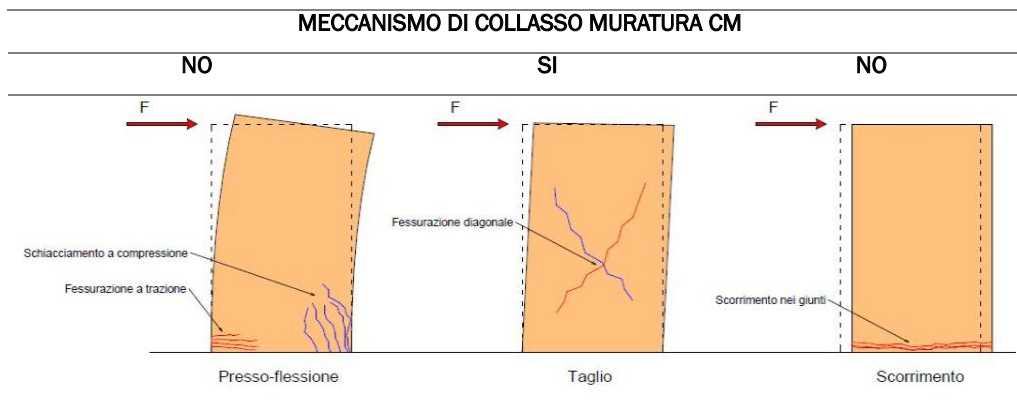


Figura 7.2: Edificio in muratura confinata: Collasso a taglio dei maschi

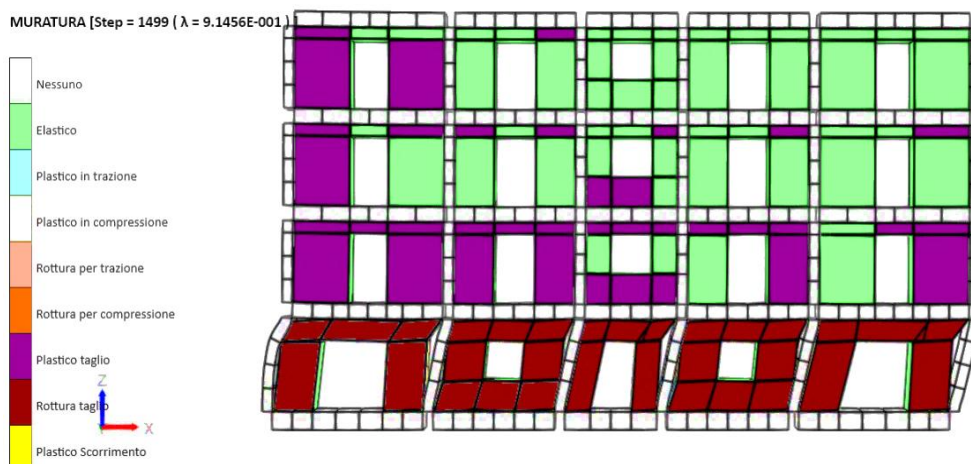


Figura 7.3: Parete in muratura confinata: Collasso e plastico a taglio di maschi e fasce

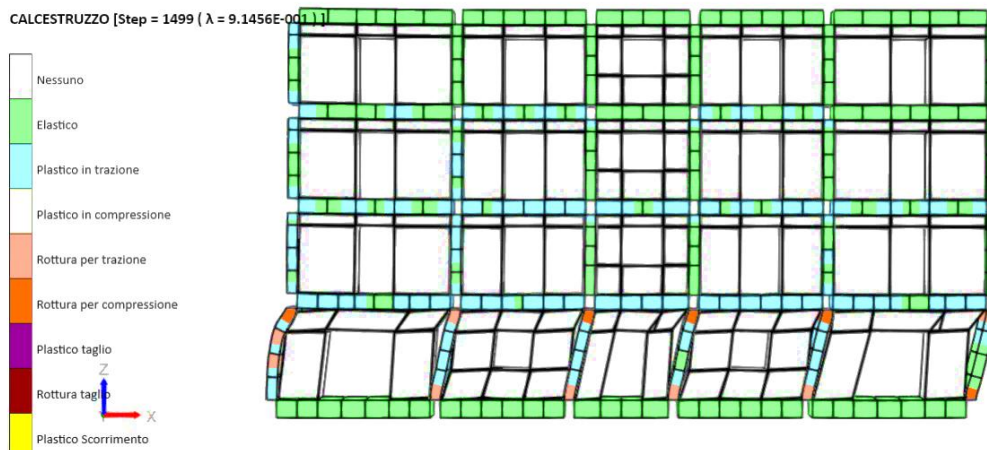


Figura 7.4: Parete in muratura confinata: Schiacciamento a compressione e fessurazione calcestruzzo telaio in c.a.

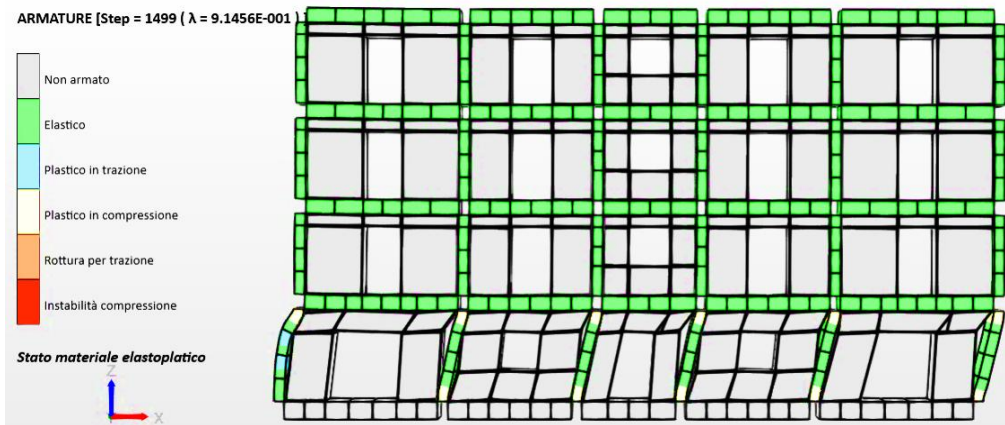


Figura 7.5: Parete in muratura confinata: Snervamento a trazione/compressione acciaio telaio in c.a.

Nei telai in c.a. tamponati, vengono realizzati dapprima lo scheletro portante in c.a. e poi a maturazione avvenuta dei getti vengono costruite le tamponature.

La differenza sui materiali è che le tamponature essendo elementi di chiusura vengono per lo più realizzati in doppia fodera per motivi di isolamento termico o in monoblocco.

In ogni caso la tamponatura presenta uno stato tensionale verticale molto basso dovuto essenzialmente al peso proprio e solo in parte a piccole aliquote dovute a deformazioni differite nel tempo per viscosità del calcestruzzo delle travi. Questo comporta una bassa resistenza a taglio e fuori piano soprattutto in presenza di doppio paramento e del grado di ammortamento inefficace delle tamponature al telaio.

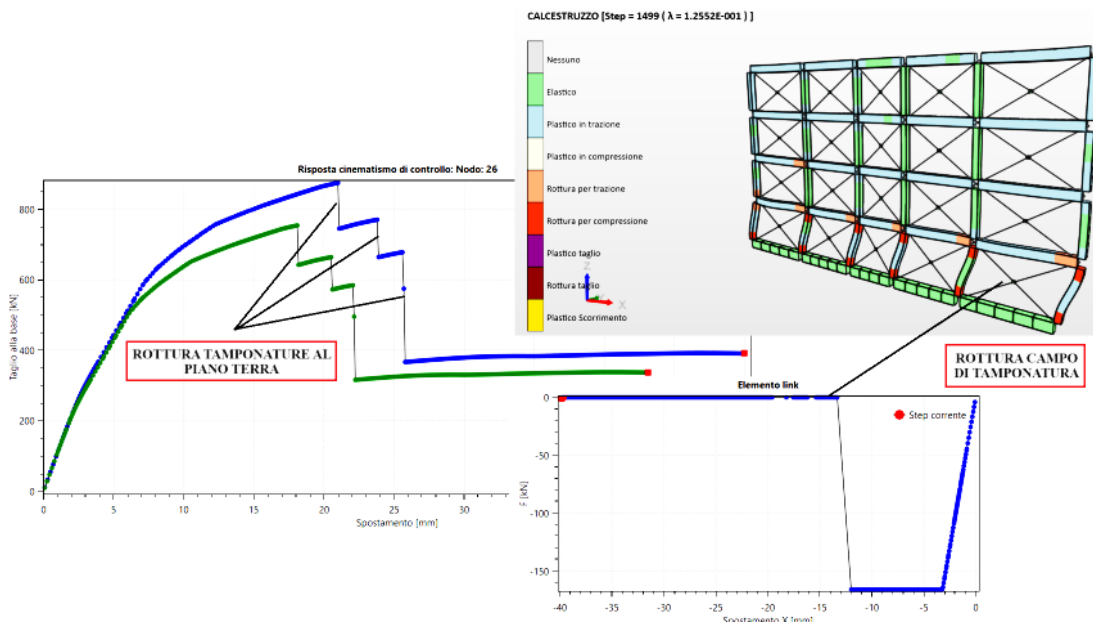


Figura 7.6: Edificio in c.a. con tamponature: Meccanismo di rottura tamponature e danneggiamento localizzato telaio

8. EFFETTO CONFINAMENTO DI MURATURE INTELAIATE

Le murature confinate CM sono tipologie strutturali sismiche con resistenze sismiche elevate e duttilità globale simile alle murature ordinarie di pari materiale come previsto in figura 8.1.

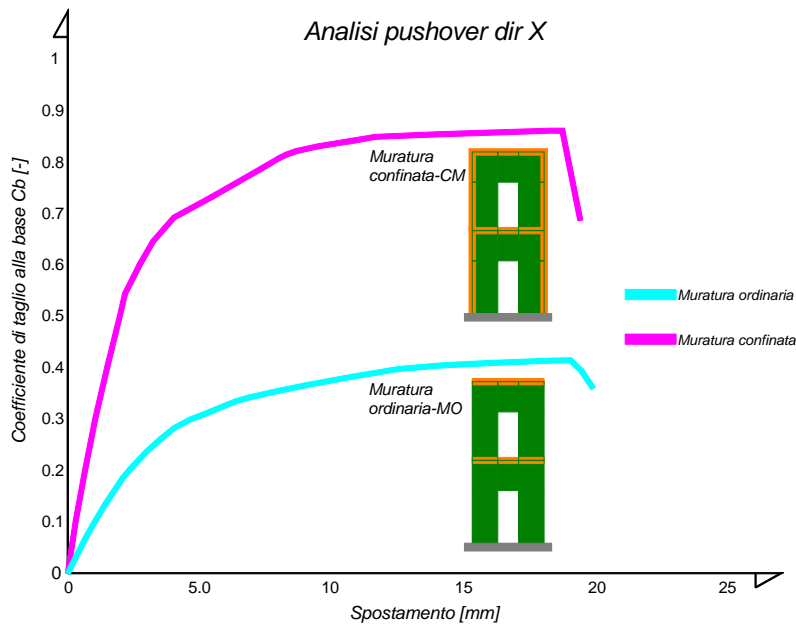


Figura 8.1: Tipiche curve pushover: Muratura confinata CM e Muratura ordinaria MO

Tuttavia la risposta meccanica in termine di danno risulta profondamente diversa, precisamente:

- La muratura ordinaria esibisce in assenza di intelaiatura un comportamento poco resistente e dissipativo dovuto al collasso per pressoflessione-rocking dei maschi e rottura a trazione/taglio delle fasce di piano in relazione alla presenza o meno di cordoli, architravi e/o catene.
- La muratura confinata grazie alla presenza di intelaiatura in c.a. sufficientemente resistente inibisce meccanismi di rottura poco dissipativi quali la pressoflessione con rocking e taglio per scorrimento orizzontale (danneggiamento locale) a favore di meccanismi gerarchici fortemente dissipativi quali il taglio per fessurazione diagonale (danneggiamento diffuso).

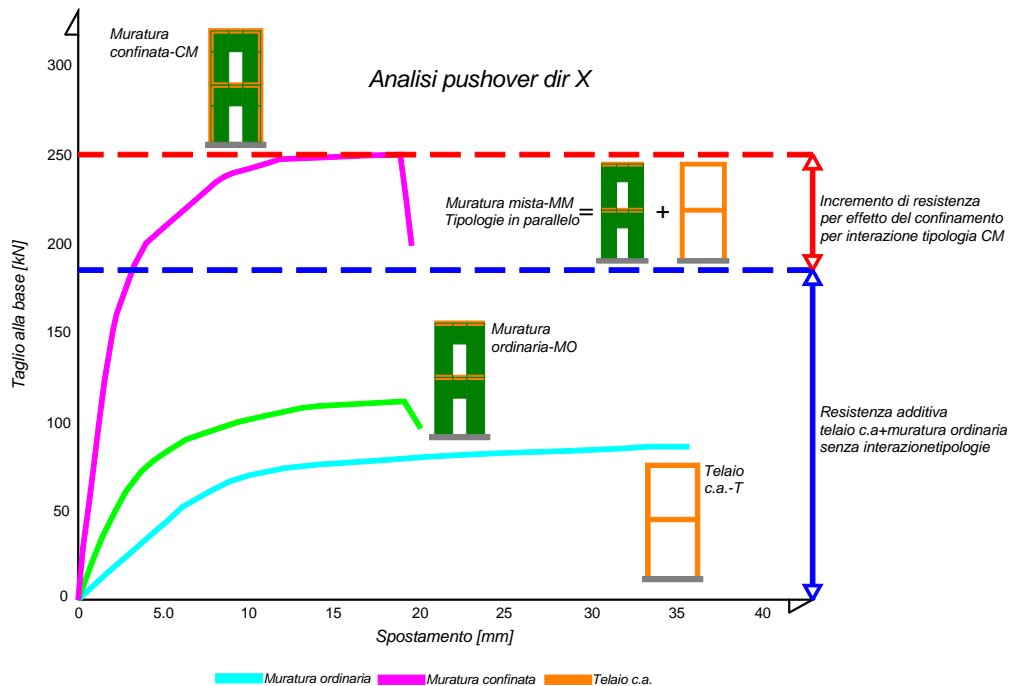


Figura 8.2: Curve pushover - Confronto tipologie strutturali e determinazione confinamento per tipologia CM

L'elevata resistenza di tale tipologia è dovuta essenzialmente all'effetto di confinamento che il telaio in c.a. esercita sulla muratura lungo le zone di contatto perimetrale che permette ai sistemi di dissipare

energia per interazione tipologie strutturali senza distacchi importanti e relativa formazione di effetto puntone con danneggiamento del telaio e perdita parziale del contributo alla resistenza dello stesso. Nella figura 8.2 al fine di comprendere l'effetto di confinamento in termini di incremento di resistenza strutturale sono rappresentate le curve di capacità tagliante-spostamento nodo di sommità per:

- *Muratura confinata;*
- *Muratura ordinaria;*
- *Solo telaio in c.a. di confinamento;*

vengono riportate inoltre:

- *La resistenza totale massima della muratura confinata tramite modello di interazione dei sistemi;*
- *La resistenza totale massima somma del contributo della muratura ordinaria e quello del solo telaio in c.a. di confinamento in cui i due sistemi sono in parallelo ed in assenza d'interazione;*

Si evince come la differenza tra le due resistenze o extra resistenza sia dovuta all'effetto del confinamento che il telaio in c.a. conferisce alla muratura facendole esibire meccanismi dissipativi e resistenti per danneggiamento globale dei maschi.

Infine si fa notare come i modelli che considerano i due sistemi in parallelo trascurando l'interazione lungo i lati delle pareti quali modelli a telaio equivalenti e similari:

- *non riescono a cogliere l'effetto confinamento trasformando con modellazione non appropriata il sistema muratura-c.a. di tipo misto non accoppiato e congruente nelle sole zone in corrispondenza degli impalcati ed in fondazione per continuità o presenza di impalcati rigidi;*
- *Sottostimano la resistenza e duttilità globale rendendo artificialmente la struttura più vulnerabile;*
- *Non riproducono i meccanismi di danneggiamento riscontrati durante i terremoti pregressi in quanto l'assenza di interazione non riesce a cogliere né i meccanismi sul telaio, sulla muratura e quelli miste telaio-muratura.*

Per cui ai fini della modellazione solo le tecniche basate su elementi discreti con interfacce quali macroelementi o elementi distinti, elementi finiti con contatto possono stimare con una certa accuratezza la vulnerabilità di tali tipologie strutturali con ottima capacità antisismica.

9. CASO DI STUDIO

Al fine di quantificare l'effetto del confinamento di una muratura confinata rispetto ad una muratura ordinaria o telaio tamponato si fa riferimento alla parete multipiano di figura 9.1 dalle dimensioni 23.50 x 13.10 m su 4 livelli. Nelle figure 9.2-9.3 vengono riportate il telaio di confinamento in c.a. e la parete in muratura ordinaria. La geometria della parete, degli elementi strutturali, le caratteristiche fisico meccaniche e la distribuzione delle armature negli elementi in calcestruzzo armato sono riportate nella tabella 9.1.

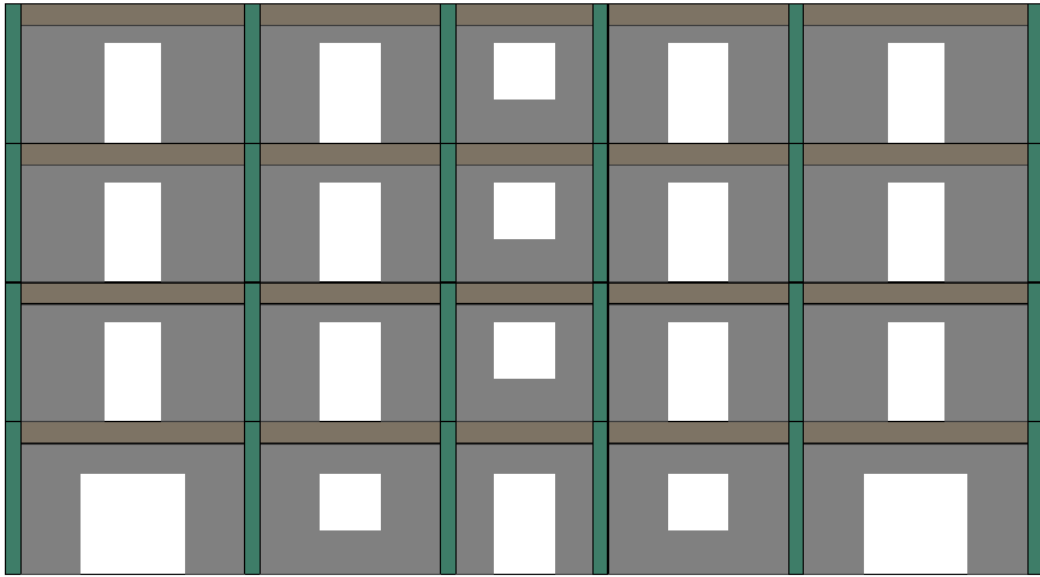


Figura 9.1: Parete in muratura confinata oggetto di analisi

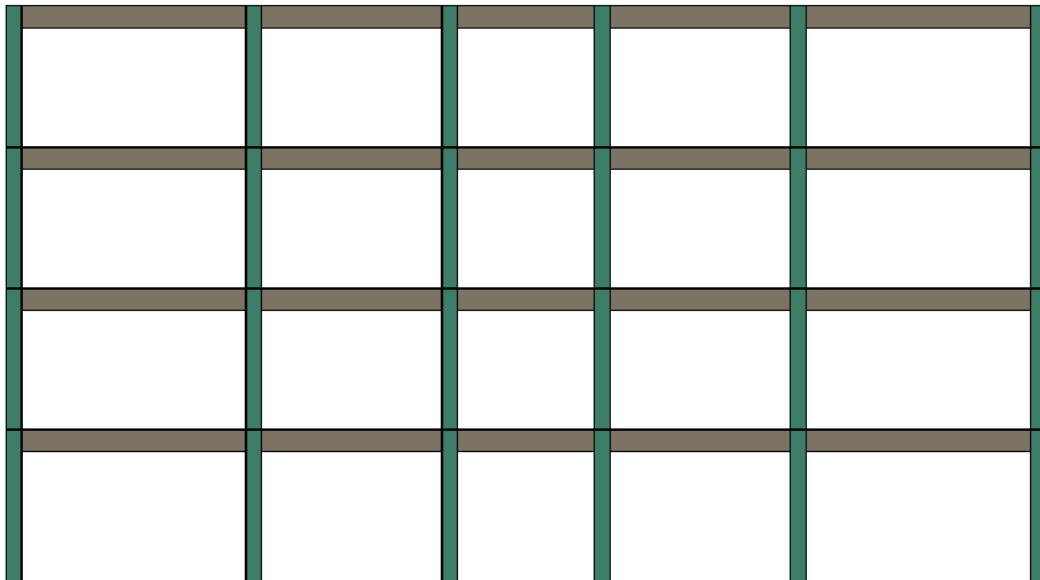


Figura 9.2: Telaio in c.a. confinante

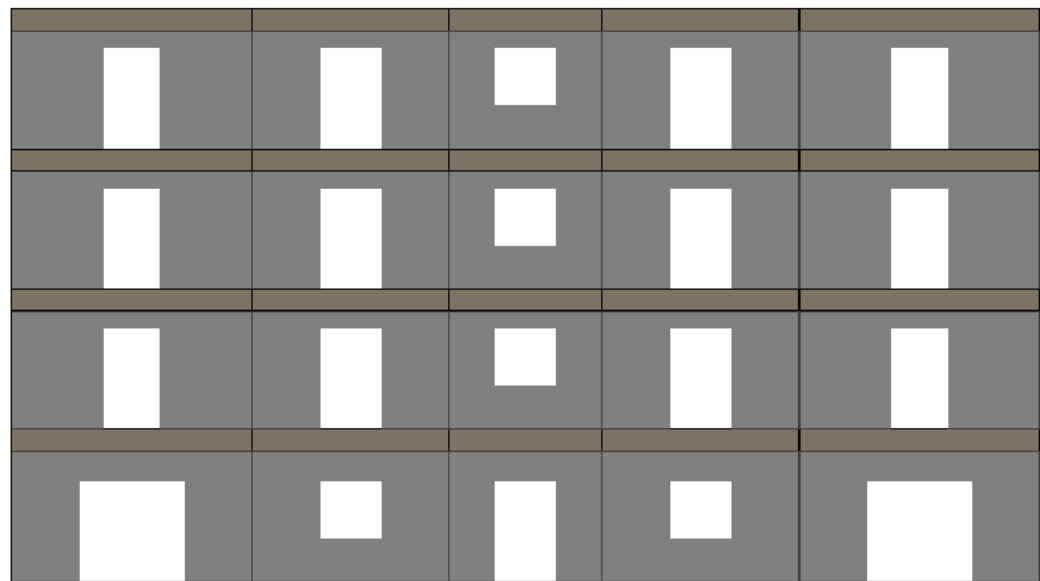


Figura 9.3: Muratura ordinaria senza confinamento

GEOMETRIA PARETE					
L[cm]	H[cm]	H _{piano} [cm]		L _{campate} [cm]	
2350	1310	1	350	1-5	550
		2-3-4	320	2-4	450
				3	350
GEOMETRIA ELEMENTI STRUTTURALI					
PILASTRI (R35X35)		CORDOLI [R30X50]		PARETE	
B=35 cm	H=35 cm	B=30 cm	H=50 cm	Spessore=30 cm	
MATERIALI E CARATTERISTICHE MECCANICHE - LC2 → FC=1.20					
ELEMENTO		f_{cm} [Mpa]	E_{cis} [Mpa]	f_{ym} [Mpa]	E_{1s} [Mpa]
Pilastri	Calcestruzzo armato	20.00	29960	380.00	210000
Cordoli	Calcestruzzo armato	20.00	29960	380.00	210000
Muratura	Muratura di mattoni pieni	f_m [Mpa]	τ_0 [Mpa]	E [Mpa]	G [Mpa]
		3.45	0.09	1500	500
DISTRIBUZIONE ARMATURE ELEMENTI IN C.A.					
ELEMENTO		ARMATURE LONGITUDINALI		ARMATURE TRASVERSALI	
Pilastri 35x35		4+4 ϕ 16		Φ 8/20 cm	
Cordoli 30x50		5+5 ϕ 14		Φ 8/20 cm	

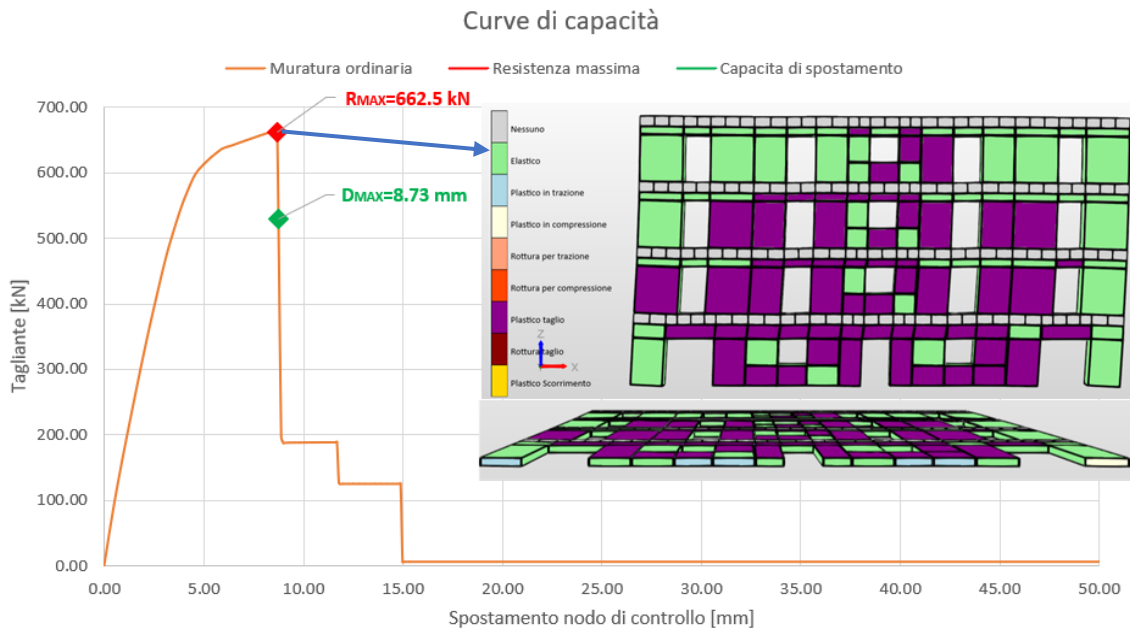
Tabella 9.1: Parete in muratura confinata: Geometria parete ed elementi strutturali, caratteristiche fisico meccaniche e distribuzione delle armature.

I carichi agenti sugli impalcati a livello di cordoli di piano con riferimento ai solai in laterocemento che scaricano direttamente sulla parete interessata per una larghezza di influenza pari a 5.0 m valgono:

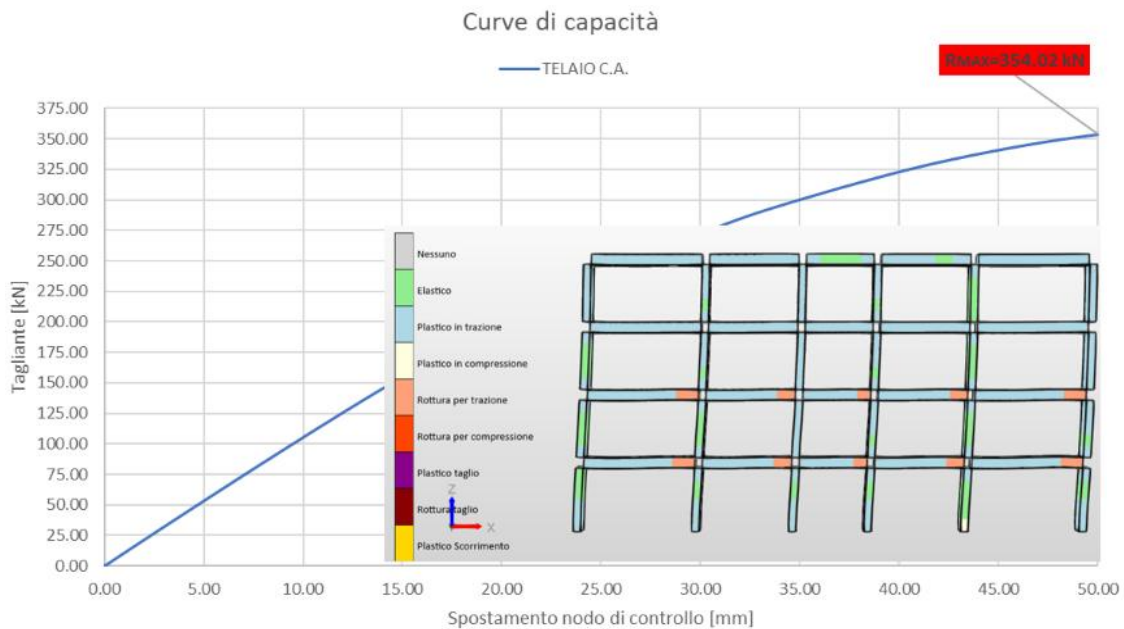
- $G_{1k-solai} = 3.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \rightarrow 3.00 \cdot 5.0 = 15.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} ;$
- $G_{2k-perm-solai} = 2.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \rightarrow 2.00 \cdot 5.0 = 10.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} ;$
- $Q_{1k-cat.A} = 2.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \rightarrow 2.00 \cdot 5.0 = 10.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} ;$
- $Q_{2k-Neve} = 1.20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \rightarrow 1.20 \cdot 5.0 = 6.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} ;$

Le analisi sismiche sulla parete multipiano 2D tramite pushover con profili di carico proporzionale alle masse sono state effettuate ai soli fini di valutare la massima resistenza e capacità di spostamento (riduzione del 15-20 % della resistenza) necessari a comprendere la risposta strutturale in termini di meccanismo di collasso.

Risposta parete muratura MO



Risposta telaio in c.a. muratura CM



Dalle risultanza delle analisi effettuate sulla tipologia in muratura ordinaria si evince come il meccanismo di collasso prevalente in corrispondenza del punto di massima resistenza è pressoflessione con rocking con plasticizzazione a taglio di tipo poco dissipativo e di limitata resistenza.

Risposta muratura CM

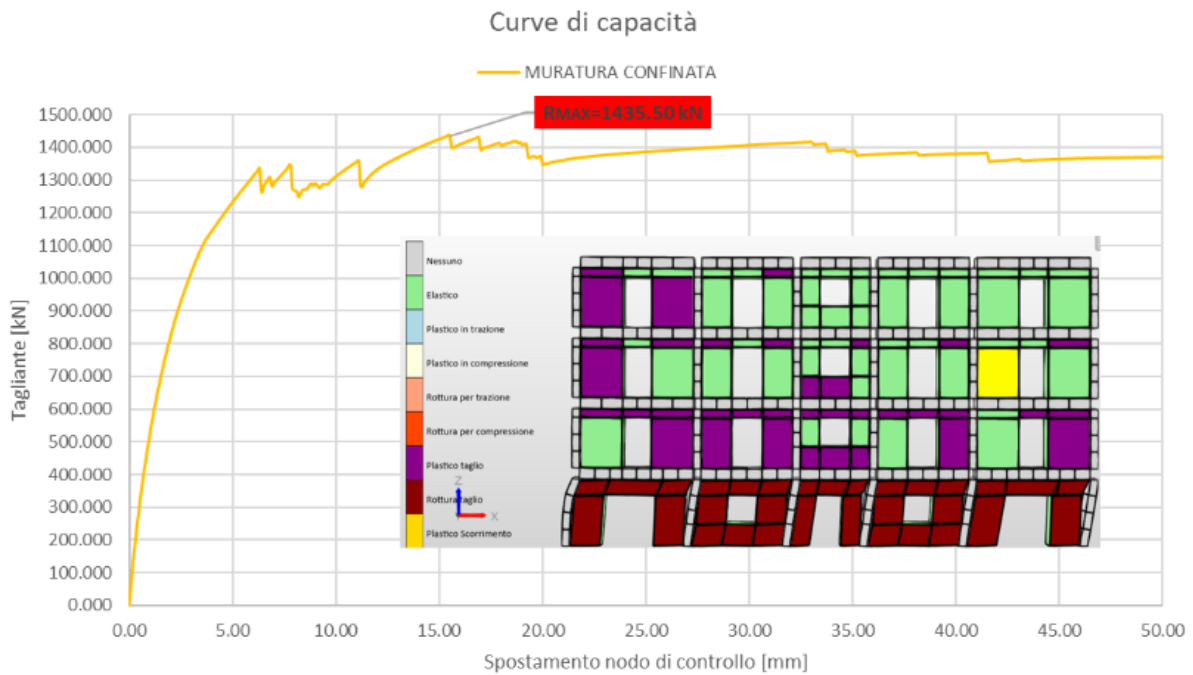


Figura 9.5: Muratura CM: Curva di capacità e stato di danno muratura in corrispondenza del punto di massima resistenza

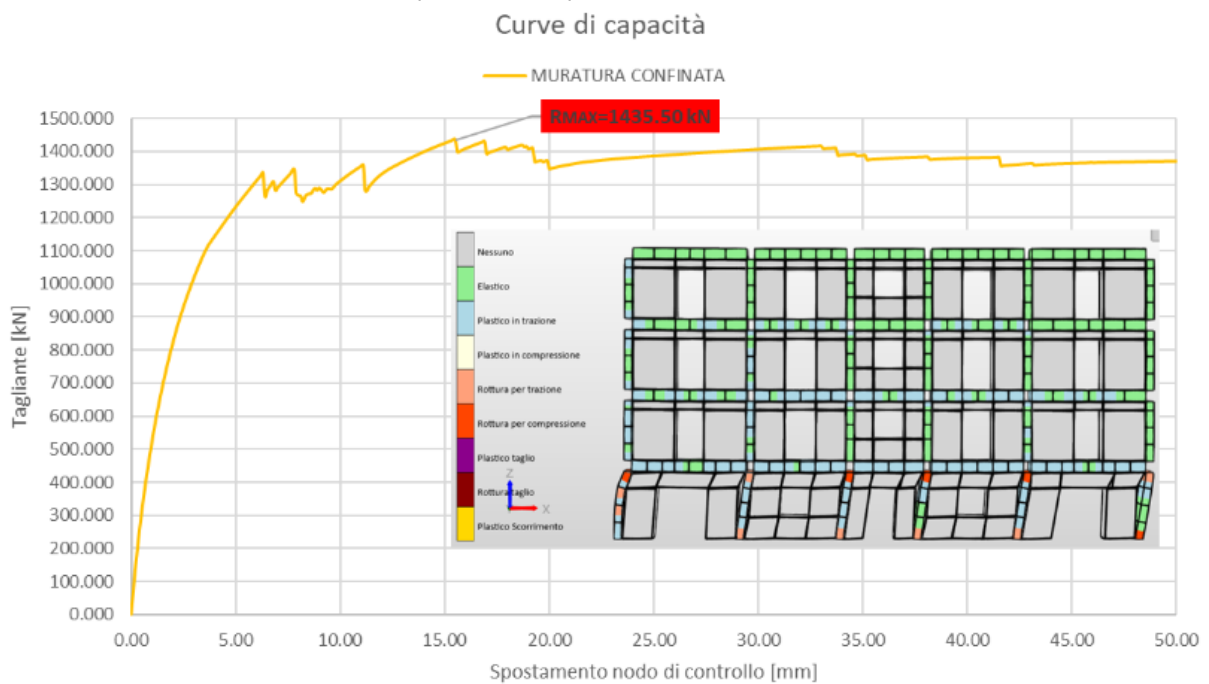


Figura 9.6: Muratura CM: Curva di capacità e stato di danno telaio in c.a. in corrispondenza del punto di massima resistenza

La risposta sismica ottenuta dal modello a macroelementi 3D con interazione tramite elementi beam con plasticità concentrata e sezione a fibre come si evince dalle fig.9.5-9.6 rispecchia le indagini sperimentali su tale tipologia strutturale. La resistenza della struttura della parete in muratura C.M risulta molto elevata rispetto alle murature ordinarie o telai tamponati grazie all'effetto del

confinamento conferito dal telaio in c.a. sufficientemente robusto che indirizza il danno per taglio diagonale dei maschi murari ai piani più bassi con notevole capacità dissipativa e resistenza, mentre il danneggiamento della cornice in c.a. rimane contenuto con fessurazioni e plasticizzazioni locali in assenza di rottura che avrebbe inficiato sulla perdita di resistenza globale dovuta al confinamento. Nella fig.9.6 è possibile ottenere una misura del confinamento in termini di extra-resistenza rispetto ad un sistema telaio-parete che lavora in parallelo ma non interagiscono lungo la cornice se non in corrispondenza degli impalcati. E proprio l'interazione lungo la cornice per contatto a scorrimento e/o meccanismi di distacco-schiacciamento che permettono di dissipare notevole quantità di energia e l'aumento di resistenza globale. Per il caso in oggetto si può osservare come l'extra resistenza o confinamento è pari a circa il 70% rispetto allo stesso sistema valutato con modelli di tipo a telaio equivalente in assenza di interazione. Si fa notare anche che:

- Murature molto resistenti e telai in c.a. esili;
- Murature poco resistenti e telai in c.a. robusti;
- Murature e telai in c.a. poco resistenti;
- Pareti con percentuali di aperture elevate;

riducono notevolmente questa extra-resistenza o confinamento per collasso anticipato delle cornici in c.a. tramite meccanismi fragili a taglio o nei nodi.

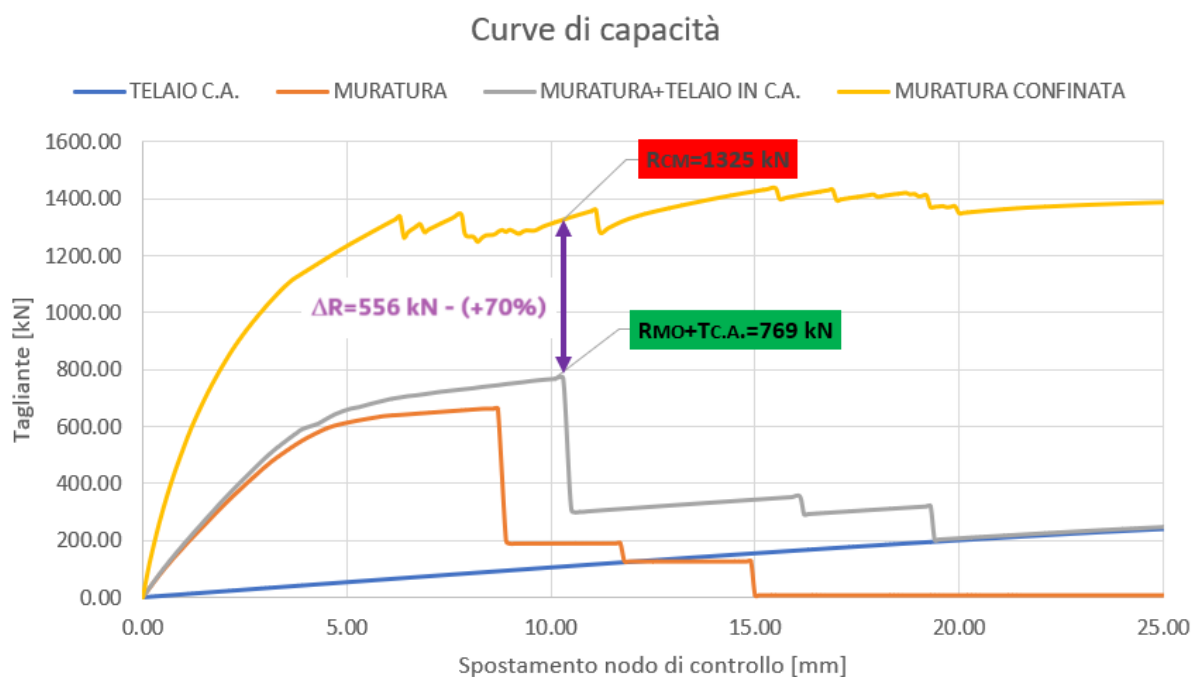


Figura 9.6: Curve di capacità sistemi strutturali a confronto e definizione dell'extra resistenza del sistema CM o effetto confinamento

10. CONCLUSIONI E CONSIDERAZIONI

Nel presente articolo sono state messe in evidenze le elevate capacità di resistenza e dissipazione che le tipologie in muratura confinata hanno rispetto a tipologie più comuni grazie all'effetto di confinamento che i telai in c.a. sufficientemente robusti conferiscono alla parete garantendo meccanismi di collasso fortemente dissipativi quali per taglio diagonale. Non tutti i modelli di calcolo

sono capaci di cogliere l'interazione tra i sistemi. Rispetto a modelli molto sofisticati quali FEM con interfacce di contatto o DEM, l'approccio a macroelementi MDEM (Calio et.al, 2012) presente nel software Fata-Next, riesce a riprodurre in maniera abbastanza precisa tale comportamento riducendone il costo computazionale.

I metodi di analisi da utilizzare sono del tipo non lineare al fine di poter correttamente riprodurre il comportamento anelastico dei sistemi strutturali in continua interazione.

11. BIBLIOGRAFIA

- G. Falsone, (2010). "Il sisma dalla conoscenza all'intervento. L'esperienza di Messina". Pàtron editore Bologna.
- Caddemi, S., Calìo, I., Cannizzaro, F., Occhipinti, G., and Pantò, B. (2015). "A parsimonious discrete model for the seismic assessment of monumental structures," in Proceedings of the Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, eds J. Kruis, Y. Tsompanakis, and B. H. V. Topping (Stirlingshire, UK: Civil-Comp Press), Paper 82.
- Caddemi, S., Calìo, I., Cannizzaro, F., and Pantò, B. (2013). "A new computational strategy for the seismic assessment of infilled frame structures," in Proceedings of the Fourteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, eds B. H. V. Topping and P. Iványi (Stirlingshire, UK: Civil-Comp Press), Paper 77.
- Caddemi, S., Calìo, I., Cannizzaro, F., and Pantò, B. (2014). "The seismic assessment of historical masonry structures," in Proceedings of the Twelfth International Conference on Computational Structures Technology, eds B. H. V. Topping and P. Iványi (Stirlingshire, UK: Civil-Comp Press), Paper 78.
- Calìo, I., Cannizzaro, F., D'Amore, E., Marletta, M., and Pantò, B. (2008). "A new discrete-element approach for the assessment of the seismic resistance of composite reinforced concrete-masonry buildings," in AIP Conference Proceedings, 1020 (PART 1); 2008 Jun 24–27; Reggio Calabria, p. 832–839.
- Calìo, I., Cannizzaro, F., and Marletta, M. (2010). A discrete element for modeling masonry vaults. Adv. Mater. Res. 133-134, 447–452. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.447
- Calìo, I., Marletta, M., and Pantò, B. (2005). "A simplified model for the evaluation of the seismic behaviour of masonry buildings," in Proceedings of the Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, ed. B. H. V. Topping (Stirlingshire: Civil-Comp Press), 195.
- Calìo, I., Marletta, M., and Pantò, B. (2012a). A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings. Eng. Struct. 40, 327–338. doi:10.1016/j.engstruct.2012.02.039
- Calìo, I., and Pantò, B. (2014). A macro-element modelling approach of infilled frame structures. Comput. Struct. 143, 91–107. doi:10.1016/j.compstruc.2014. 07.008
- Cannizzaro, F. (2010). The Seismic Behavior of Historical Buildings: A MacroElement Approach. PhD Thesis in Structural Engineering, in Italian. University of Catania.
- Cannizzaro, F., and Lourenço, P. B. (2017). Simulation of shake table tests on out of-plane masonry buildings. Part (VI): discrete element approach. Int. J. Archit. Herit. 11, 125–142