

**ORDINE
DEGLI
INGEGNERI**
DELLA PROVINCIA DI PESCARA



In collaborazione con:



Corso breve per ingegneri strutturisti

**I criteri progettuali per il rinforzo strutturale delle murature con
materiali compositi innovativi**

Normative, criteri di calcolo, verifiche strutturali,
tecnologie ed interventi.

Pescara, 22 aprile 2016

Modelli strutturali per edifici esistenti in muratura

Prof. Ing. Vincenzo Sepe

**Università degli Studi "G. D'Annunzio" di Chieti-Pescara
Dipartimento di Ingegneria e Geologia**

edifici di diversa tipologia

edifici monumentali

edilizia corrente attuale

edifici in centri storici

"la muratura"

tipologie molto differenti

non esiste il materiale muratura

modello della muratura

Muratura molto irregolare e con cattiva qualità del legante: ha una modesta resistenza per carichi verticali e tende a disgregarsi sotto azioni sismiche anche di modesta entità

Muratura di buona qualità, con blocchi di pietra regolari, disposti a strati sub-orizzontali, ben collegati in direzione trasversale: può garantire un comportamento monolitico sotto azioni sismiche anche elevate

Muratura di mattoni e malta cementizia (tecnica moderna): ha una elevata resistenza rispetto ai carichi verticali e garantisce un comportamento monolitico sotto le azioni sismiche

health monitoring

sempre più l'ingegneria prende in prestito
espressioni e procedure tipiche della medicina

diagnostica

non esiste l'individuo "tipo", e dunque non esiste la
medicina o la terapia "tipo"

esiste il medico, e analogamente l'ingegnere, che
riconduce le specifiche (ed infinite !!) situazioni
reali ad un numero (più o meno limitato) di modelli
interpretativi

il modello: un'esigenza "recente"

edifici pre-normativi

tradizione locale

senza calcolo il progetto iniziale (al massimo una verifica a compressione delle principali strutture verticali)

prime normative tecniche sulla muratura 1987

il modello: un'esigenza "recente"

in precedenza, interventi post-sisma stabiliti sulla scorta dell'esperienza, (quasi) senza calcolo

ok per interventi volti a garantire un comportamento scatolare

può essere non corretto se l'intervento (es. iniezioni) punta ad aumentare la resistenza strutturale

il modello: un'esigenza "recente"

è con Friuli (1976) e Irpinia (1980) che viene richiesta un'analisi quantitativa globale e vengono proposti i primi metodi di calcolo per l'analisi sismica delle strutture in muratura (POR ...)

commento

neanche al più esperto di noi, oggi, è consentito stabilire "in scienza e coscienza" un intervento (se non locale) su una struttura senza produrre un tabulato di calcolo ...

perché un calcolo - tanto più al computer !! - abbia senso, è necessario che l'ingegnere applichi al caso in esame un modello corretto (o uno dei modelli alternativi, se ce ne sono)

effettuare una valutazione quantitativa (calcolo) con un modello inappropriato è inutile e dannoso ...

modelli più diffusi

FEM (Finite Element Method)

EFM (Equivalent-Frame Method)

multiscala (ricerca)

più il modello è dettagliato, maggiore è il numero di informazioni (geometriche, meccaniche, ...)
richieste → grande sensibilità del risultato alla modellazione

modello strutturale

né troppo schematico (si perde la complessità del problema)

né troppo dettagliato (altrimenti diventa pressoché impossibile caratterizzarlo correttamente)

modelli più diffusi

Le strutture in muratura rappresentano la tipologia costruttiva più diffusa, specialmente nei centri storici..

Quelle in muratura non armata (URM, UnReinforced Masonry) sono caratterizzate da un'elevata vulnerabilità ed esposizione nei riguardi del rischio sismico.

Sono stati proposti approcci differenti, con vari livelli di dettaglio:

- Micro-modelling Methods:
 - Finite Element Method (FEM)
 - Discrete Element Method (DEM)
- Macro-modelling Methods

modelli agli elementi finiti

FEM sono in grado di simulare efficacemente modelli caratterizzati da notevole complessità geometrica e/o meccanica.

strutture in muratura

complessità geometrica delle strutture esistenti

modellazione di dettaglio

eterogeneità meccanica del materiale...

metodo degli elementi discreti (DEM)

Schematizzazione del sistema in corpi discreti rigidi o deformabili, indipendenti tra loro e in grado di scambiarsi forze mediante i relativi punti di contatto.

La soluzione è ricercata mediante modelli costitutivi di contatto tra blocchi adiacenti.

modelli a macroelementi

- RAN (Augenti, 1984) [1]
- SAM (Magenes e Calvi, 1994) [2a, 2b]
- PEFV (D'Asdia e Viskovic, 1994) [3]
- TREMURI (Lagomarsino et al.) [4]
- 3DMACRO (Caliò, 2005) [5]

[1] Augenti N., (2004), *Il calcolo sismico degli edifici in muratura*, UTET Libreria, Torino, Italy

[2a] Magenes, G., Calvi, G.M., "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, Pitagora Ed. Bologna, 1996

[2b] Magenes, G., Della Fontana, A., "Simplified Non-linear Seismic Analysis of Masonry Buildings", *Proc. of the British Masonry Society*, Vol. 8, October 1998, pp. 190-195.

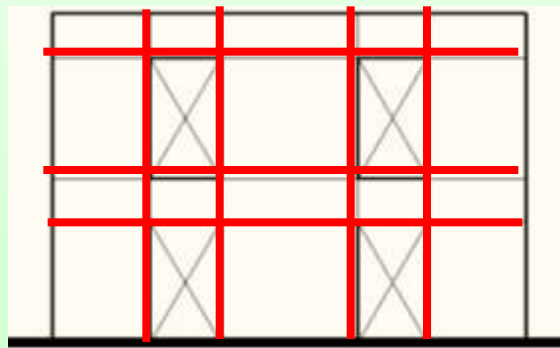
[3] D'Asdia, P., Viskovic, A., "L'analisi sismica degli edifici in muratura", *Ingegneria Sismica*, Anno XI, N.1, 1994, pp. 32-42

[4] Lagomarsino S., Penna A., Galasco A., Cattari S., TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings, *Engineering Structures* 56 (2013) 1787-1799

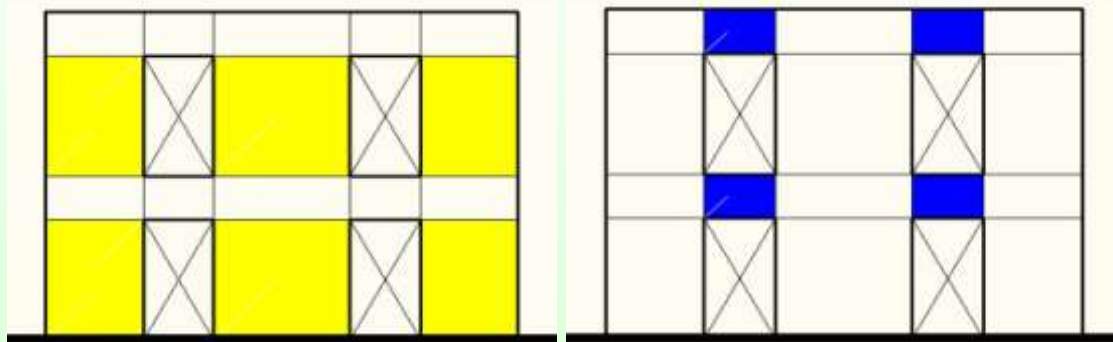
[5] Caliò I., Marletta M., Pantò B., (2008), A discrete element approach for the evaluation of the seismic response of masonry buildings, *14th World Conference of Earthquake*, Beijing, China

metodo a telaio equivalente (EFM)

Tra gli approcci proposti per la modellazione di strutture in muratura non armata (URM, UnReinforced Masonry), una metodologia semplificata è costituita dal metodo a telaio equivalente (EFM, Equivalent-frame method), basato sulla discretizzazione del muro in macroelementi connessi tra di loro tramite nodi rigidi.

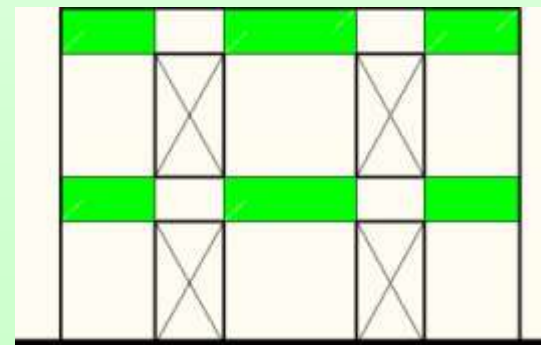


tipico in Italia ...



Pannelli di maschio

Pannelli di fascia



Pannelli di nodo

metodo a telaio equivalente (EFM)

molto diffuso

modalità di rinforzo dei singoli pannelli (di maschio, di fascia, di nodo) illustrate in altre lezioni

EFM: definizione altezza dei maschi murari

- criterio di Dolce (1991) (*): introduzione di una formula empirica dipendente dal parametro h' , pari alla distanza tra i punti medi delle linee congiungenti i vertici di aperture consecutive.
- Per la definizione di h' viene fissata un'inclinazione massima di 30°

(*) Dolce M., (1991), Schematizzazione e modellazione degli edifici in muratura soggetti ad azioni sismiche, in: L'Industria delle Costruzioni, **25**: 44-57

EFM: definizione altezza dei maschi murari

- Criterio di Augenti (1984) (*): altezza efficace pari all'altezza dell'apertura che segue il singolo maschio nella direzione di applicazione delle azioni sismiche.
- Ciò comporta, per pareti irregolari, la definizione di due differenti modelli EFM per ciascun verso di provenienza delle azioni sismiche.

(* Augenti N., (2004), Il calcolo sismico degli edifici in muratura, UTET Libreria, Torino, Italy

metodo a telaio equivalente (EFM)

criteri di verifica dei singoli pannelli

flessione

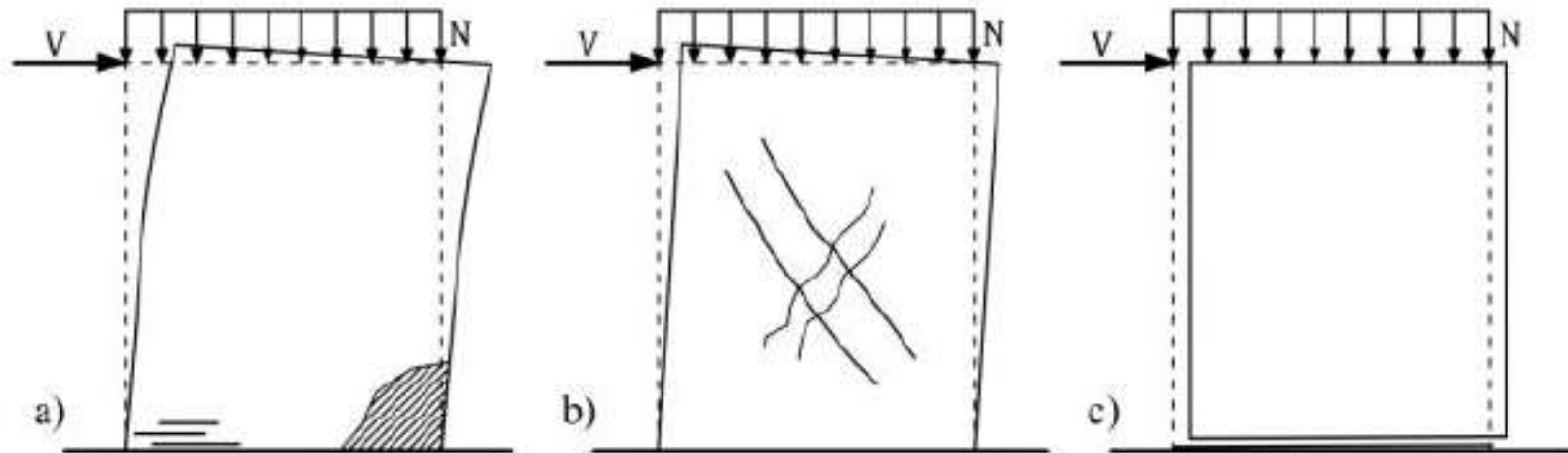
taglio

...

domini di resistenza ...

meccanismi di rottura

presso-flessione, taglio-trazione, taglio-scorrimento



verifica maschio murario

La verifica della parete si riduce alla verifica della resistenza dei singoli pannelli murari sulla base delle ipotesi meccaniche e geometriche adottate per essi e con riferimento ai seguenti meccanismi di rottura, validi per pannelli di maschio:

- Crisi per Presso-Flessione
- Crisi per Taglio:
 - Taglio Diagonale
 - Taglio da scorrimento

verifica fascia di piano

Nel caso delle fasce di piano i meccanismi di rottura sono definiti con modalità analoghe a quelle dei maschi murari tenendo però conto della differente orientazione delle azioni rispetto ai giunti di malta e dell'eventuale presenza di elementi resistenti a trazione:

- Crisi per Presso-Flessione
- Crisi per Taglio:

definizione del macroelemento: TreMuri (*)

- macro-elemento bi-dimensionale composto da tre

parti:

→ due parti di estremità di spessore infinitesimo con

deformabilità assiale e flessionale

→ corpo centrale di altezza h con deformabilità

tagliante

(*) Lagomarsino S., Penna A., Galasco A., Cattari S., TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings, *Engineering Structures* 56 (2013) 1787-1799

definizione del macroelemento: TreMuri

- legame costitutivo non lineare con danneggiamento e degrado di resistenza e rigidezza
- meccanismi di rottura (presso-flessione, taglio da trazione, taglio da scorrimento)
- modalità di analisi: statica lineare e non lineare, dinamica lineare e non lineare (con determinazione della capacità globale della struttura)

definizione del macroelemento: SAM (*)

- Macro-elemento mono-dimensionale di tipo *beam* dotato di deformabilità flessionale e tagliante e collegato ai nodi rigidi mediante bracci rigidi ai nodi;
- Legame costitutivo elasto-plastico con limite di deformazione e degrado di resistenza

(*) Magenes, G., Calvi, G.M., "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, Pitagora Ed. Bologna, 1996

Magenes, G., Della Fontana, A., "Simplified Non-linear Seismic Analysis of Masonry Buildings", Proc. of the British Masonry Society, Vol. 8, October 1998, pp. 190-195.

definizione del macroelemento: SAM

- altezza efficace dei pannelli di maschio calcolata secondo il modello di Dolce (1991)
- meccanismi di rottura (presso-flessione, taglio da trazione, taglio da scorrimento)
- definizione di un limite espresso in termini di deformabilità angolare (*chord rotation*)
- modalità di analisi: statica non lineare con determinazione della capacità globale della struttura

modello EFM a fibre

Tra i più recenti metodi di modellazione a telaio equivalente si inserisce il **metodo a fibre** [1][2] in cui i pannelli sono modellati mediante sezioni a fibre e la non linearità del materiale è tenuta in conto mediante un modello a plasticità diffusa lungo l'elemento.

[1] Raka E., Spacone E., Sepe V., Camata G., (2015), Advanced frame element for seismic analysis of masonry structures: Model formulation and validation, in: Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 44(14).

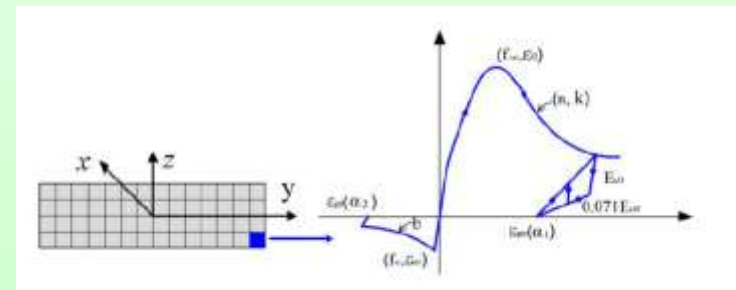
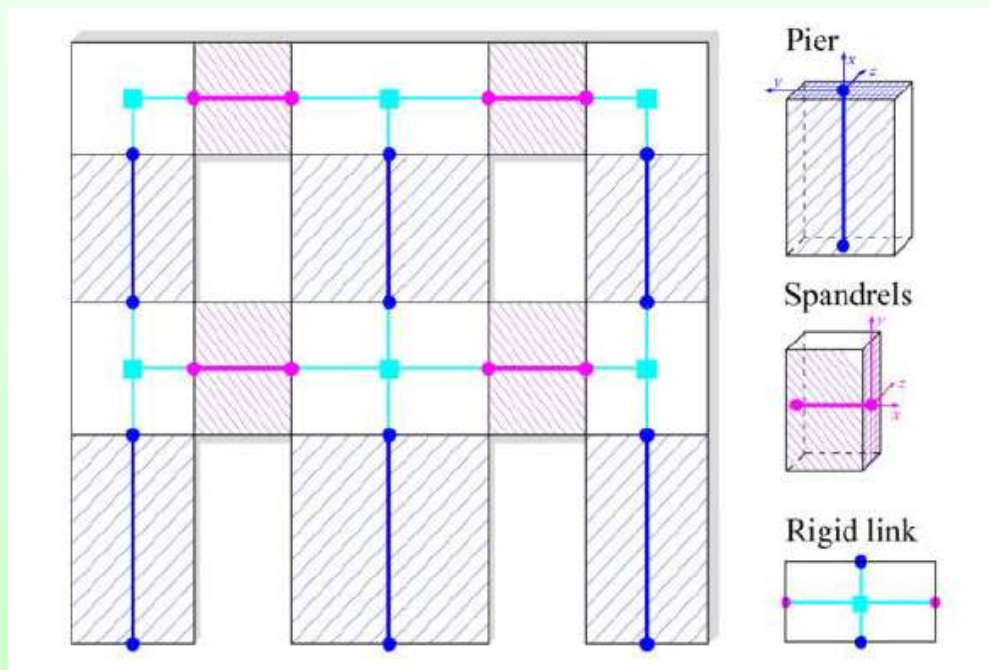
[2] Sepe V., Spacone E., Raka E., Camata G., (2014), Seismic analysis of masonry buildings: equivalent frame approach with fiber beam elements, in: Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2014, Porto, Portugal, 30 June - 2 July 2014.

http://paginas.fe.up.pt/~eurodyn2014/CD/papers/031_MS01_ABS_1648.pdf

modello EFM a fibre

i pannelli sono modellati mediante sezioni a fibre e la non linearità del materiale è tenuta in conto mediante un modello a plasticità diffusa lungo l'elemento.

possibilità di introdurre rinforzi longitudinali

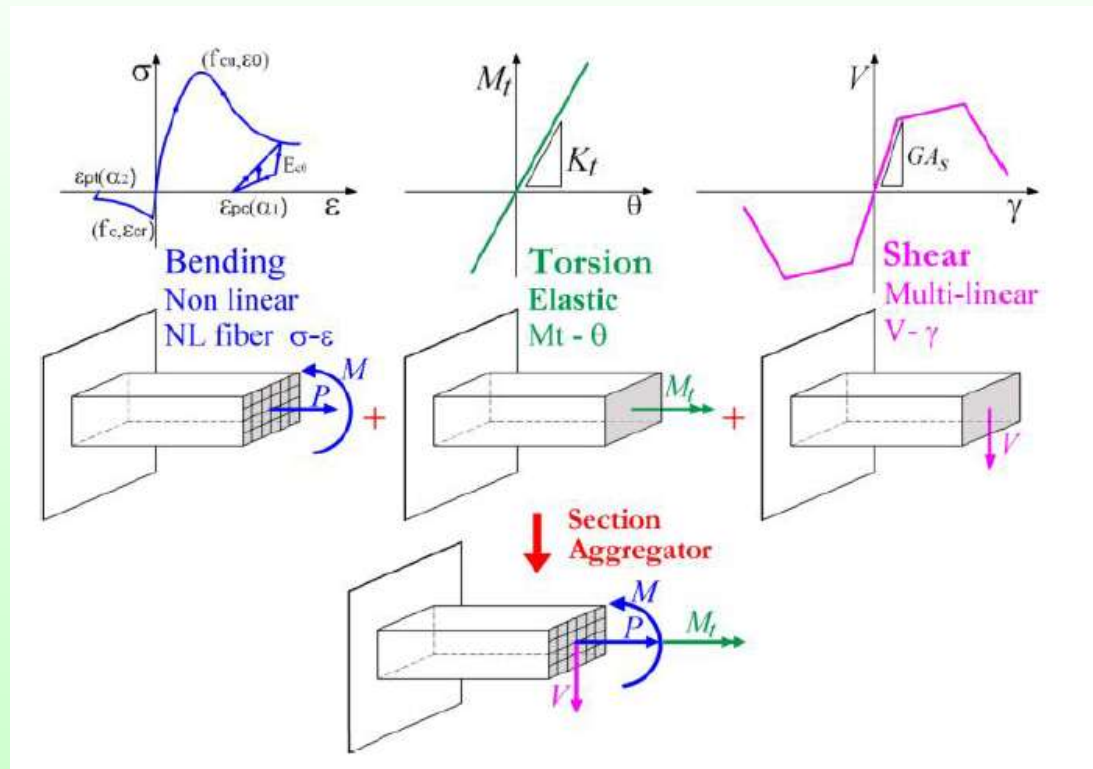


da Sepe V., Spacone E., Raka E., Camata G., (2014), EURO DYN 2014

http://paginas.fe.up.pt/~eurodyn2014/CD/papers/031_MS01_ABS_1648.pdf

modello EFM a fibre

Il modello, implementato in OpenSees (<http://opensees.berkeley.edu/>), simula il comportamento meccanico della muratura tenendo conto, mediante la procedura «section aggregator», dei modelli meccanici disponibili per le diverse sollecitazioni



da Sepe V., Spacone E., Raka E., Camata G., (2014), EURODYN 2014

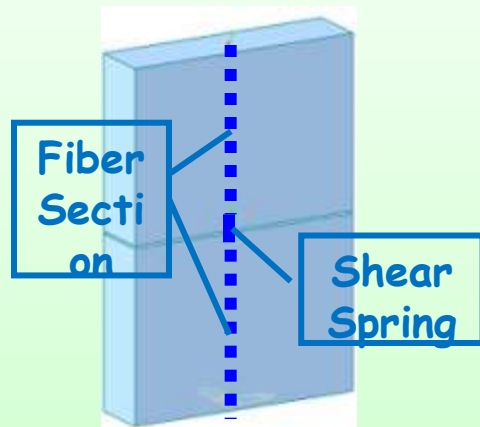
http://paginas.fe.up.pt/~eurodyn2014/CD/papers/031_MS01_ABS_1648.pdf

definizione del macroelemento a fibre

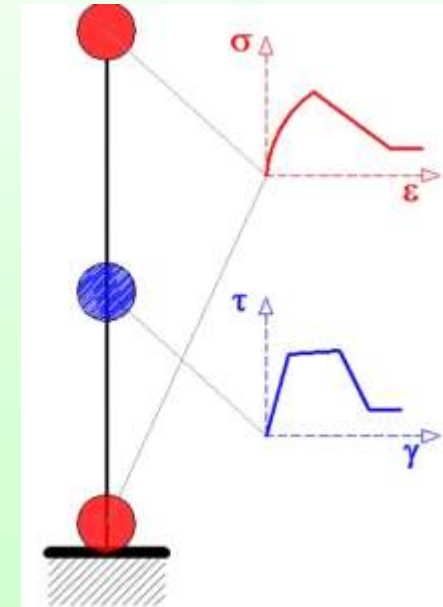
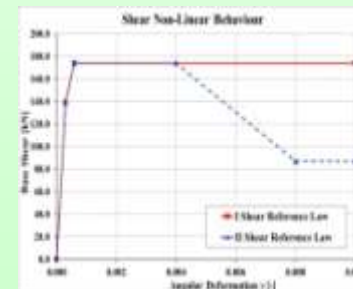
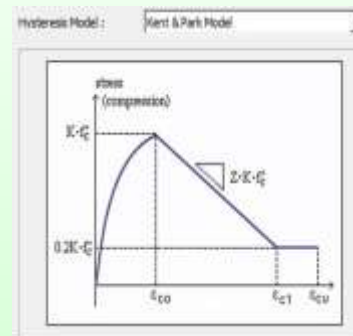
- Legame costitutivo non lineare con danneggiamento e degrado di resistenza e rigidità
- Meccanismi di rottura (presso-flessione, taglio da trazione, taglio da scorrimento)
- Modalità di analisi: statica lineare e non lineare, dinamica lineare e non lineare (con determinazione della capacità globale della struttura)

definizione alternativa del macroelemento

- Macro-elemento mono-dimensionale di tipo beam composto da tre molle in serie:
- Le molle di estremità simulano il comportamento flessionale tramite discretizzazione a fibre (modello a plasticità diffusa)
- La molla centrale, a taglio, è non lineare



Fiber Discretization



da Rossella Siano, On the Equivalent-Frame Method for irregular masonry walls,
PhD Dissertation, University "G. D'Annunzio" of Chieti-Pescara, Italy, 2016

presupposti EFM

EFM presuppone che:

la muratura sia costituita da pannelli "compatti"

l'edificio abbia un comportamento scatolare (o quanto meno, in presenza di diaframmi di piano deformabili, che la connessione tra le pareti consenta di escludere cinematismi fuori dal piano)

escludiamo dunque muratura incoerente e meccanismi locali

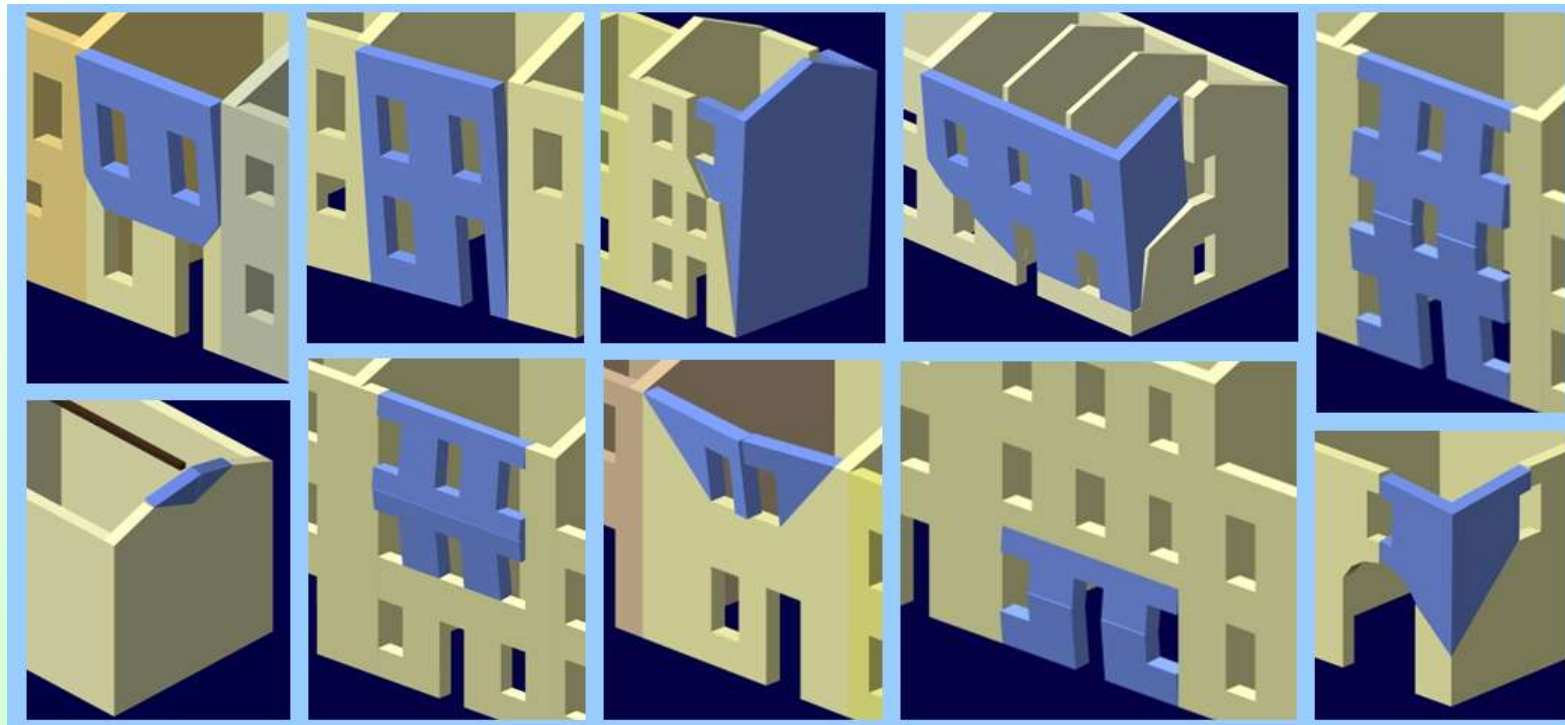
meccanismi locali



Meccanismo C ribaltamento del cantonale

foglio di calcolo C.I.N.E.

http://www.reluis.it/doc/emergenza_terremoto_abruzzo/CINE_1.0.4.xls



C.I.N.E.

Condizioni d'Instabilità Negli Edifici

(Versione 1.0.4: Settembre 2009)

comparazione modelli EFM - FEM

Dai confronti riportati nella letteratura scientifica tra i risultati EFM e FEM e tra questi ed i risultati di prove sperimentali su pareti, emerge una grande variabilità dei risultati per quanto riguarda la resistenza (ad es. taglio risultante al piede della parete) e la rigidezza (v. ad es. spostamenti orizzontali), a seconda del tipo di modellazione EFM, dei criteri geometrici utilizzati (ad es. per l'altezza dei maschi murari) e del tipo di analisi eseguita.

validazione EFM

La semplicità applicativa ed interpretativa dei metodi di modellazione a telaio equivalente ne ha consentito una notevole diffusione nello studio di strutture murarie 'ordinarie' e nella pratica professionale.

Nel caso di pareti regolari l'efficacia dell'approccio EFM è stata nel tempo sufficientemente verificata; permangono dubbi sul comportamento strutturale di pareti irregolari.

limiti di applicabilità - edifici esistenti

Le strutture in muratura esistenti sono caratterizzate da irregolarità geometriche e meccaniche che comportano numerose incertezze nella definizione degli schemi statici su cui si basano i metodi a telaio equivalente.



commento

il modello meccanico a telaio equivalente, sistematicamente utilizzato nella pratica professionale, è adatto solo per edifici "standard":

con pareti ben collegate tra di loro e scomponibili in pannelli (di maschio e di fascia) di resistenza adeguata

geometricamente riconducibili a travi più o meno tozze, collegati tra di loro mediante pannelli di nodo sostanzialmente confinati (e non "critici")

rinforzo

escludendo il caso di muratura incoerente, da trattare con interventi *ad hoc*, interventi di rinforzo con fibre possono contribuire a garantire i requisiti indicati:

interventi volti a migliorare le connessioni tra le pareti

interventi volti a migliorare la resistenza dei pannelli di maschio e di fascia (e di nodo ?)