

Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura V.1.0

*Prodotto della ricerca del Task 10.3 - Validazione/confronto strumenti software per
l'applicazione dei metodi di verifica da norma*

Progetto ReLUIIS (accordo quadro DPC 2019-2021)

13 Novembre 2020

ASPETTI CRITICI DELLA MODELLAZIONE NON LINEARE DI EDIFICI IN MURATURA

Guido Camata- Professore Associato

Università «G. D'Annunzio» di Chieti-Pescara

3.1 Modelli per i diversi componenti strutturali dell'edificio

3.1.1 Pannelli murari

3.1.1.1 Maschi murari

3.1.1.2 Fasce murarie

3.1.2 Solai

3.2 Elaborazione del modello

3.2.1 Modellazione della parete muraria

3.2.1.1 Aspetti peculiari dei modelli a telaio equivalente

3.2.1.2 Aspetti peculiari dei modelli al continuo

3.2.2 Modellazione dei solai

3.2.3 Modellazione delle connessioni (parete-parete e solaio-parete)

3.3 Esecuzione dell'analisi

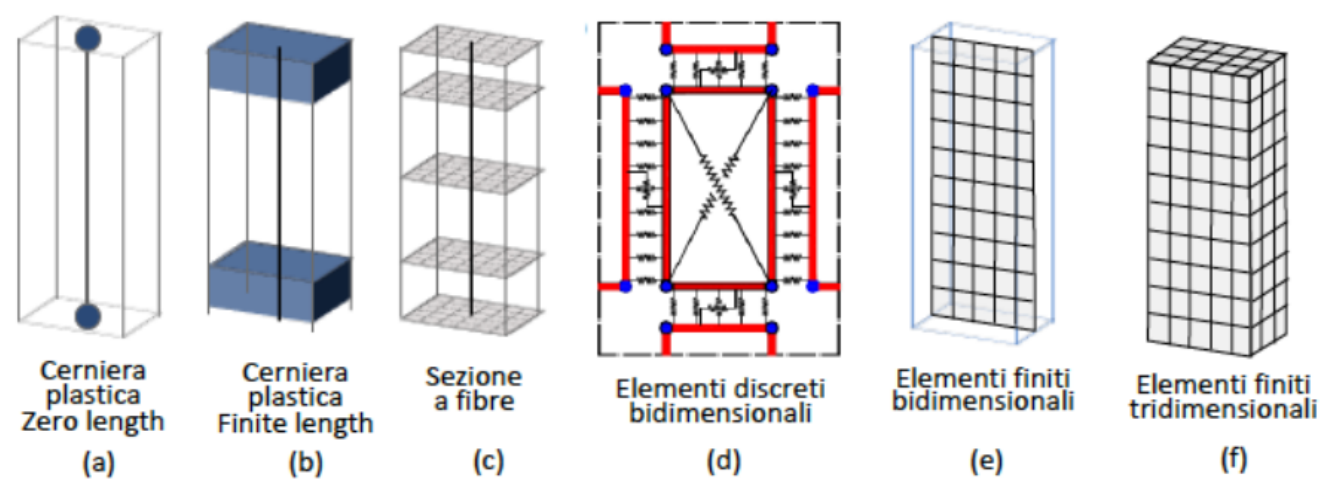
3.4 Fasi di verifica

3.4.1 Aspetti peculiari dei modelli FEM al continuo

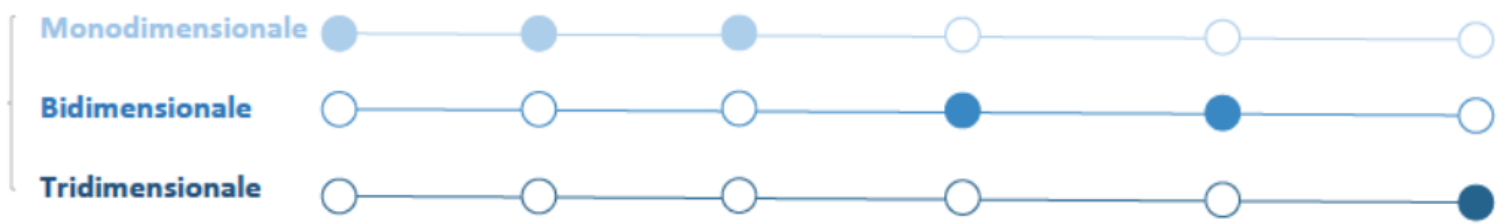
3.4.2 Aspetti peculiari dei modelli a telaio

MODELLI PER I DIVERSI COMPONENTI STRUTTURALI DELL'EDIFICIO

PLASTICITA'



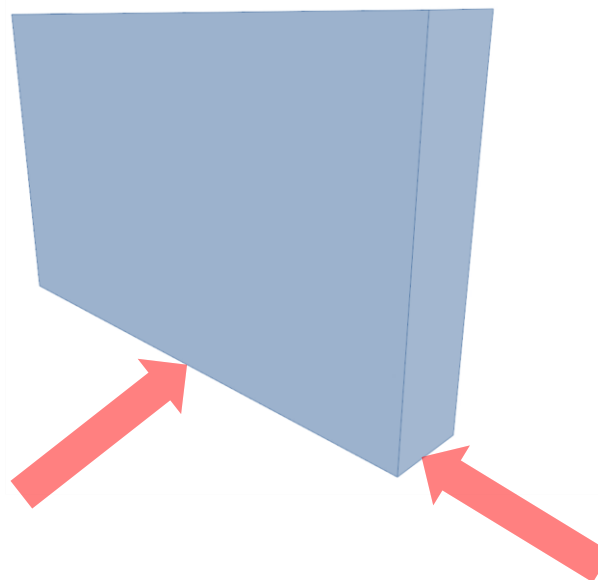
TIPO ELEMENTO



SOLLECITAZIONI SULLE PARETI

Negli edifici in muratura le azioni inerziali indotte dalle accelerazioni sismiche generano delle sollecitazioni sulle pareti murarie che sono suddivise convenzionalmente in due categorie:

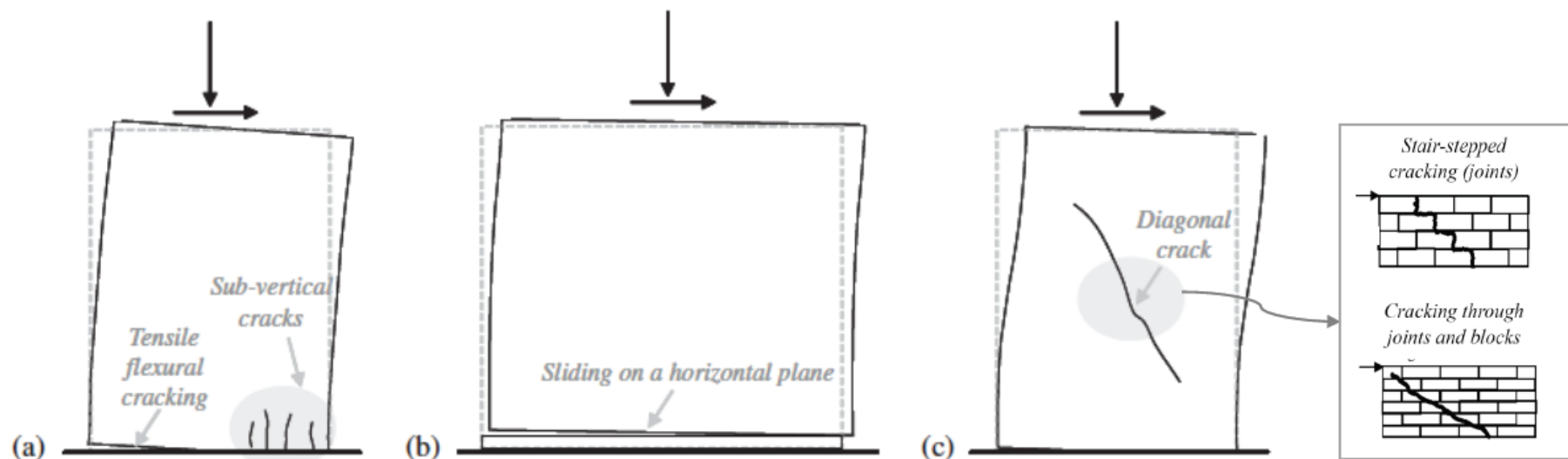
- sollecitazioni agenti nel loro piano medio, se le pareti sono orientate nella direzione di applicazione del carico;
- sollecitazioni perpendicolari al loro piano medio, se le pareti sono orientate in direzione ortogonale rispetto alla direzione di applicazione del carico.



MASCHI MURARI

QUALE IL COMPORTAMENTO REALE DA DESCRIVERE?

- modalità di danno con comportamento prevalente a flessione, lesioni tipicamente concentrate nelle sezioni di estremità
- modalità di danno per scorrimento lungo piani orizzontali individuati dai giunti di malta;
- modalità di danno a taglio diagonale, tipicamente caratterizzato da lesioni che hanno origine in prossimità del centro del pannello e che si propagano progressivamente in esso in direzione degli spigoli.



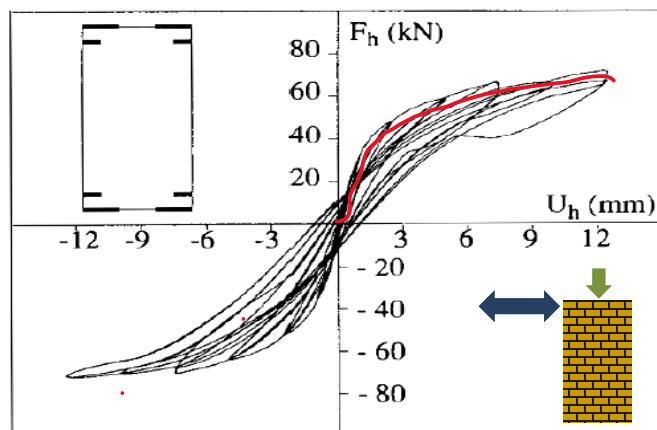
Adattata da Calderini, C., Cattari, S., Lagomarsino, S., 2009. In-plane strength of unreinforced masonry piers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(2): 243-267.

MASCHI MURARI

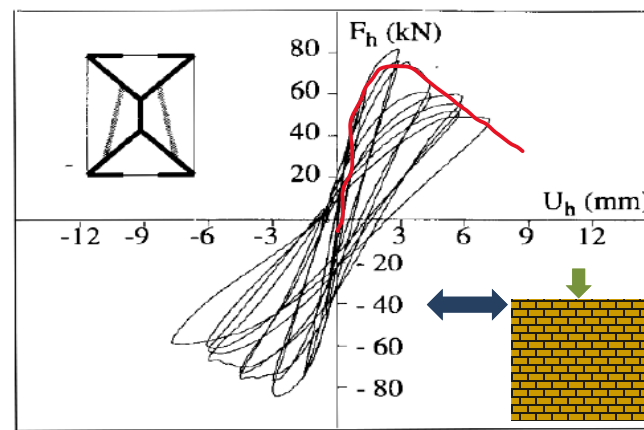
QUALE IL COMPORTAMENTO REALE DA DESCRIVERE?

L'occorrenza dell'una o dell'altra modalità di danno prevalente è influenzata da molteplici fattori quali:

- le caratteristiche di resistenza dei singoli costituenti la muratura (malta, blocchi);
- la geometria del pannello (in particolare la snellezza);
- lo sforzo normale agente;
- lo schema statico.



Rottura prevalente a flessione



Rottura prevalente a taglio

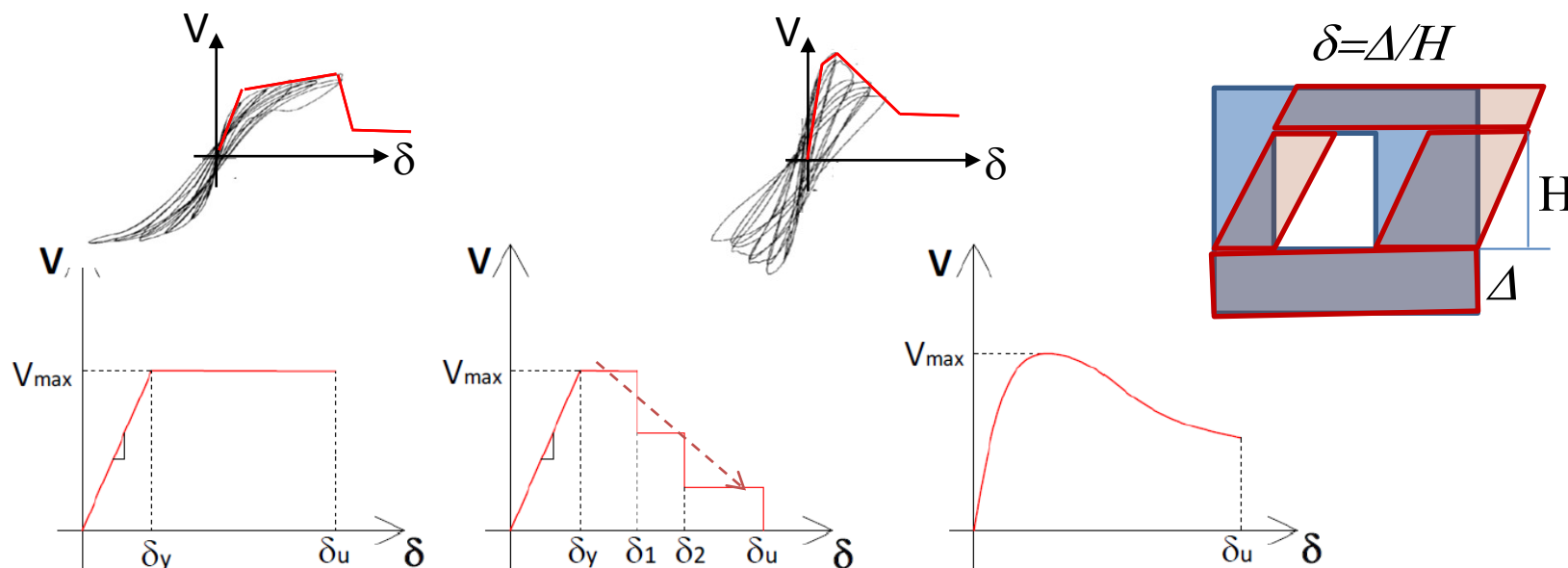
Anthoine, A., Magonette, G., Magenes, G. 1995. Shear compression testing and analysis of brick masonry walls. *10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, 1657-1662.

MASCHI MURARI

COSA CONSENTONO DI DESCRIVERE GLI APPROCCI DI MODELLAZIONE?

Limitandosi al campo monotono, i modelli numerici dovrebbero consentire di riprodurre correttamente la risposta sperimentale osservata, simulandone gli aspetti fondamentali in termini di:


- pendenza del ramo elastico iniziale e suo progressivo degrado;
- resistenza massima;
- risposta post picco (degrado di resistenza e capacità di spostamento ultima).



FASCE MURARIE

QUALE IL COMPORTAMENTO REALE DA DESCRIVERE?

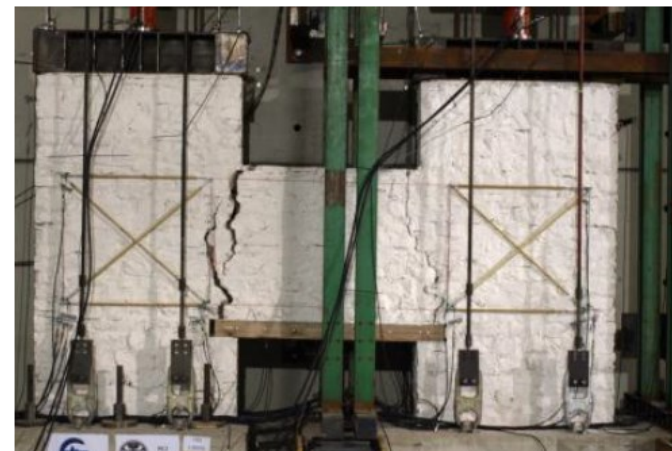
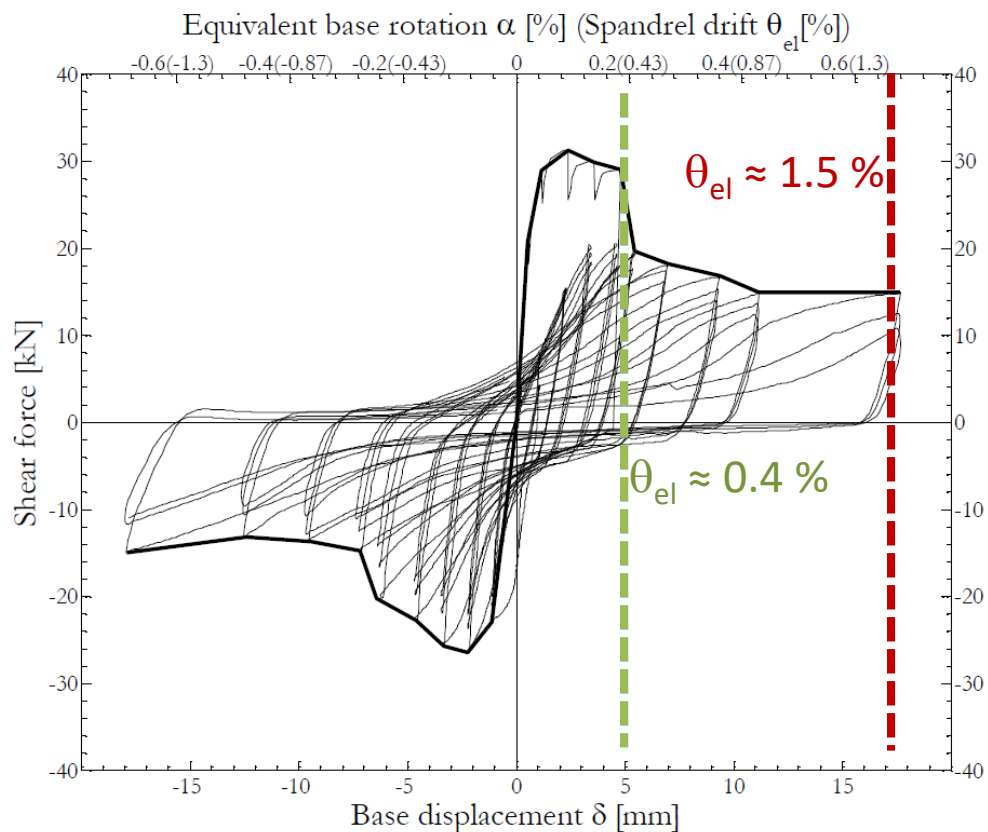
Differenza con i maschi:

- la tessitura muraria è ruotata di 90° rispetto all'asse dell'elemento;
 - la fascia è sorretta da un architrave che sostiene il carico verticale;
 - Il comportamento dipende dalla tipologia di architrave e dall'eventuale presenza di altri elementi resistenti a trazione;
- 
- capacità di spostamento ultime a collasso tipicamente maggiori di quelle dei maschi;
 - l'interpretazione del meccanismo di danno a pressoflessione si basa sulla possibilità di considerare eventualmente il contributo di una "resistenza a trazione equivalente della fascia", funzione dei fenomeni di ingranamento che si possono attivare nelle sezioni di estremità.

FASCE MURARIE

QUALE IL COMPORTAMENTO REALE DA DESCRIVERE?

Assenza di elemento resistente a trazione e architrave lignea



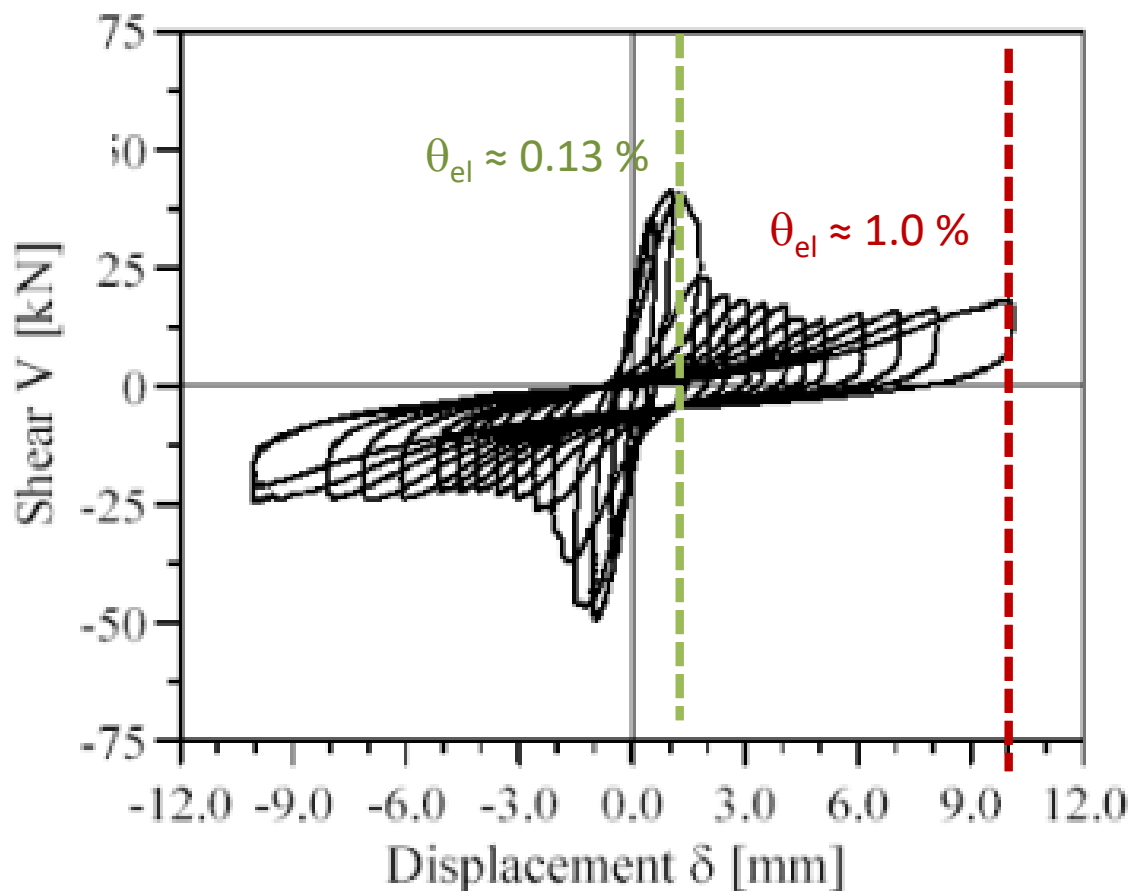
*modalità di
rottura prevalente a
pressoflessione*

Graziotti, F., Magenes, G., Penna, A., 2012. Experimental cyclic behaviour of stone masonry spandrels, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa. PT..

FASCE MURARIE

QUALE IL COMPORTAMENTO REALE DA DESCRIVERE?

Assenza di elemento resistente a trazione e arco ribassato in muratura



*modalità di
rottura mista*

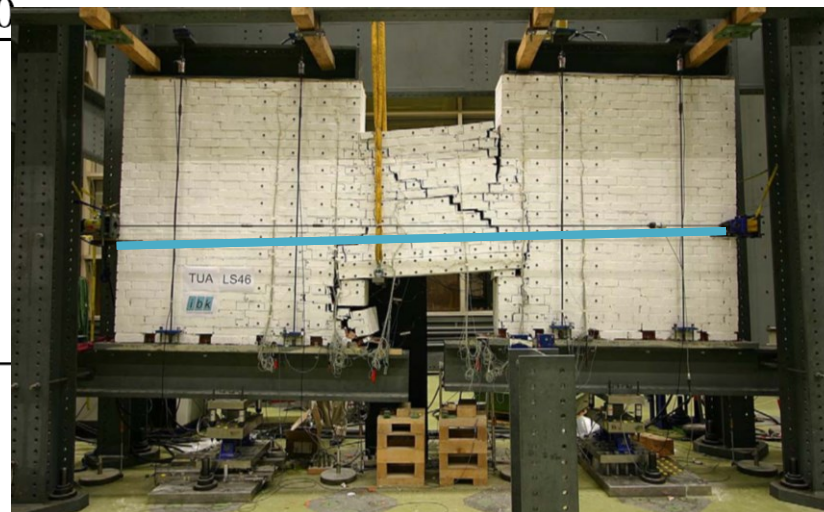
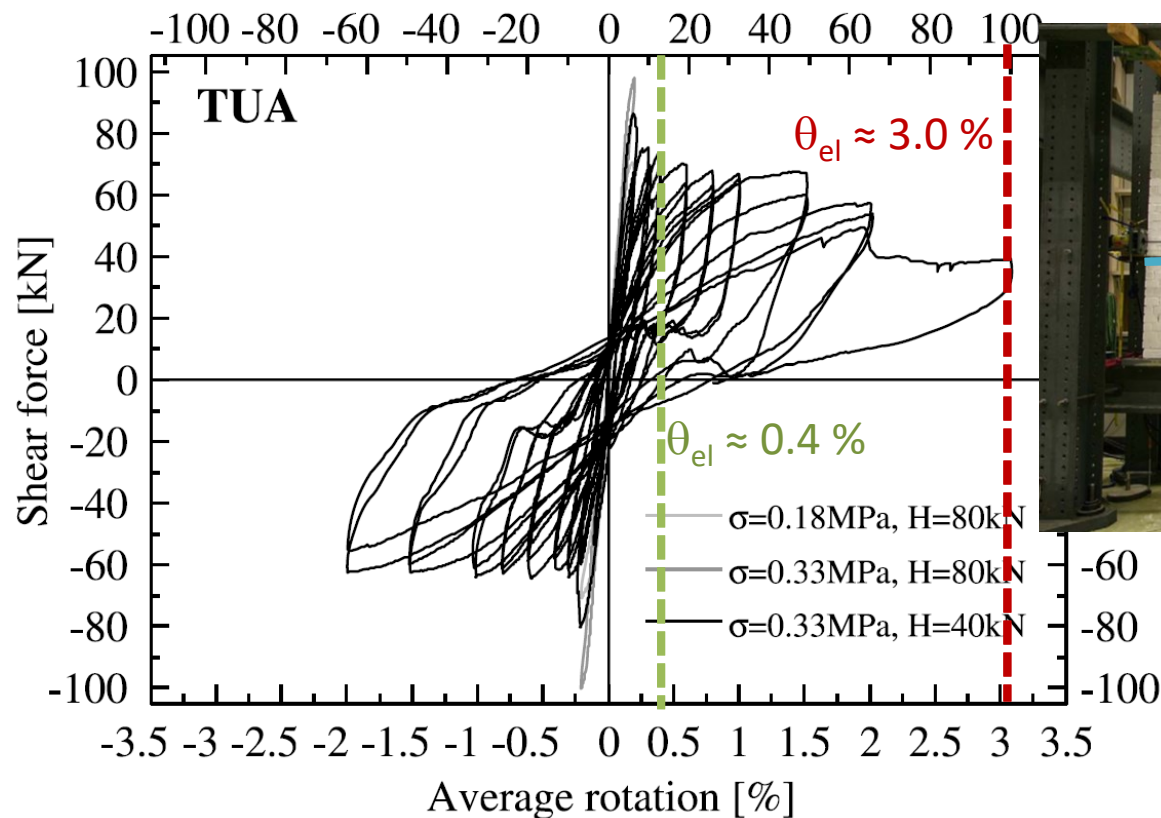
Gattesco, N., Clemente, I., Macorini, L., Noè, S., 2008. Experimental investigation on the behaviour of spandrels in ancient masonry buildings, 14th WCEE, Beijing, China

FASCE MURARIE

QUALE IL COMPORTAMENTO REALE DA DESCRIVERE?

Elemento resistente a trazione (catena) e architrave lignea

Spandrel displacement [mm]



modalità di rottura prevalente a taglio diagonale

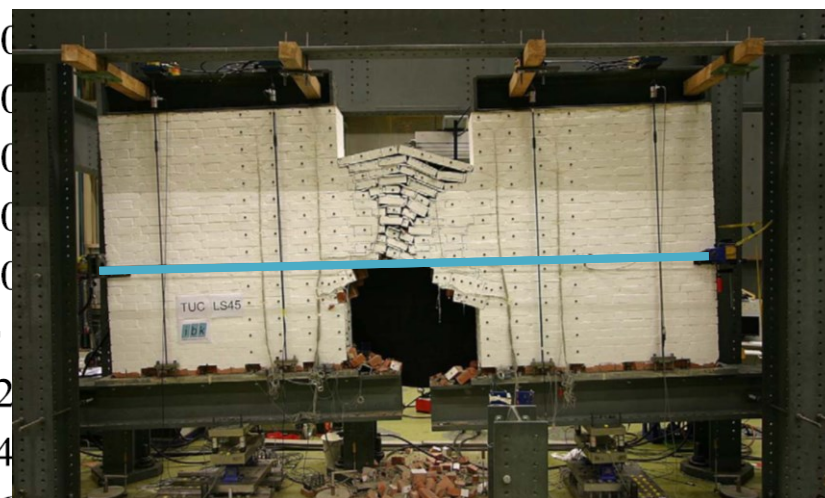
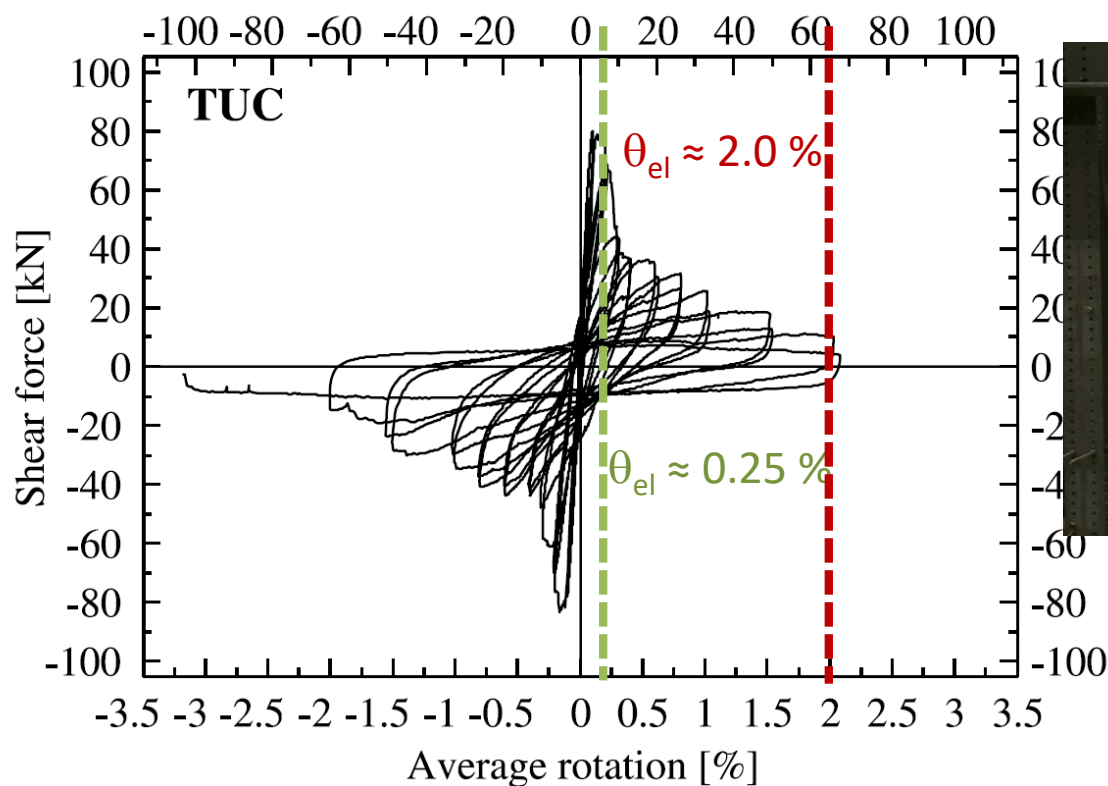
Adattato da Beyer K., Dazio A. 2012. Quasi-static cyclic tests on masonry spandrels, Earthquake Spectra 28(3). 907-929.

FASCE MURARIE

QUALE IL COMPORTAMENTO REALE DA DESCRIVERE?

Elemento resistente a trazione (catena) e arco ribassato in muratura

Spandrel displacement [mm]

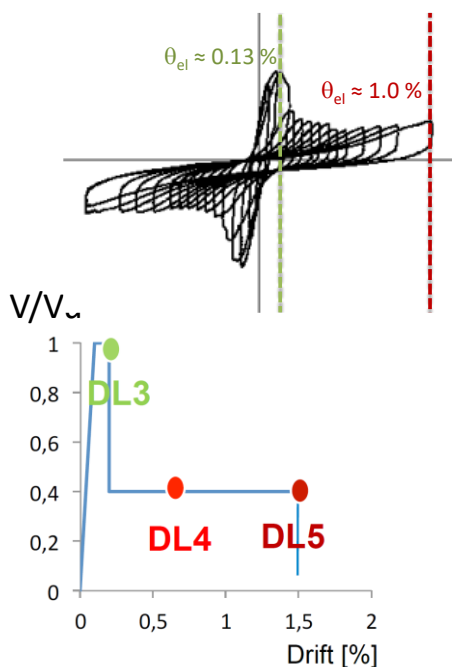


modalità di rottura prevalente a taglio diagonale

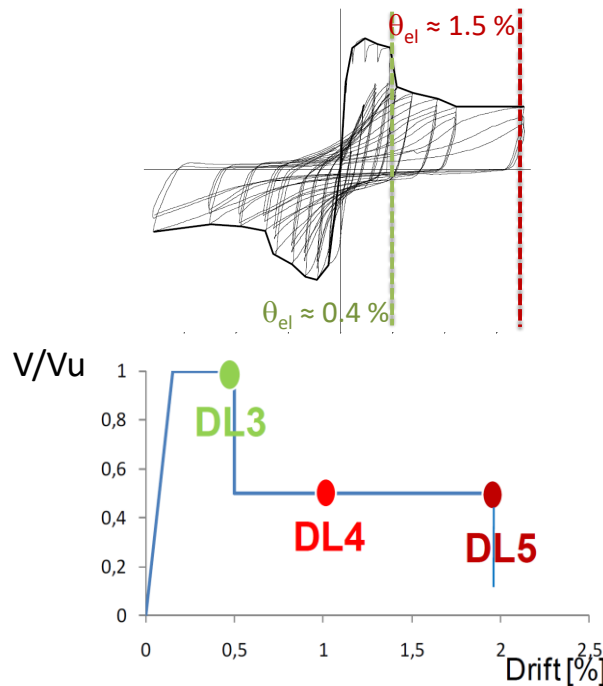
Adattato da Beyer K., Dazio A. 2012. Quasi-static cyclic tests on masonry spandrels, Earthquake Spectra 28(3). 907-929.

FASCE MURARIE

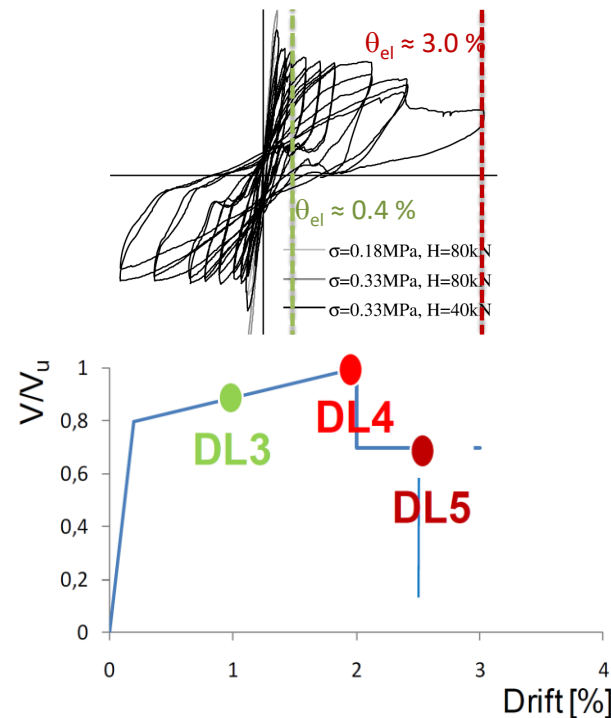
COSA CONSENTONO DI DESCRIVERE GLI APPROCCI DI MODELLAZIONE?



fascia sorretta da arco in muratura



architrave in legno, acciaio o c.a.

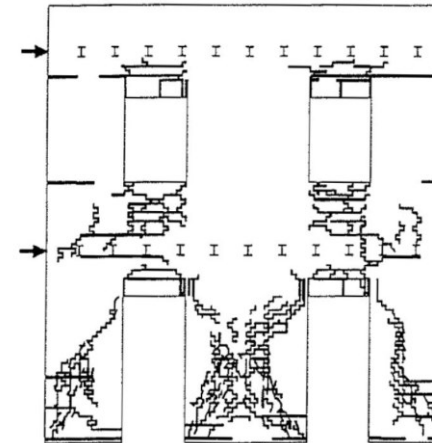
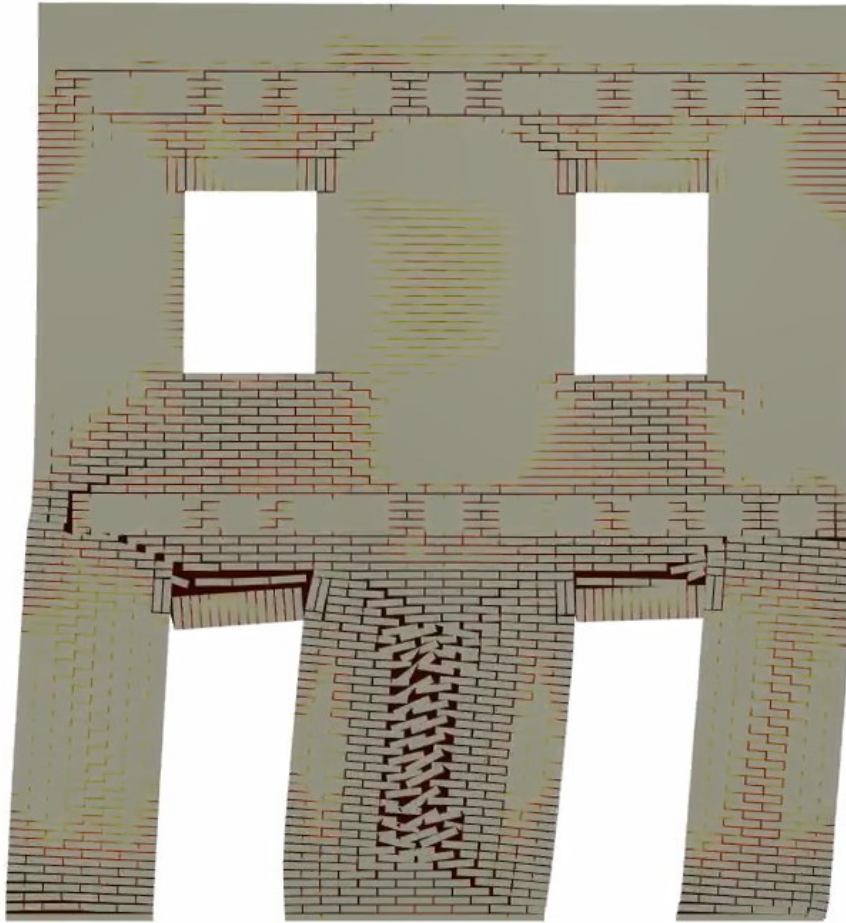


architrave accoppiato ad elemento resistente a trazione

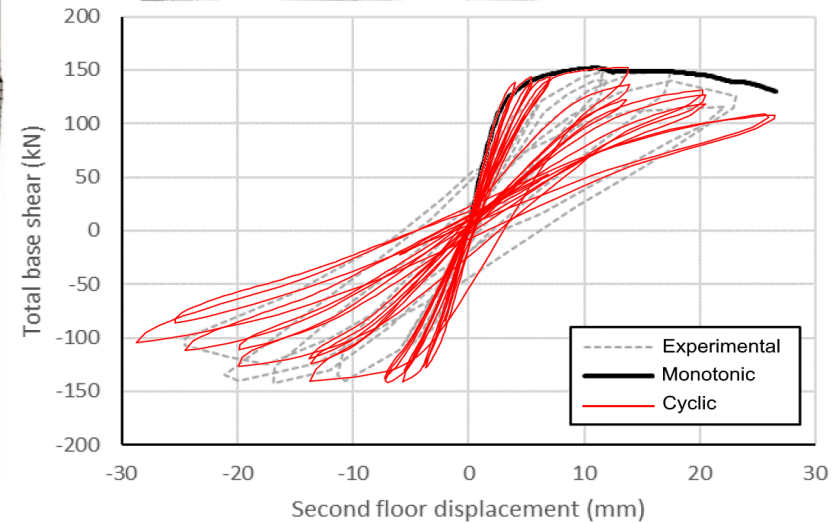
Consiglio Nazionale delle ricerche. CNR-DT 212/2013. Istruzioni per la Valutazione affidabilistica della Sicurezza Sismica di Edifici Esistenti, 2013

FASCE MURARIE

COSA CONSENTONO DI DESCRIVERE GLI APPROCCI DI MODELLAZIONE?

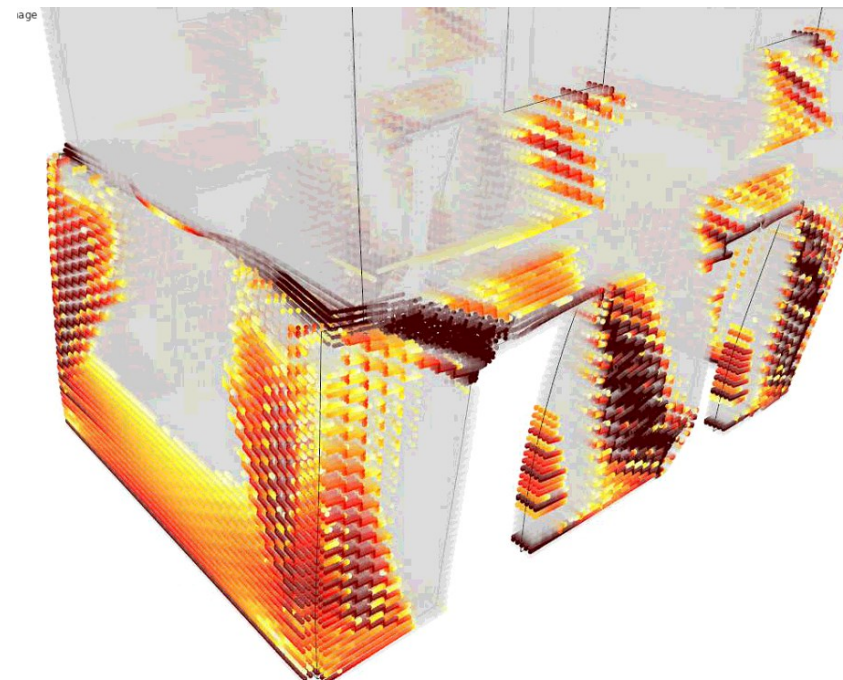
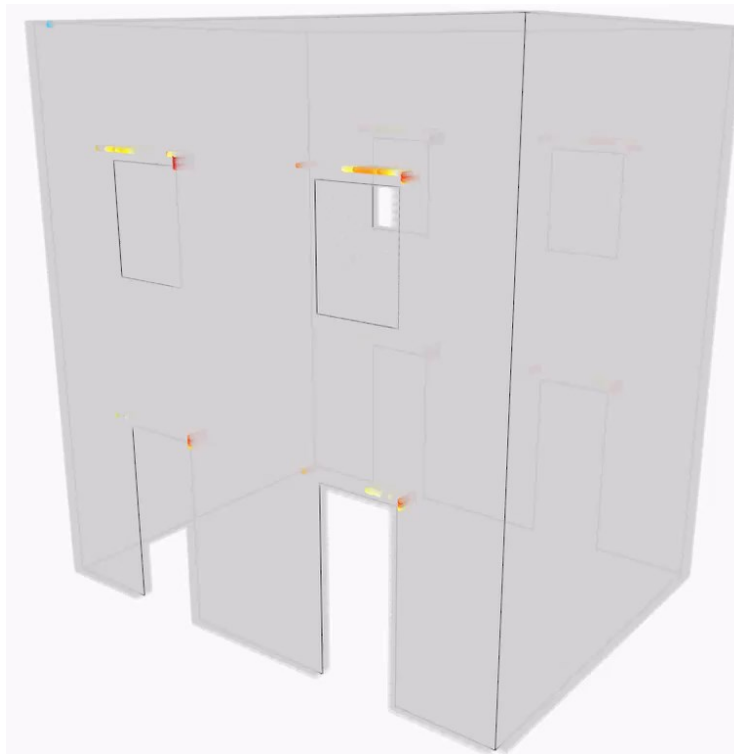


fascia sorretta da arco
in muratura



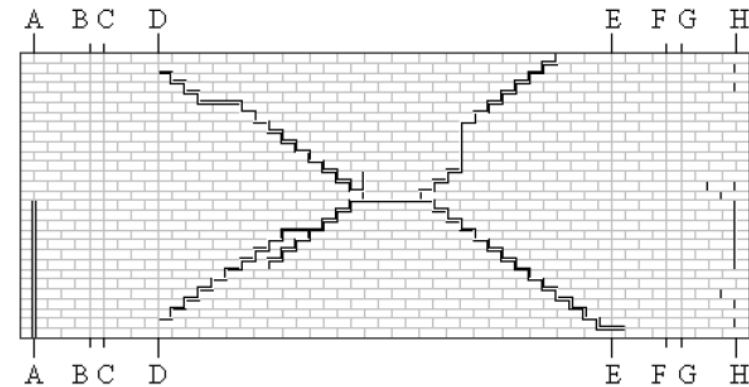
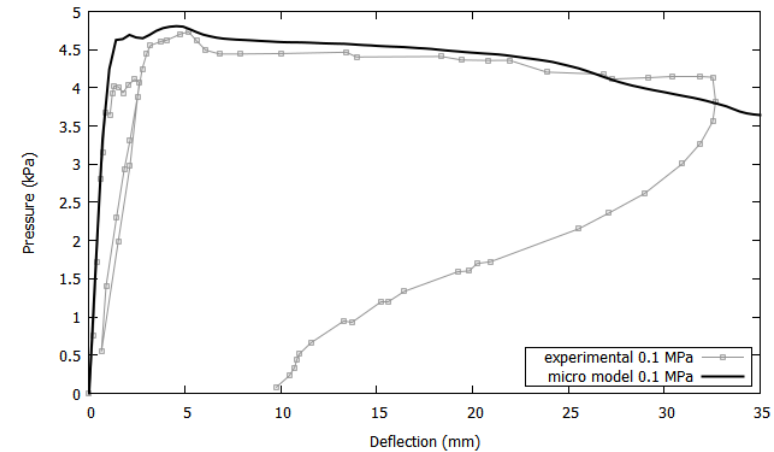
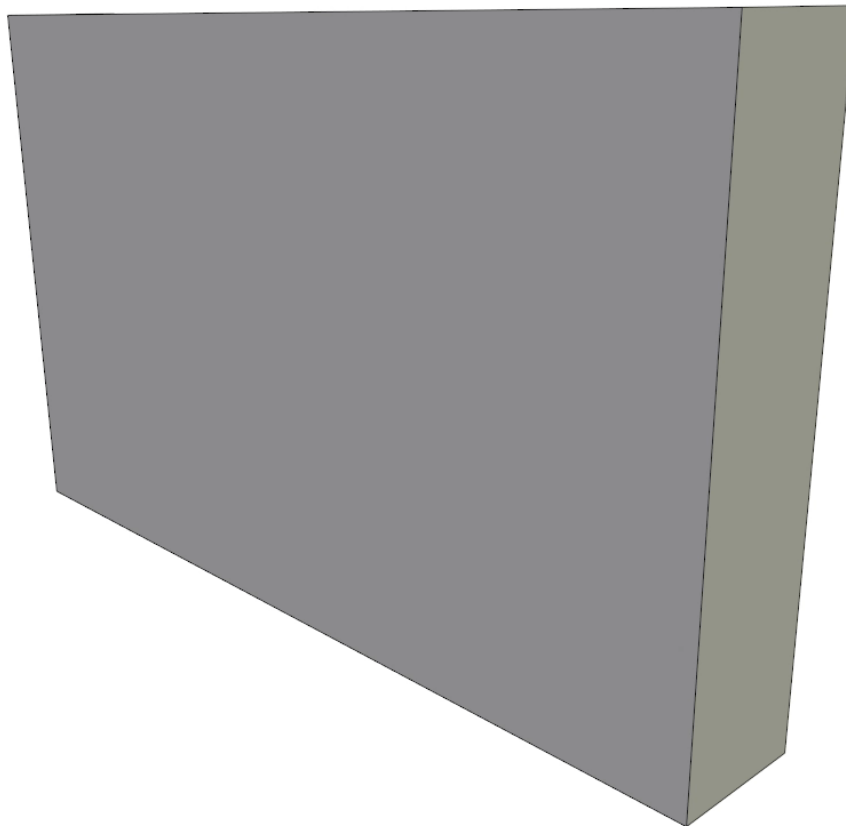
FASCE MURARIE

COSA CONSENTONO DI DESCRIVERE GLI APPROCCI DI MODELLAZIONE?



architrave accoppiato ad elemento resistente a
trazione

CONTRIBUTO A PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO DEI PANNELLI MURARI: SCHEDA DI APPROFONDIMENTO C

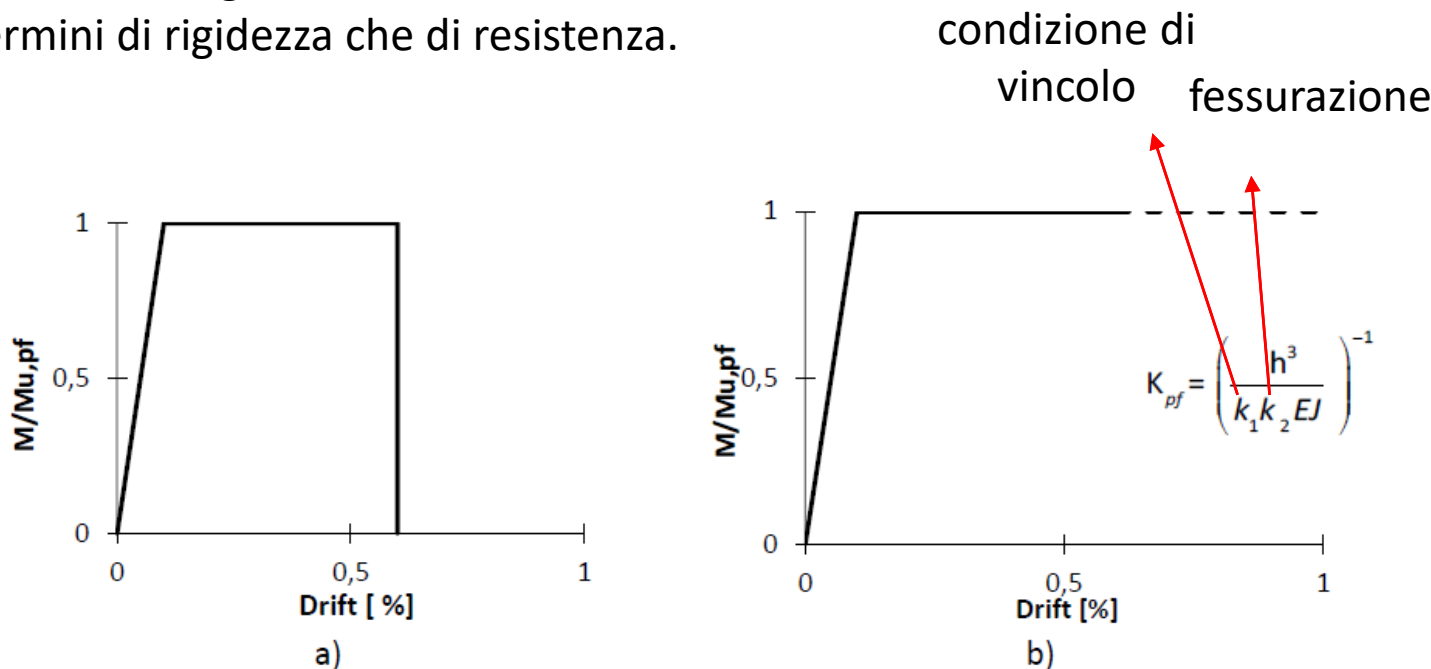


(a) Wall 1

CONTRIBUTO A PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO DEI PANNELLI MURARI

Per quanto riguarda il telaio equivalente, non tutti i software commerciali consentono di considerare esplicitamente il contributo della risposta a pressoflessione fuori piano dei pannelli murari nella valutazione della curva di taglio di base.

- solo in termini di rigidezza;
- sia in termini di rigidezza che di resistenza.

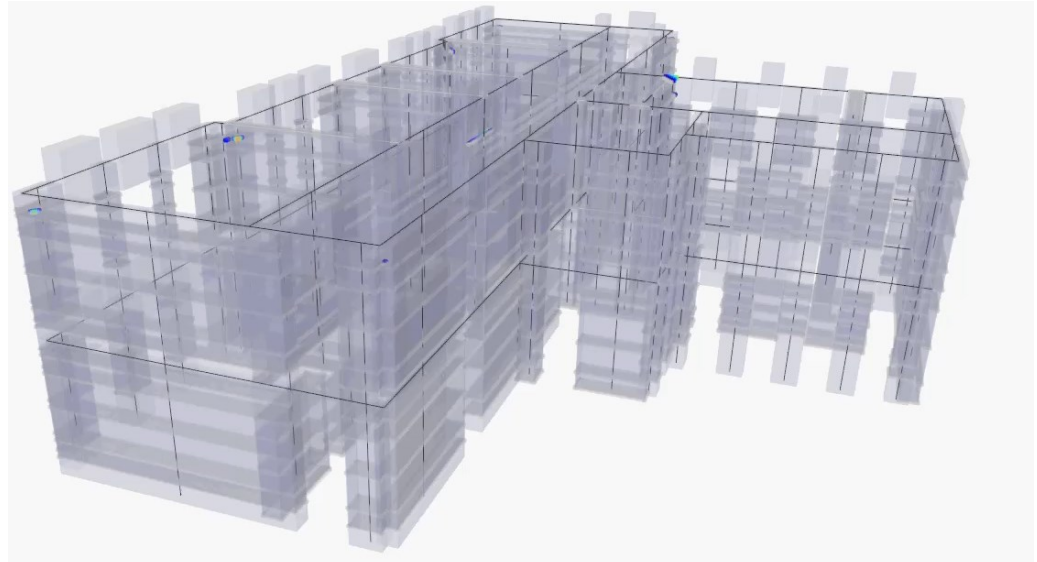
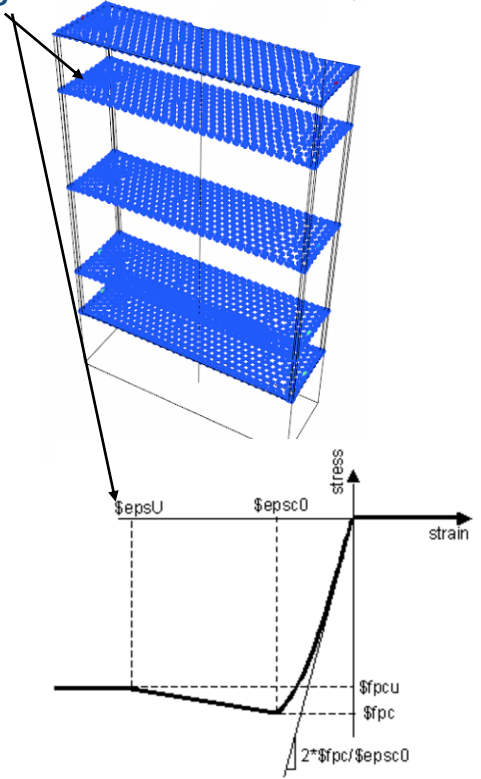


Riguardo la **capacità di spostamento ultimo** (in termini di deformazione angolare ultima θ_u o “drift”), non sono usualmente proposte indicazioni esplicite nei documenti normativi.

CONTRIBUTO A PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO DEI PANNELLI MURARI

Modelli a fibra. Interazione di pressoflessione biassiale «esatta».

Sezioni a fibre a cui sono assegnati i legami costitutivi



‘Pietro Capuzi’ – Visso – Macerata – Italy

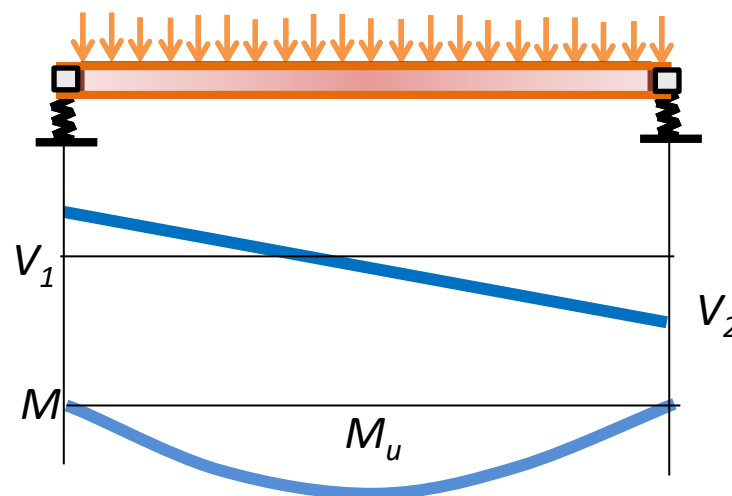
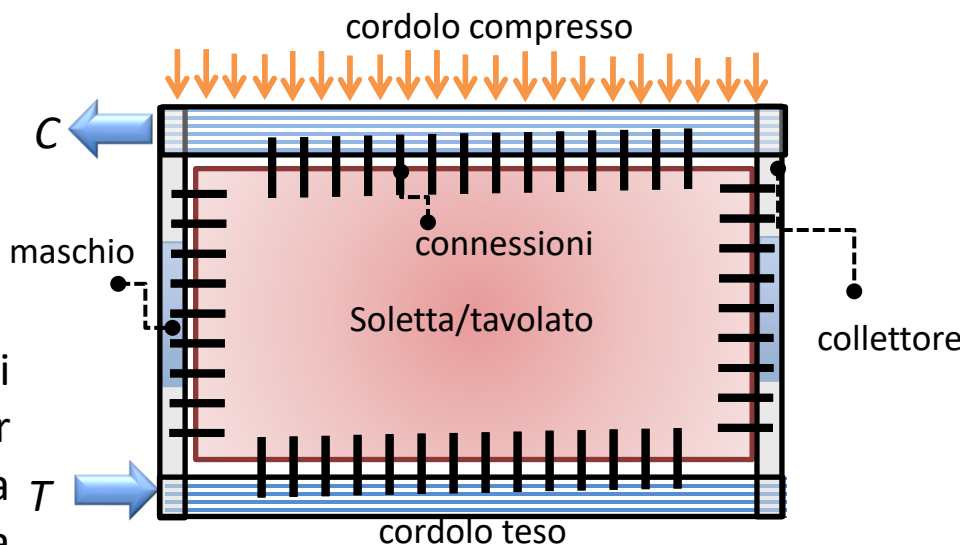
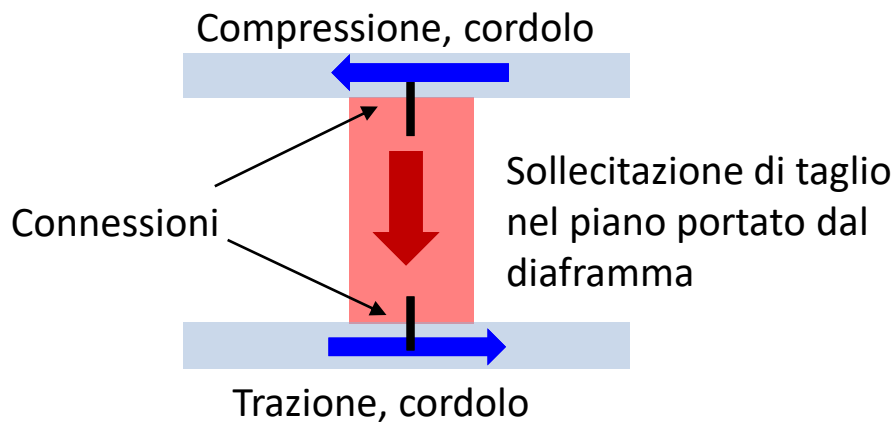
Raka E., Spacone E., Sepe V., Camata G. (2015). Advanced frame element for seismic analysis of masonry structures: model formulation and validation. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. DOI: 10.1002/eqe.259

SOLAI

QUALE IL COMPORTAMENTO REALE DA DESCRIVERE?

- (i) trasferire azioni verticali e orizzontali tra i vari elementi strutturali;
- (ii) nell'accoppiare i sistemi sismoresistenti in funzione della loro rigidezza.

Il momento del diaframma è resistito dai cordoli a trazione e compressione, per equilibrio richiede che il taglio del diaframma venga distribuito uniformemente lungo la profondità del diaframma.

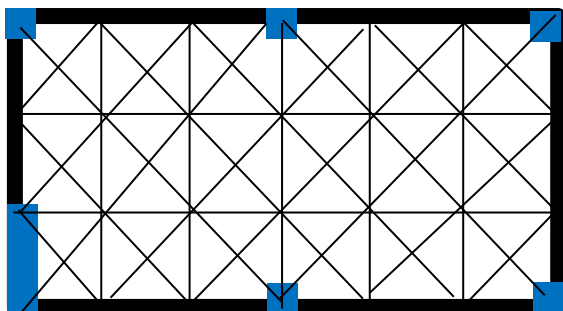


SOLAI

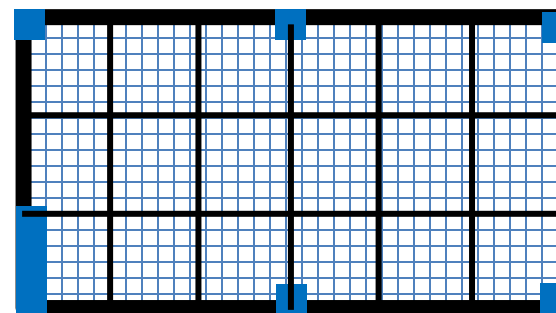
COSA CONSENTONO DI DESCRIVERE GLI APPROCCI DI MODELLAZIONE?

Il modello deve rispecchiare il funzionamento illustrato:

- Considerare il solaio come vincolo cinematico (piano rigido);
- Modellarlo come un insieme di molle o travi;
- Modellarli come delle membrane equivalenti;
- Modellare nel dettaglio i diversi componenti.



modello a biella/molle



modello shell/membrana e travetti

3.1 Modelli per i diversi componenti strutturali dell'edificio

3.1.1 Pannelli murari

3.1.1.1 Maschi murari

3.1.1.2 Fasce murarie

3.1.2 Solai

3.2 Elaborazione del modello

3.2.1 Modellazione della parete muraria

3.2.1.1 Aspetti peculiari dei modelli a telaio equivalente

3.2.1.2 Aspetti peculiari dei modelli al continuo

3.2.2 Modellazione dei solai

3.2.3 Modellazione delle connessioni (parete-parete e solaio-parete)

3.3 Esecuzione dell'analisi

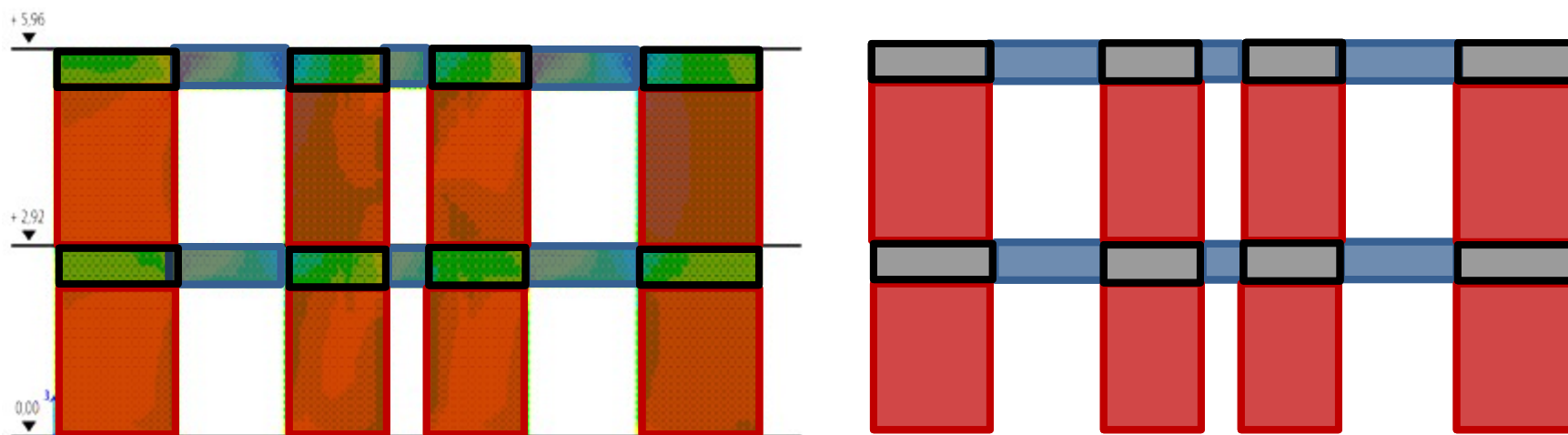
3.4 Fasi di verifica

3.4.1 Aspetti peculiari dei modelli FEM al continuo

3.4.2 Aspetti peculiari dei modelli a telaio

MODELLAZIONE DELLA PARETE MURARIA

Scelta della scala di modellazione



Maschio



Fascia

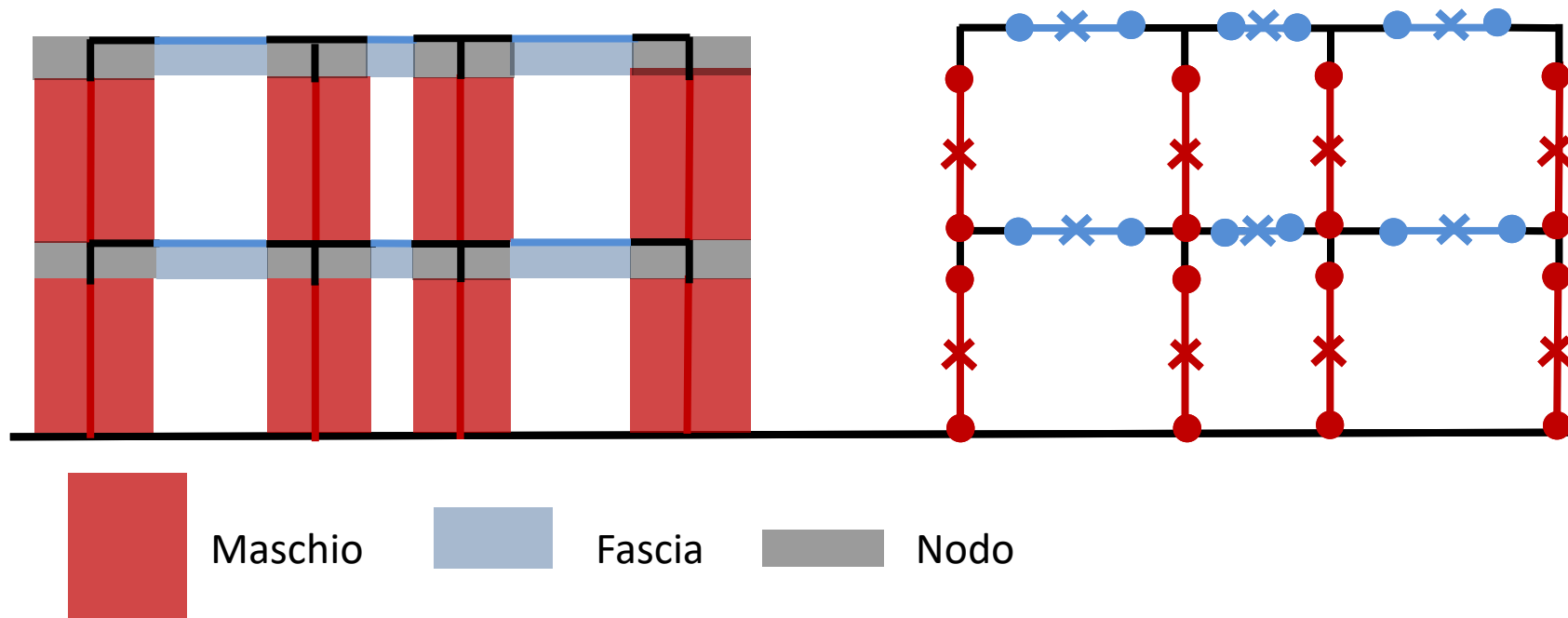


Nodo

MODELLAZIONE DELLA PARETE MURARIA

Si assume che la massima capacità a taglio del pannello sia raggiunta quando in sezioni/punti prefissati del pannello si ha il valore limite della resistenza del materiale.

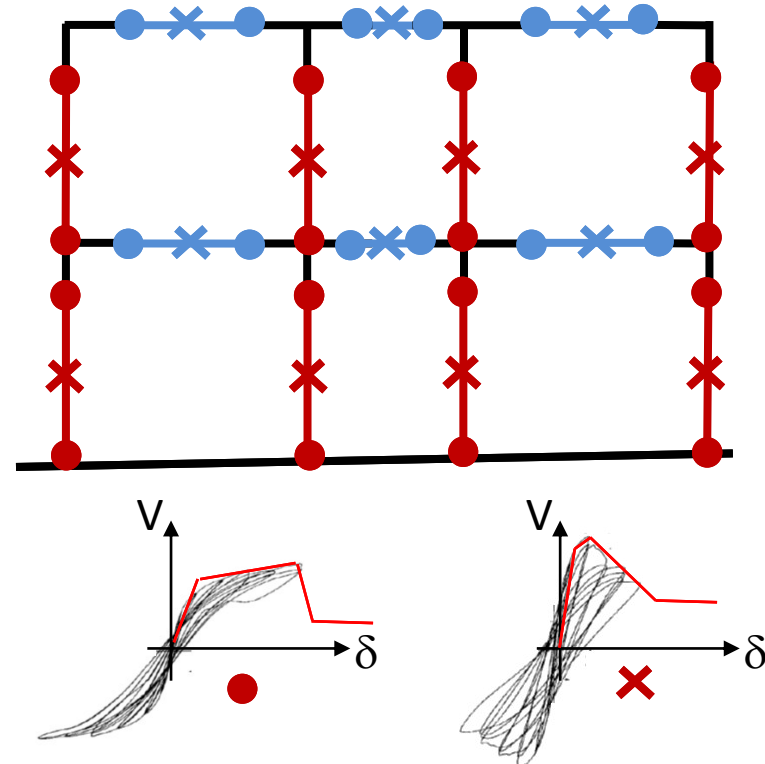
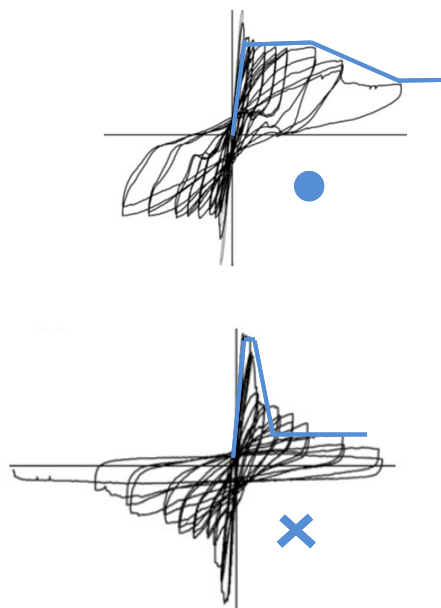
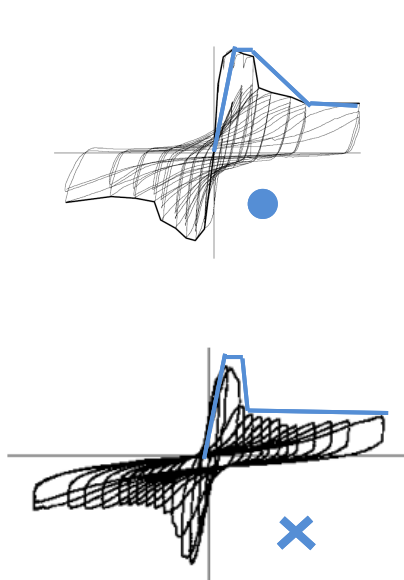
La scelta di tali sezioni/punti (sezione di estremità, centro del pannello) come quella del parametro di resistenza del materiale (a compressione, a trazione, a taglio, ecc.) e diversificata in relazione alla modalità di danno descritta.



MODELLAZIONE DELLA PARETE MURARIA

Assenza di elemento resistente a trazione

Presenza di elemento resistente a trazione

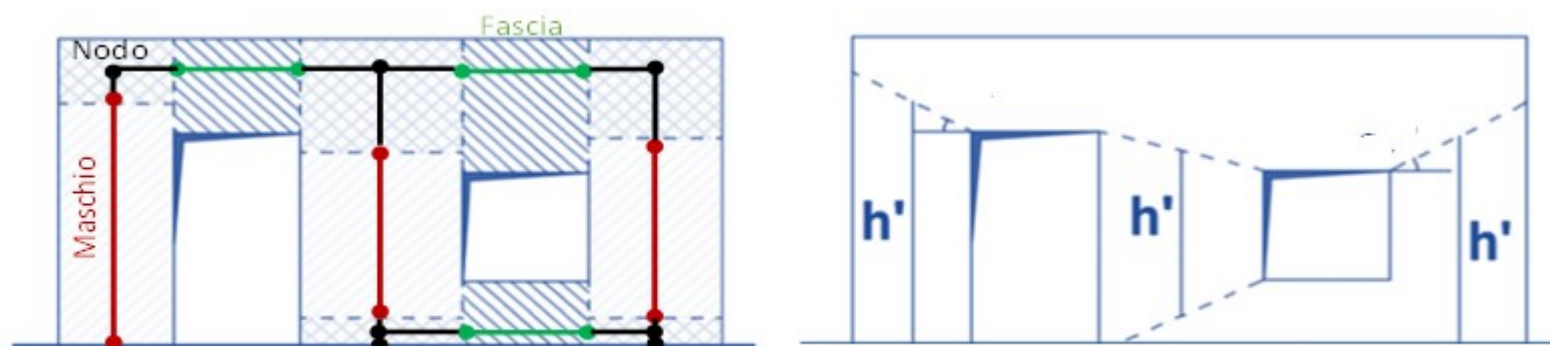


ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE

L'identificazione della geometria degli elementi strutturali influenza:

- ramo iniziale,
- sul taglio di base massimo,
- sulla capacità di spostamento ultima

Criteri di idealizzazione a telaio e influenza del contributo fuori piano - >
approfonditi nella presentazione della prof. Cattari

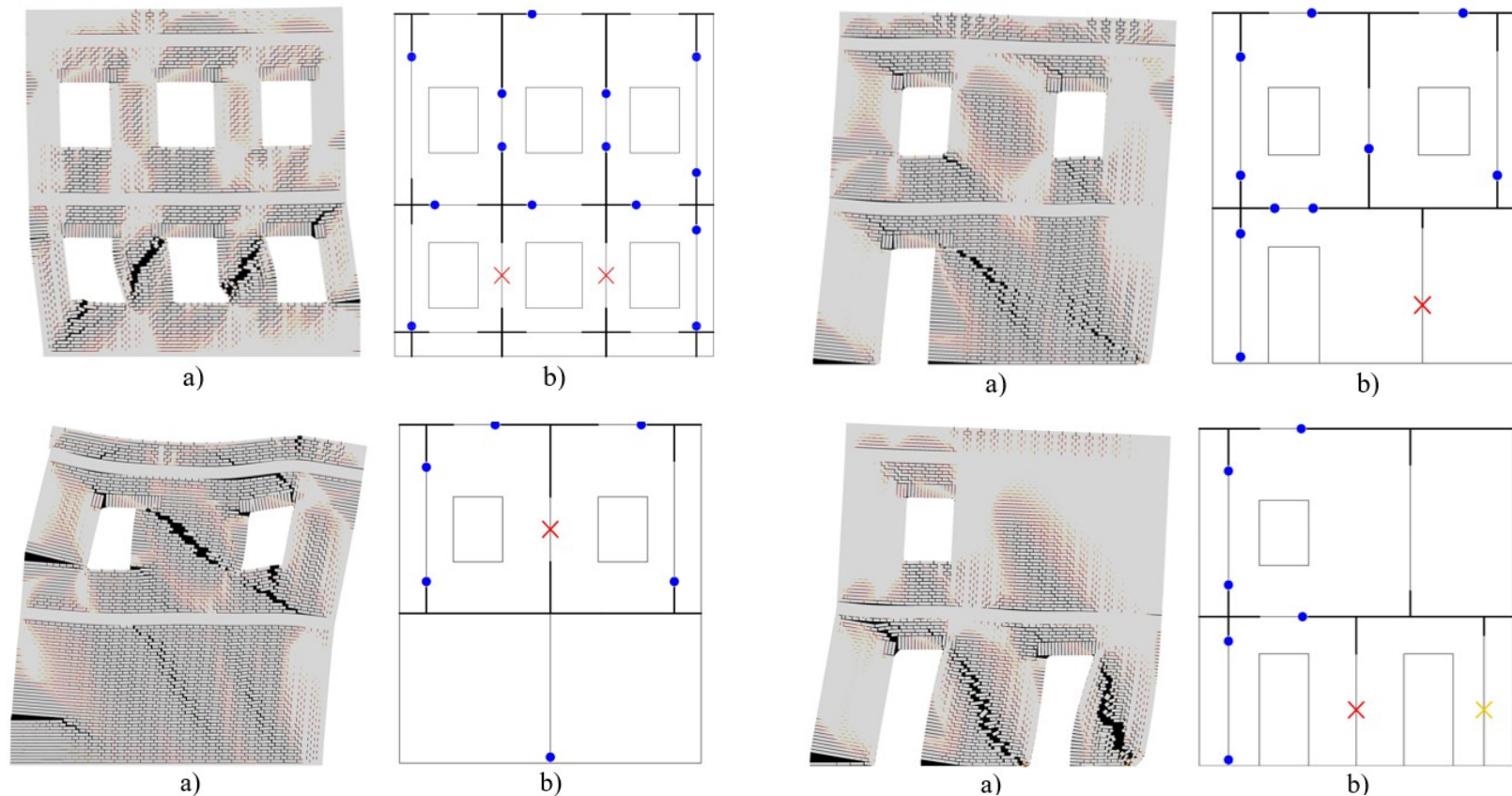


Fare attenzione a:

- l'interazione tra i pannelli di tipo maschio e fascia
- L'incapacità di rappresentare correttamente la rottura mista

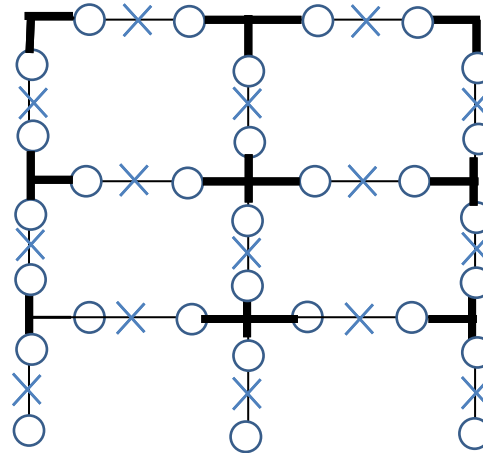
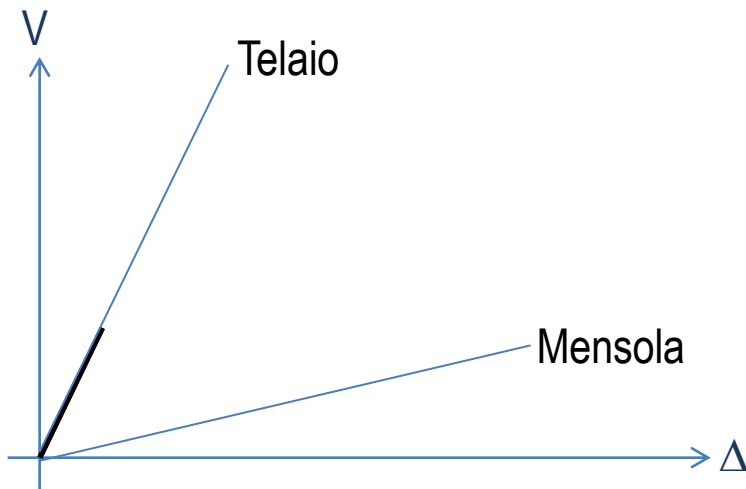
ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE

In caso di aperture non perfettamente allineate in verticale, non sono proposte in letteratura regole specifiche e sistematiche supportate da studi numerici o sperimentali.

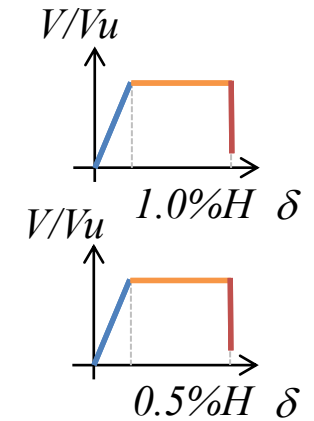


Marano C., Camata G., Sepe V., Spacone E., Siano R., Pelà L, Roca P., Petracca. 2020. Numerical investigation of non-linear equivalent-frame models for irregular masonry walls.

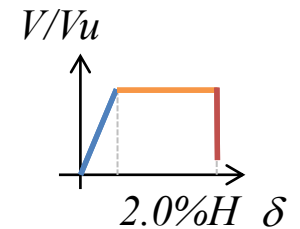
ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE



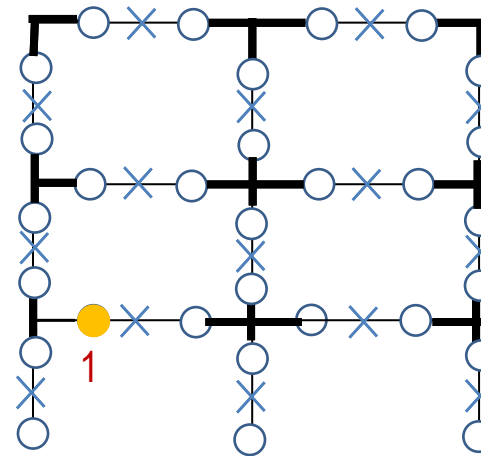
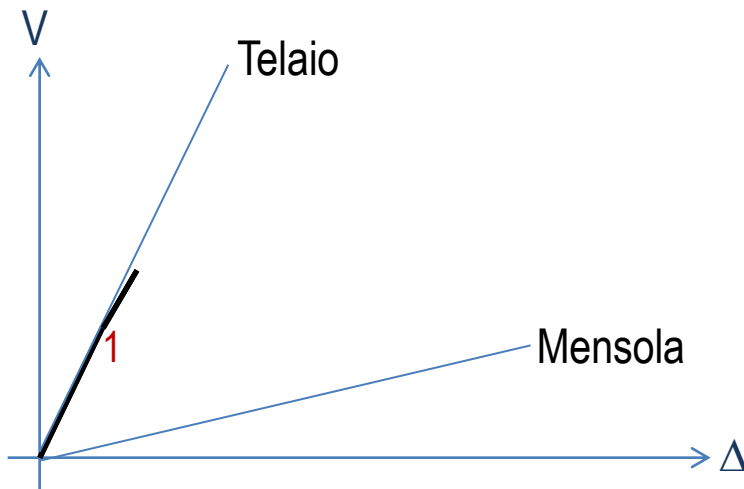
Maschio



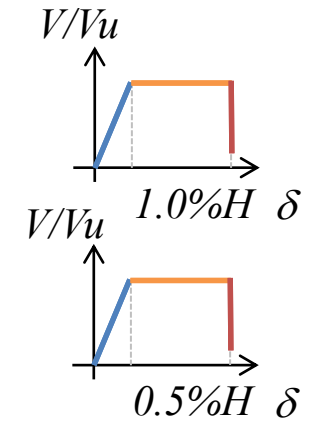
Fascia con elemento resistente a trazione



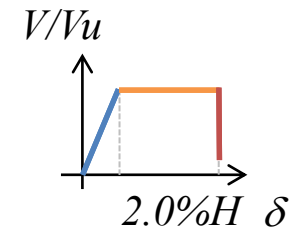
ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE



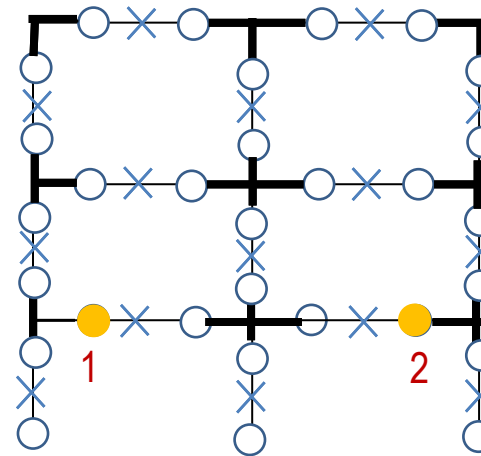
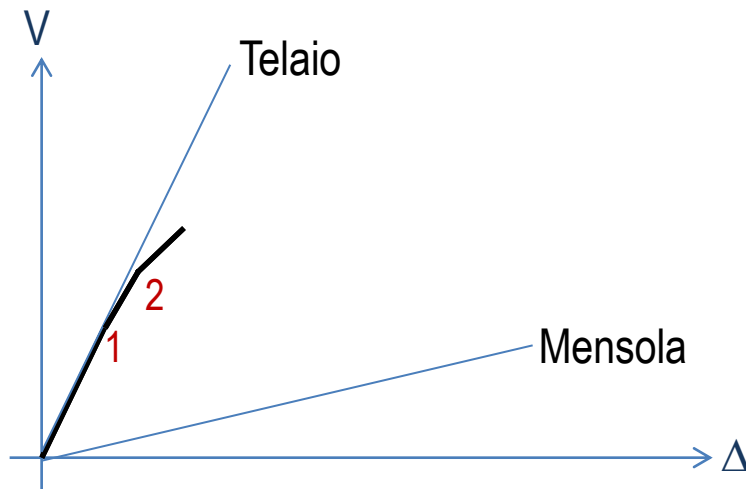
Maschio



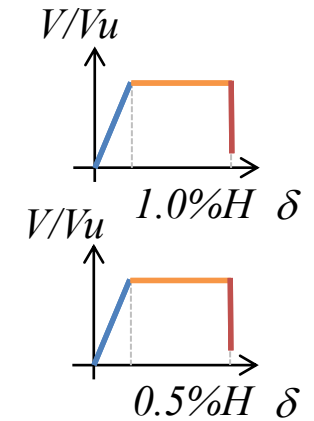
Fascia con elemento resistente a trazione



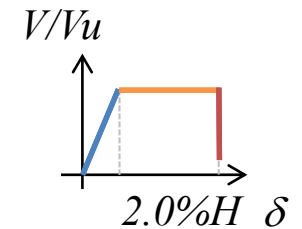
ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE



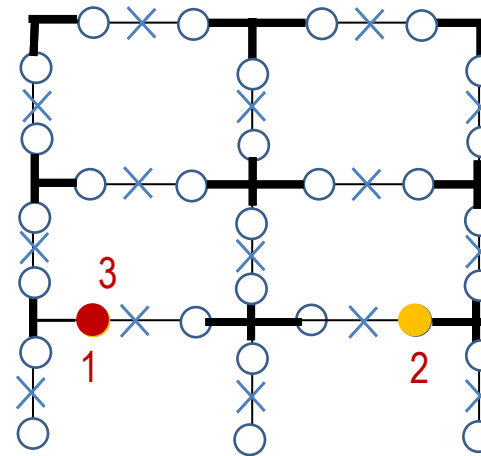
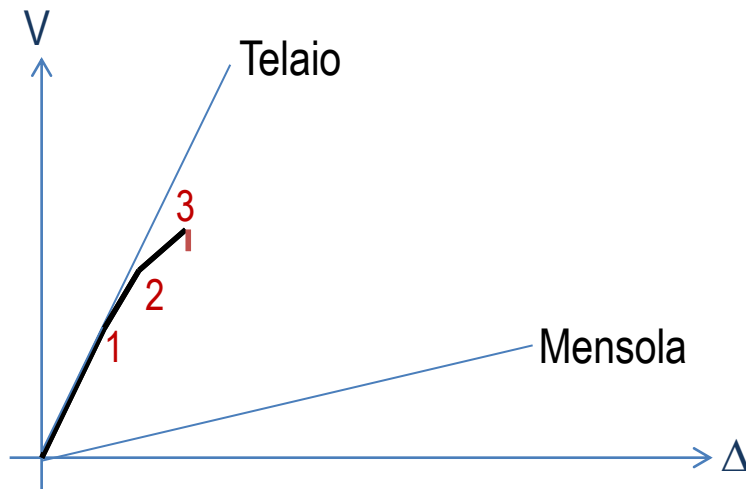
Maschio



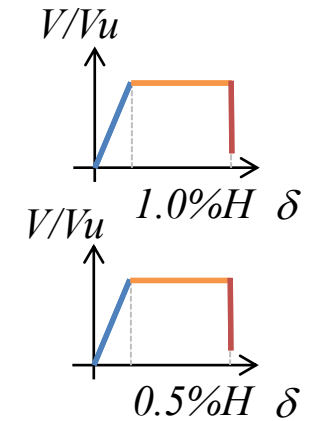
Fascia con elemento resistente a trazione



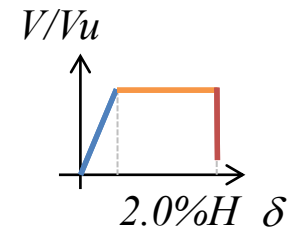
ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE



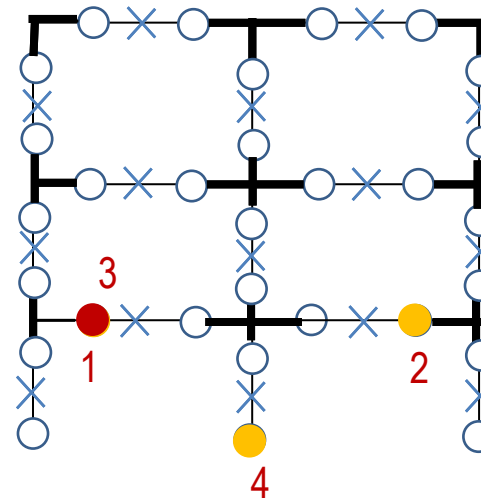
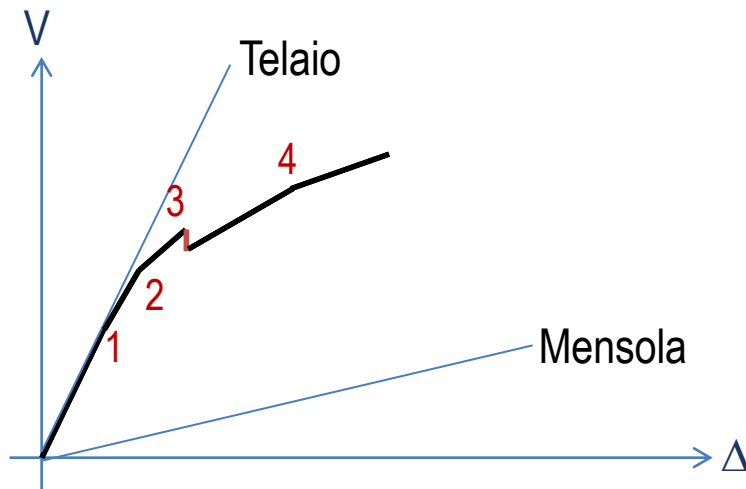
Maschio



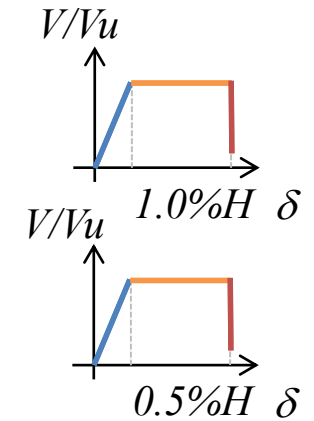
Fascia con elemento resistente a trazione



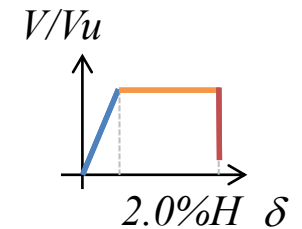
ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE



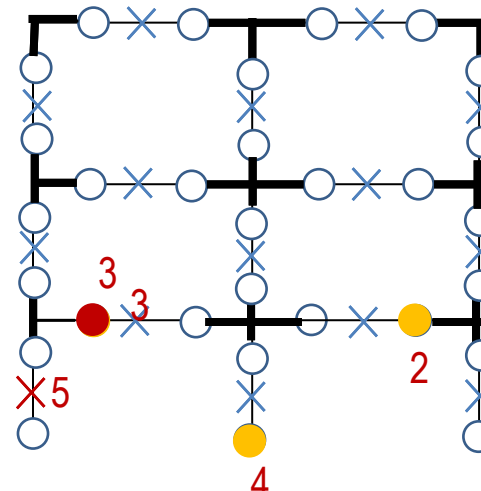
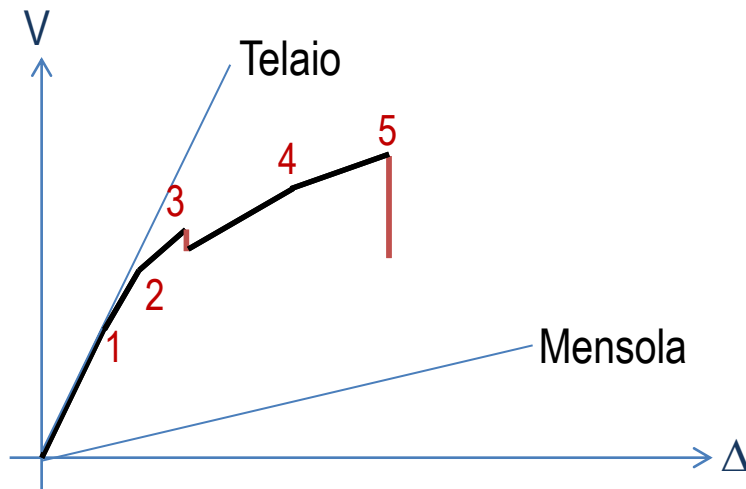
Maschio



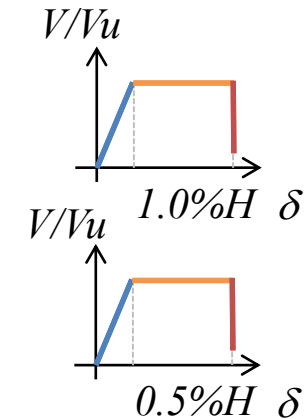
Fascia con elemento resistente a trazione



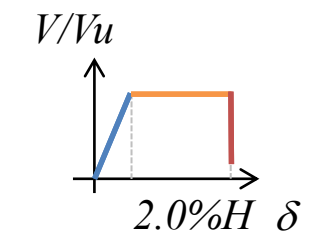
ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE



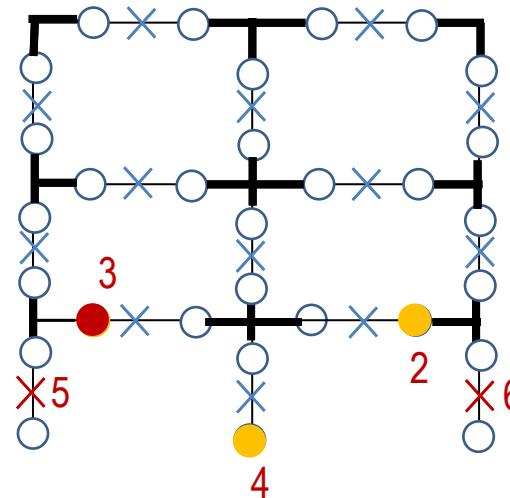
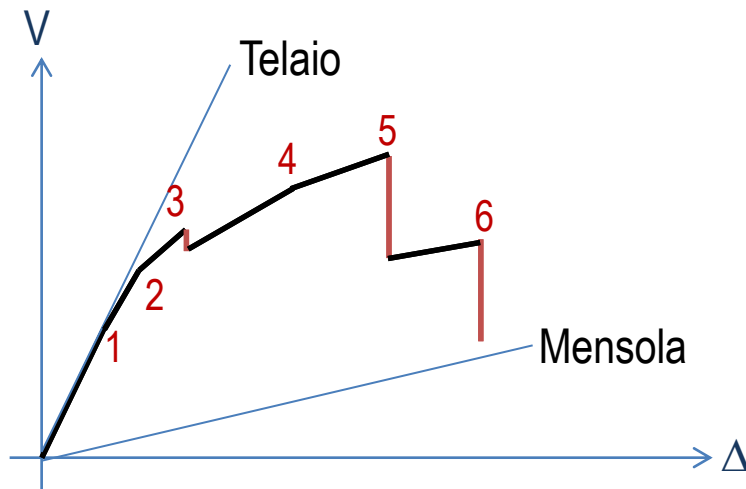
Maschio



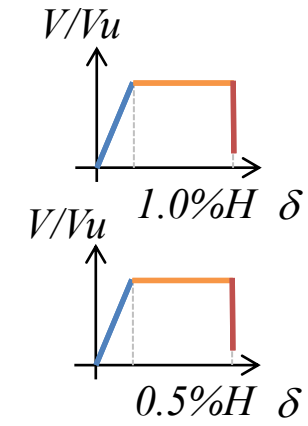
Fascia con elemento resistente a trazione



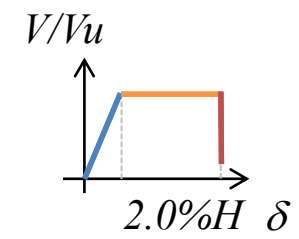
ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE



Maschio



Fascia con elemento resistente a trazione



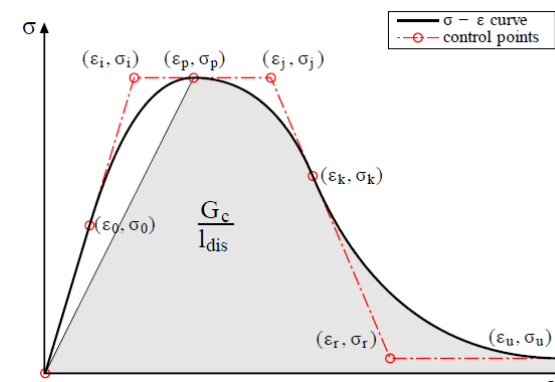
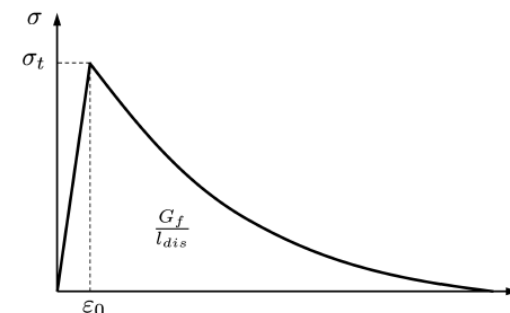
ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI AL CONTINUO

Devono essere fatte assunzioni fondamentali su:

- Selezione dell'elemento finito
- Leggi costitutive e parametri meccanici
- Definizione dei carichi e storia di carico
- Discretizzazione della mesh
- Algoritmi e criteri di convergenza (anche sul telaio)

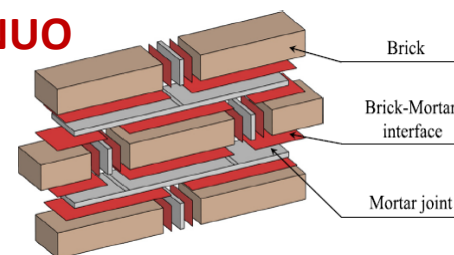
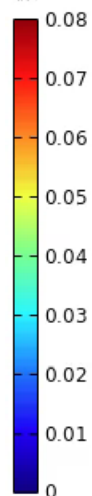
I parametri da valutare:

- Moduli elastici
- Resistenza a compressione
- Resistenza a trazione e energia di frattura del materiale

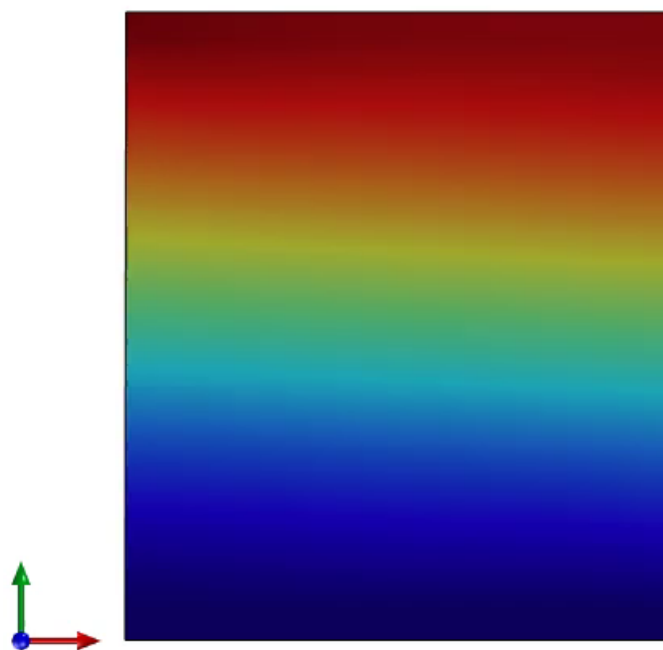
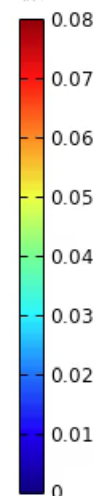


ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI AL CONTINUO

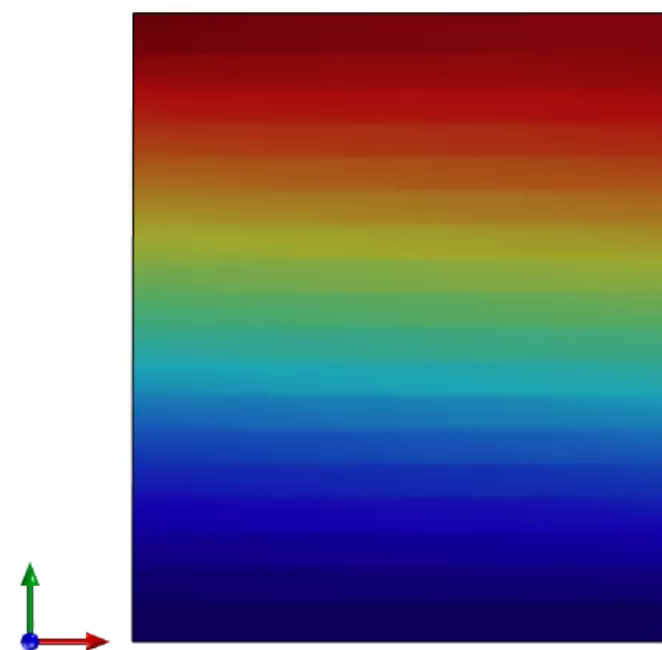
Legami costitutivi

Displacement
 U_x 

Macromodello continuo

Displacement
 U_x 

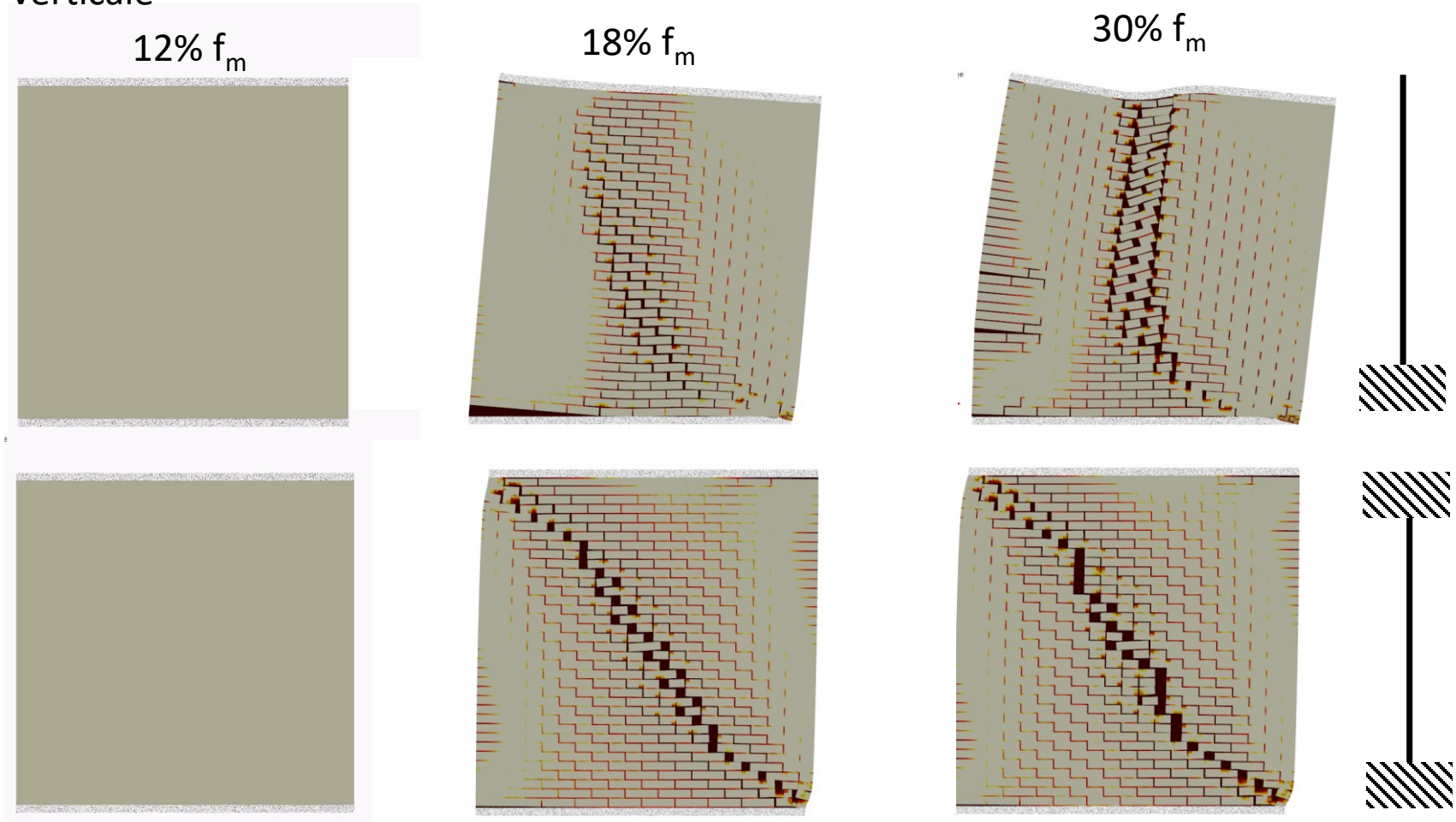
Micromodello



Petracca, M., Pelà, L., Rossi, R., Zaghi, S., Camata, G., Spacone, E. (2017) Micro-scale continuous and discrete numerical models for nonlinear analysis of masonry shear walls. *Construction and Building Materials*, 149, pp. 296-314. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.130

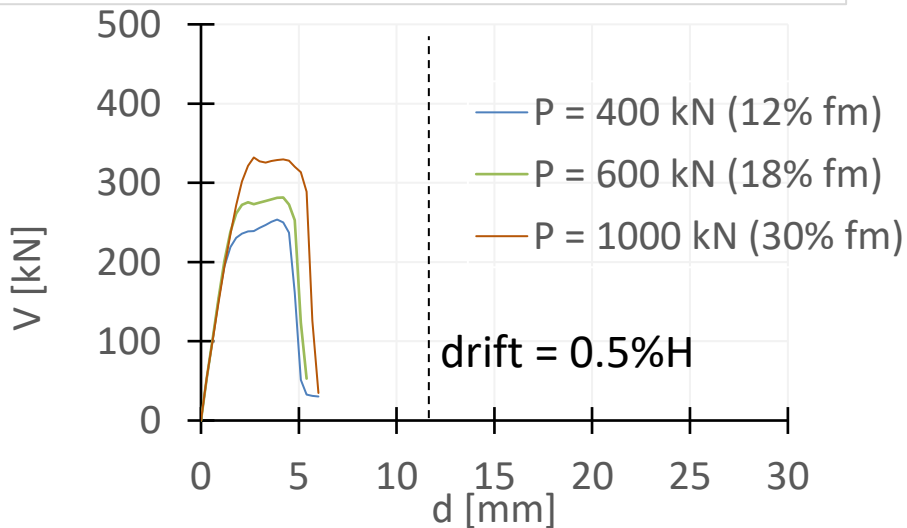
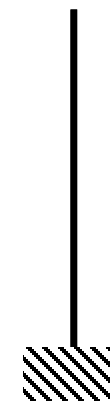
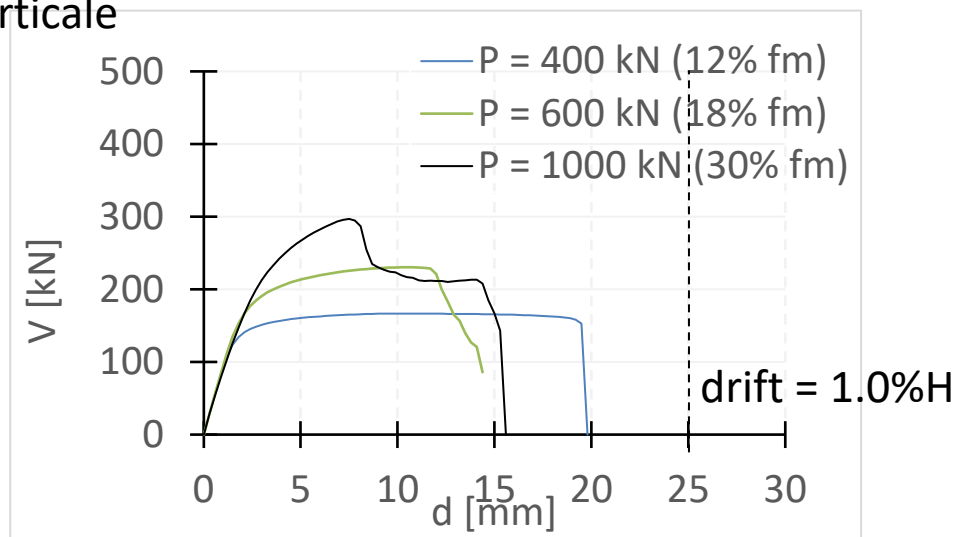
ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI AL CONTINUO

Capacità di predire la risposta al variare delle condizioni di vincolo e carico verticale



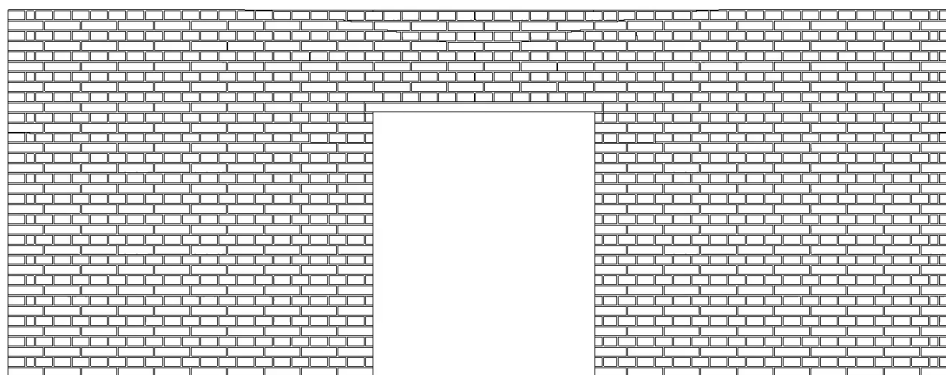
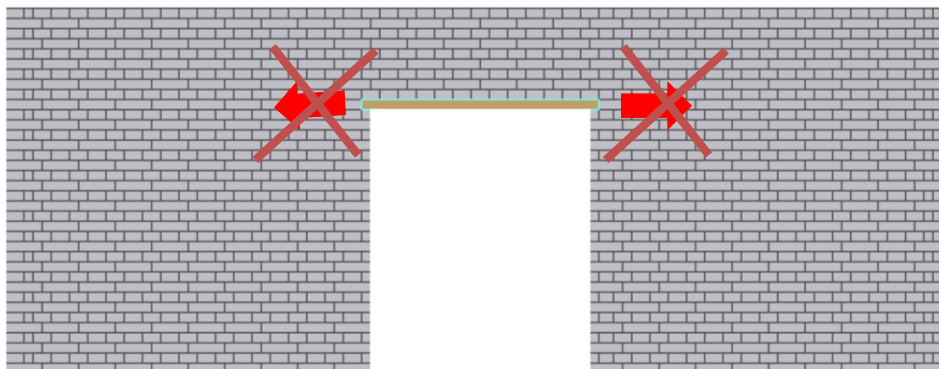
ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI AL CONTINUO

Capacità di predire la risposta al variare delle condizioni di vincolo e carico verticale



ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI AL CONTINUO

E' fondamentale modellare correttamente l'architrave e l'eventuale elemento resistente a trazione (cordolo o catena)



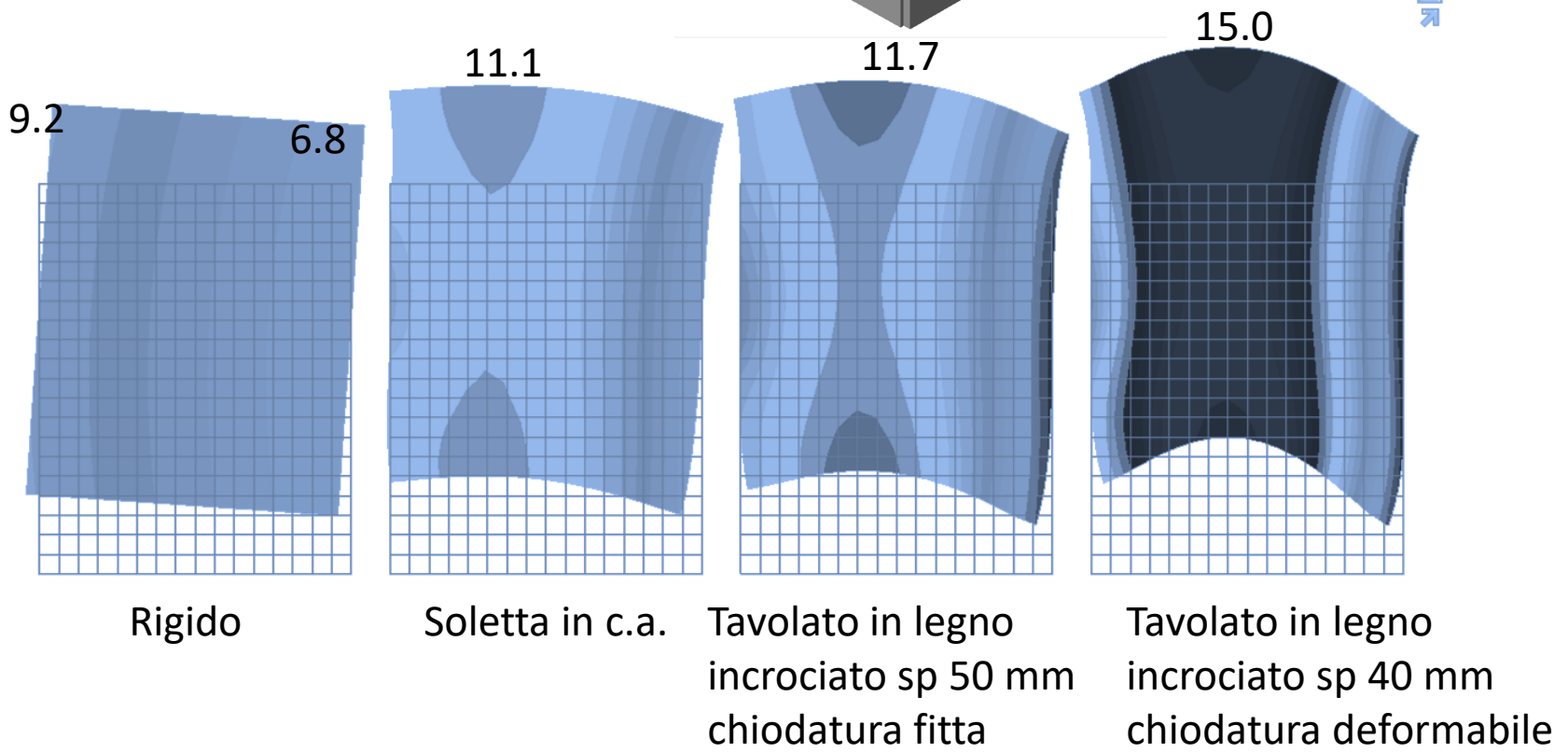
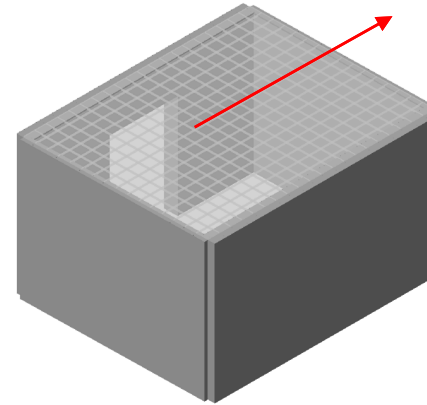
architrave
in legno, acciaio o c.a.

Aspetto molto delicato è quello rappresentato dalle fasce e deve includere:

- resistenza a trazione della muratura o essere capace di simulare i fenomeni di ingranamento nelle sezioni di estremità
- modellazione esplicita dell'architrave per reggere i carichi verticali che deve poter scorrere quando la struttura è sottoposta a una sollecitazione sismica
- il cordolo e/o le catene devono essere modellate esplicitamente attraverso elementi continui o monodimensionali.

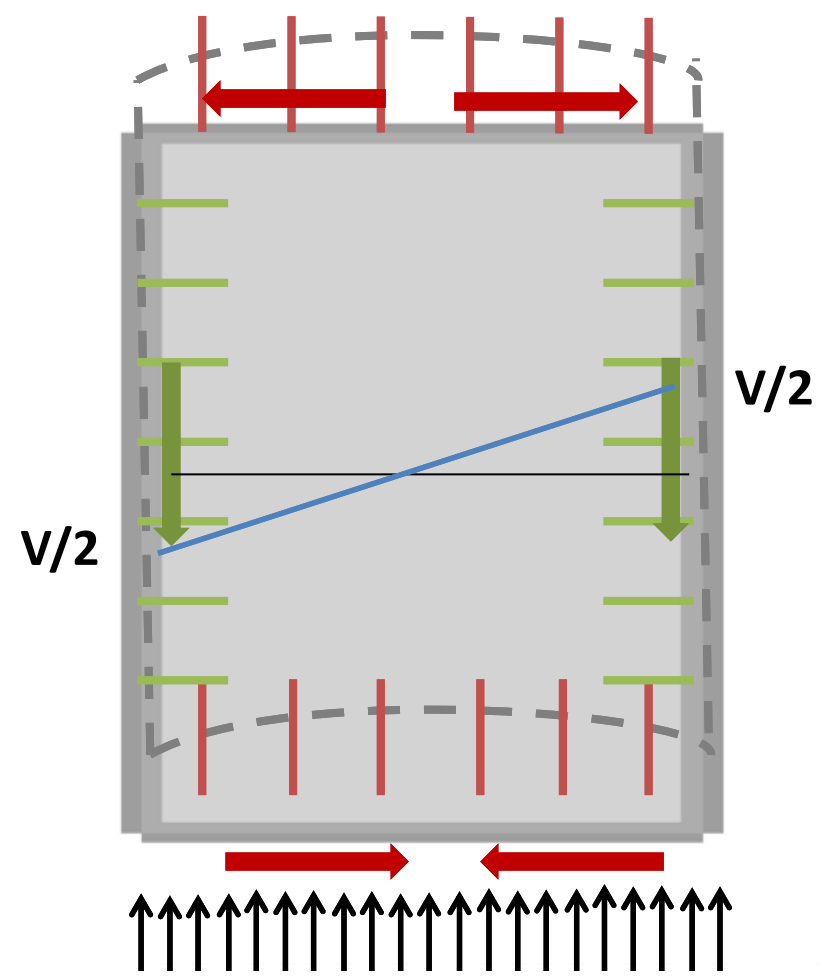
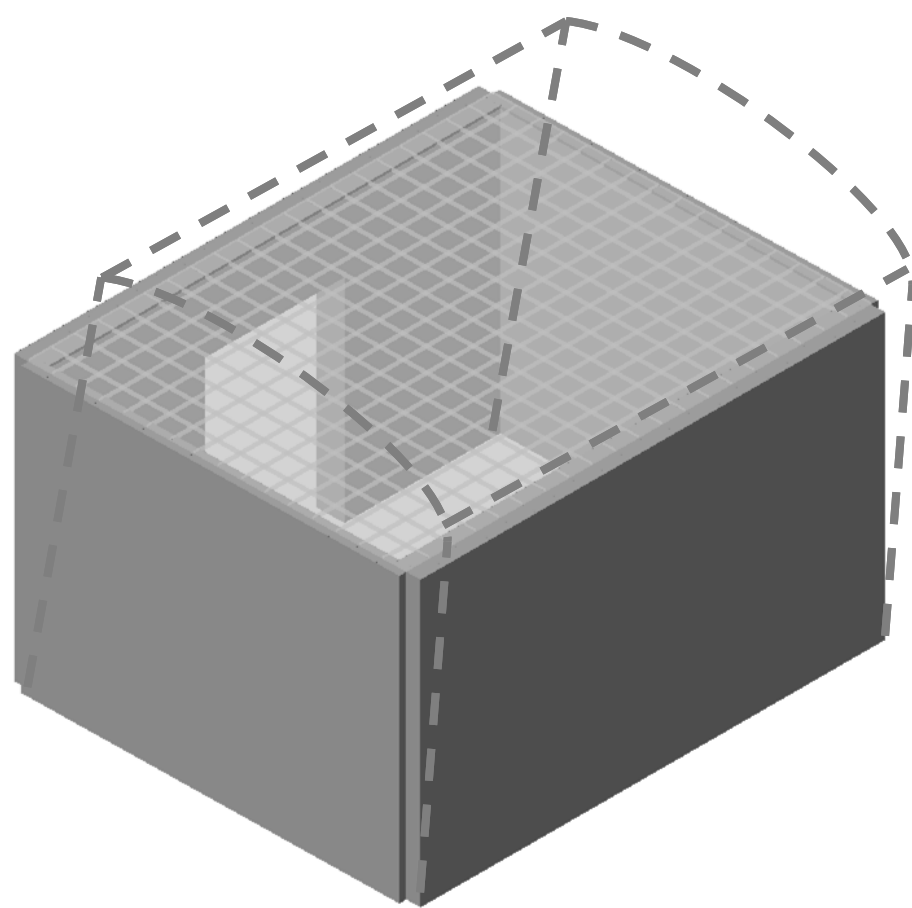
MODELLAZIONE DEI SOLAI

Influenza della rigidezza dei solai



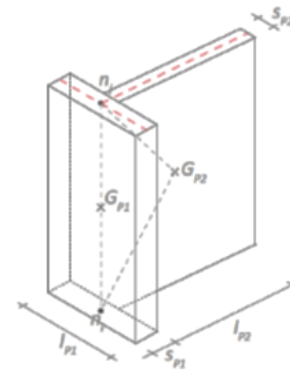
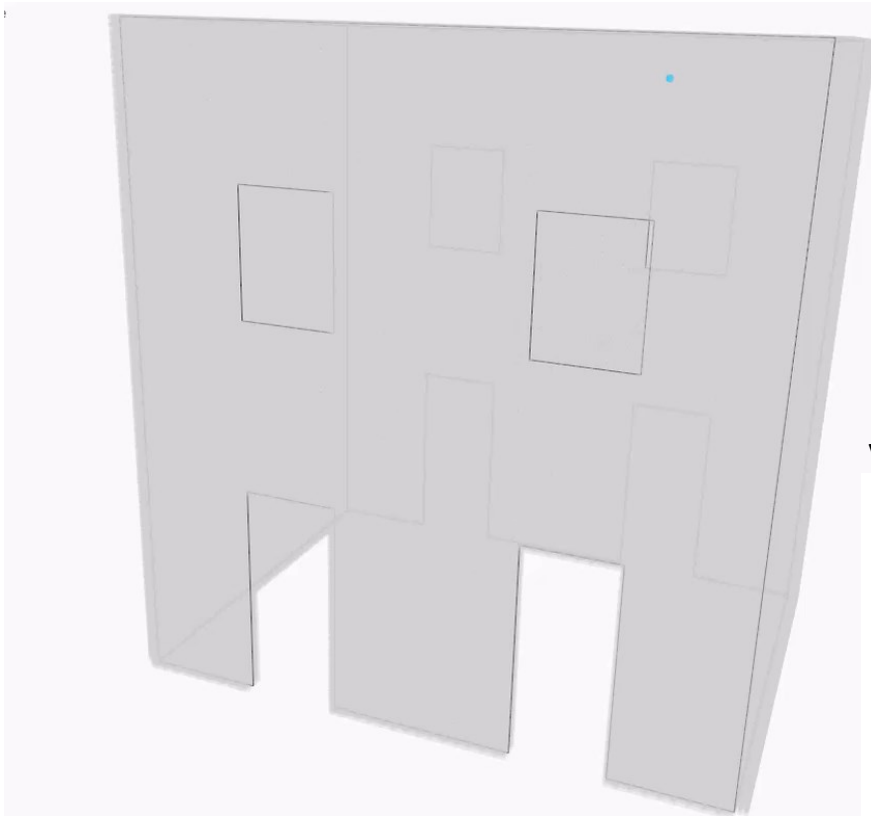
MODELLAZIONE DELLE CONNESSIONI (SOLAIO-PARETE)

- _ modelli a telaio equivalente
- _ modelli continui

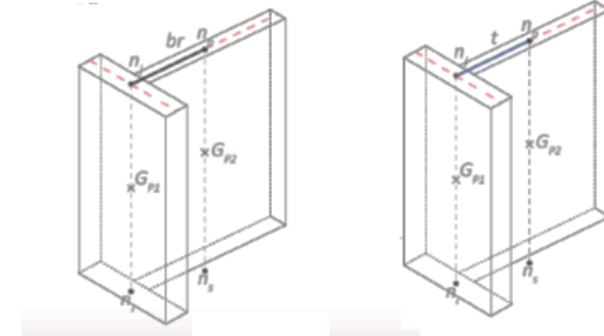


MODELLAZIONE DELLE CONNESSIONI (PARETE-PARETE)

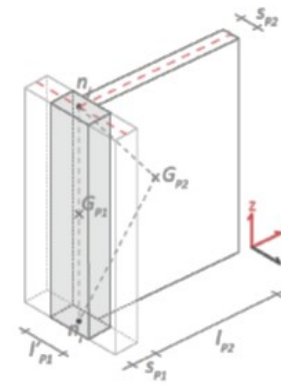
La modellazione dovrebbe essere in grado di riprodurre la qualità dell'ammorsamento tra le pareti: quando è efficace si realizza l'effetto flangia



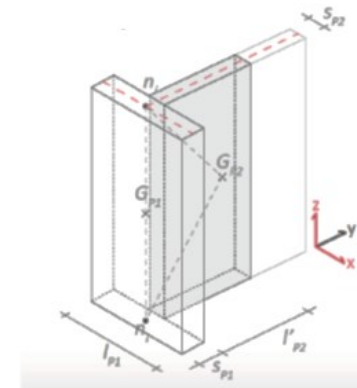
Vincoli cinematici



Inserimento di travi



Modifica geometria setto



3.1 Modelli per i diversi componenti strutturali dell'edificio

3.1.1 Pannelli murari

3.1.1.1 Maschi murari

3.1.1.2 Fasce murarie

3.1.2 Solai

3.2 Elaborazione del modello

3.2.1 Modellazione della parete muraria

3.2.1.1 Aspetti peculiari dei modelli a telaio equivalente

3.2.1.2 Aspetti peculiari dei modelli al continuo

3.2.2 Modellazione dei solai

3.2.3 Modellazione delle connessioni (parete-parete e solaio-parete)

3.3 Esecuzione dell'analisi

3.4 Fasi di verifica

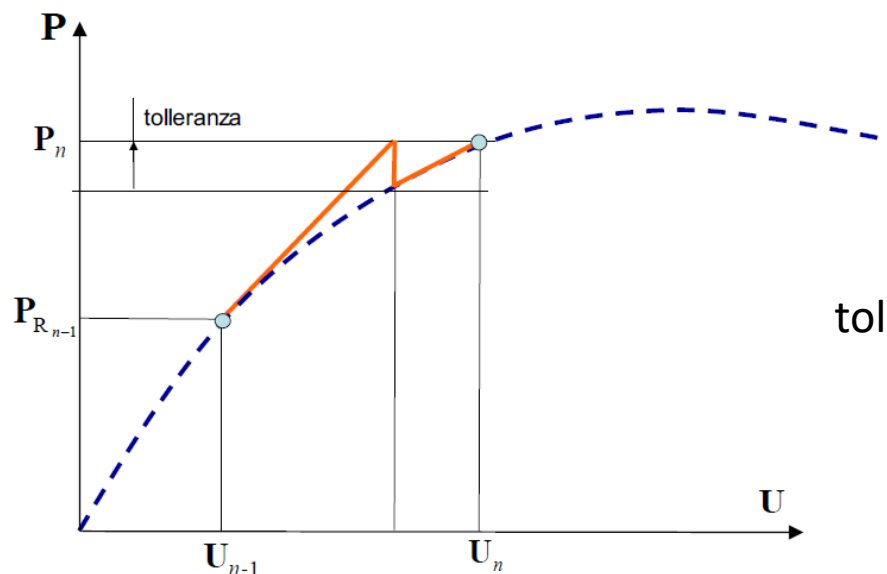
3.4.1 Aspetti peculiari dei modelli FEM al continuo

3.4.2 Aspetti peculiari dei modelli a telaio

ESECUZIONE DELL'ANALISI

A differenza delle analisi lineari, l'applicazione delle analisi nonlineari non è di immediata applicazione e richiede assunzioni che possono avere un impatto determinante sui risultati:

- selezione del tipo di elemento,
- la scelta dei criteri di convergenza,
- la definizione della storia di carico e del metodo di applicazione del carico,
- la definizione dell'input sismico,
- la scelta dei legami costitutivi dei materiali
- tipologia di mesh utilizzata.



tolleranza: $P_R - P \leq \text{tol.}$

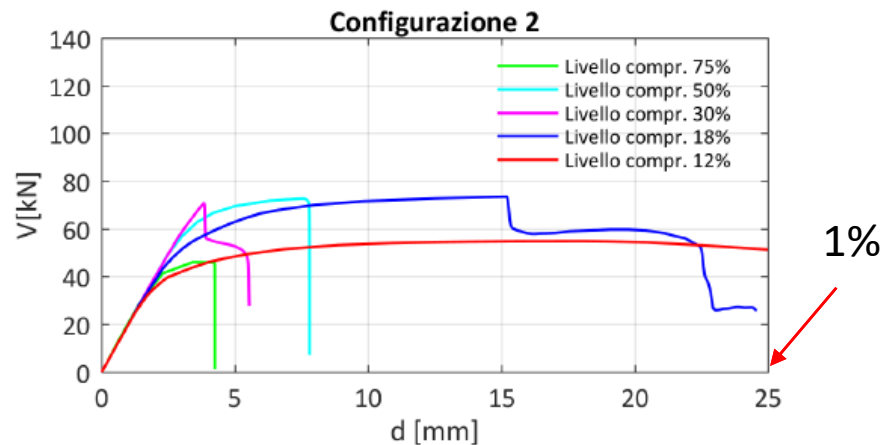
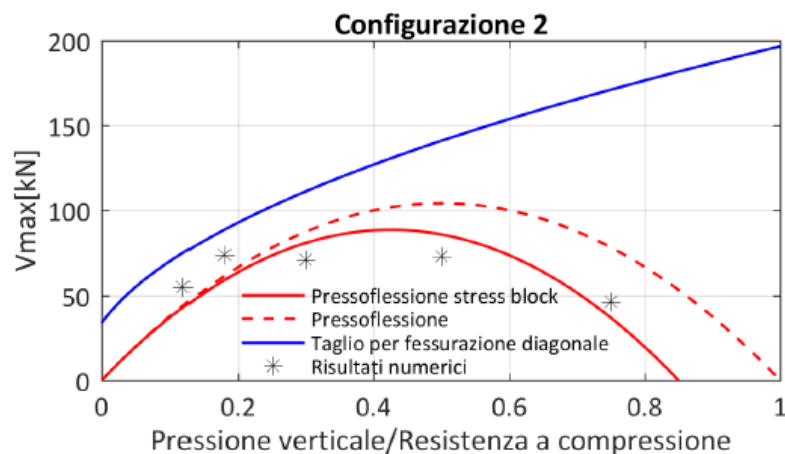
FASI DI VERIFICA - Aspetti peculiari dei modelli FEM al continuo

Scheda di approfondimento A, valuta l'influenza dei parametri richiesti nell'input del modello continuo sulla curva di capacità di un maschio murario in termini di rigidità, di resistenza e di drift ultimo.

Le incertezze legate ai parametri da utilizzare, combinate con le incertezze legate al modello matematico complesso, devono essere valutate con attenzione effettuando dei controlli a posteriori e confrontando i risultati con i limiti forniti dalla normativa in termini di capacità e deformazione.

Elaborazione dei risultati per quanto riguarda la restituzione delle sollecitazioni e del quadro del danno ai diversi passi di analisi. I modelli al continuo contengono informazioni molto dettagliate (tensioni, deformazioni, parametri di danno, posizione e ampiezza delle fessure, localizzazione delle porzioni danneggiate in ogni pannello murario, ecc.) che devono essere correttamente elaborate ed eventualmente confrontate a modelli semplificati.

ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI FEM AL CONTINUO



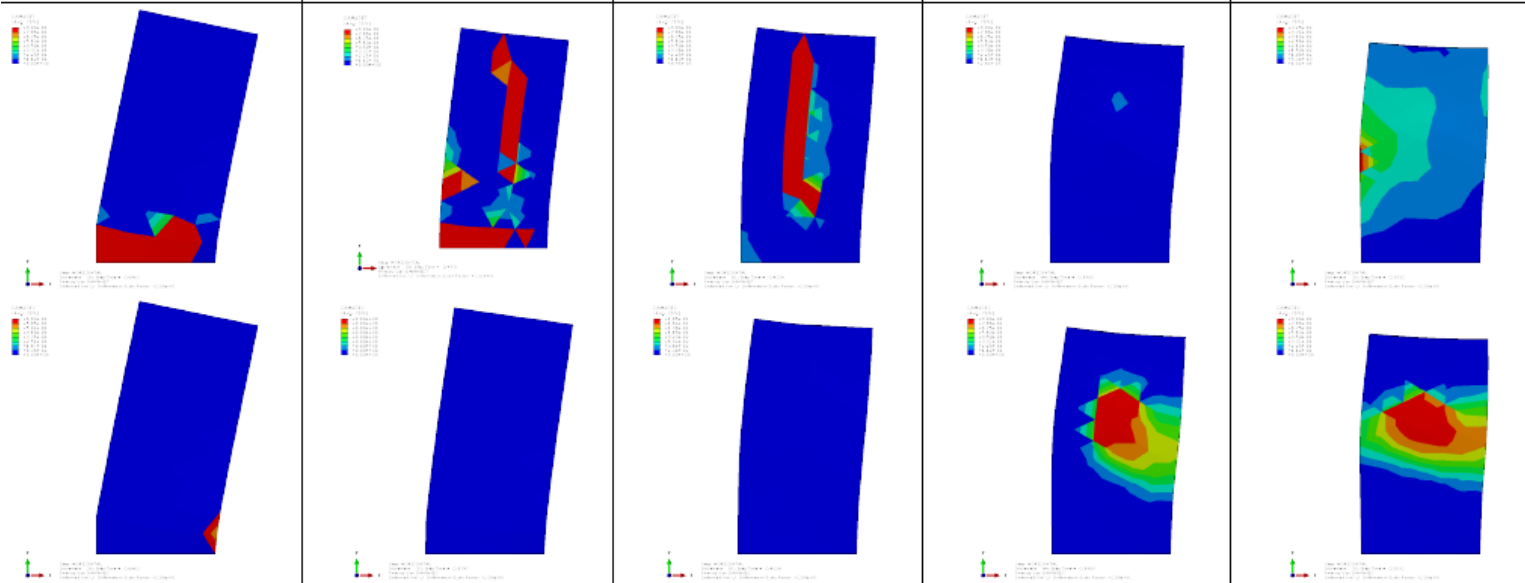
Liv. compr. 12%

Liv. compr. 18%

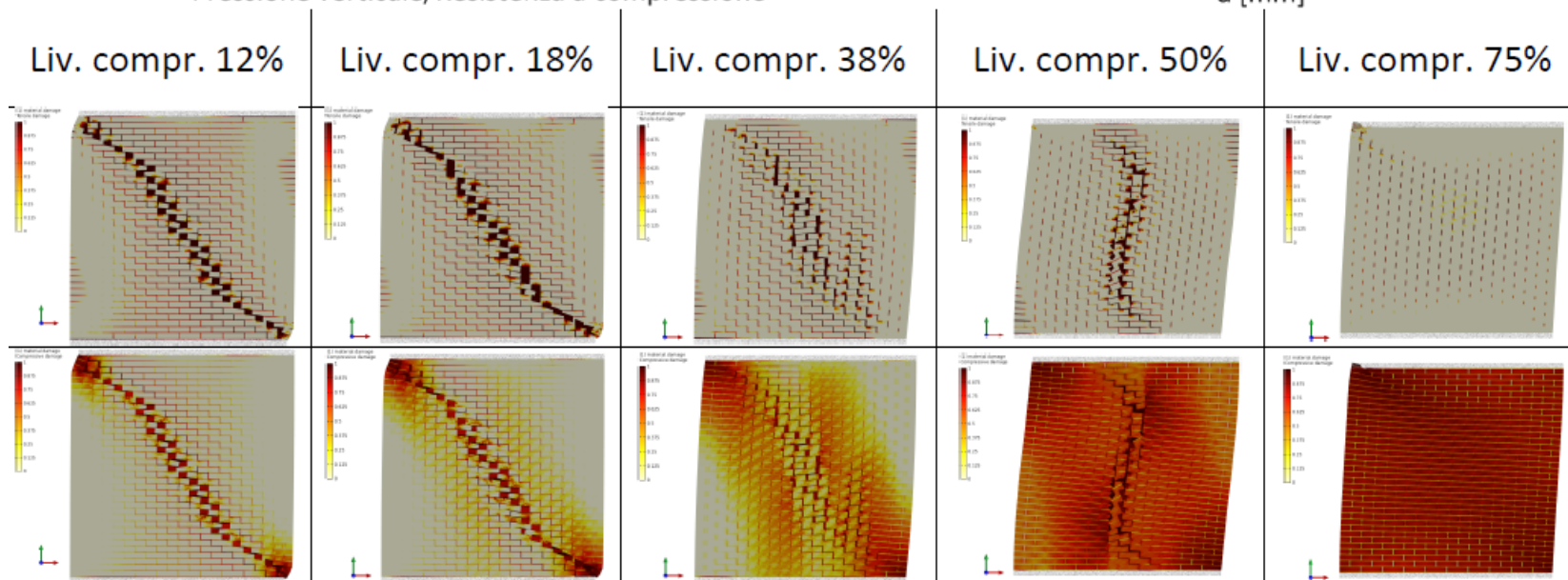
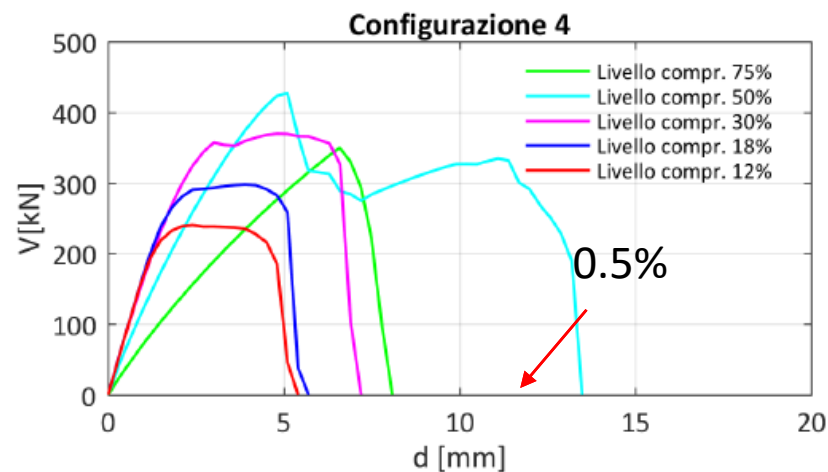
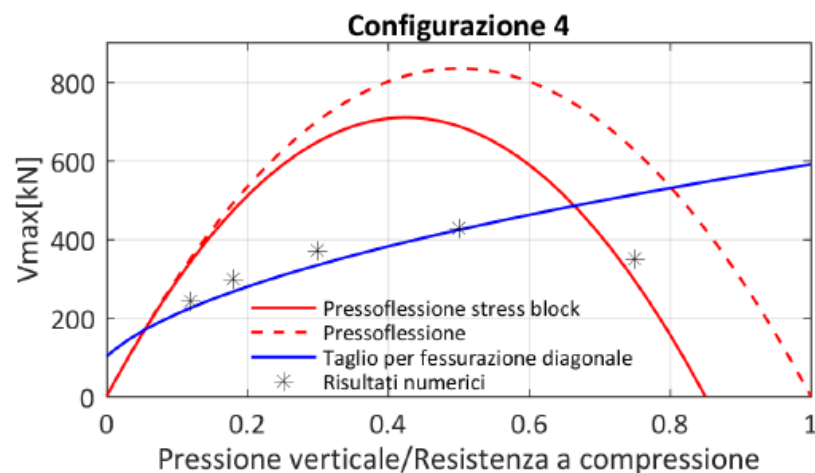
Liv. compr. 30%

Liv. compr. 50%

Liv. compr. 75%



ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI FEM AL CONTINUO



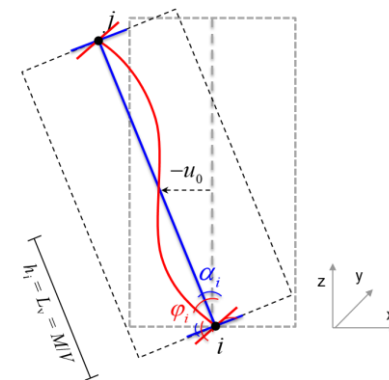
ASPETTI PECULIARI DEI MODELLI A TELAIO

I criteri delle grandezze di riferimento non sono cogenti: in particolare i che influiscono in modo determinante sul risultato.

Circolare NTC2018, lo spostamento SLC è valutato in base alla rotazione della corda [C8.7.1.13]:

- 1.0% per pressoflessione
- 0.5% per taglio

$$\theta_i = \left| \varphi_i - \frac{u_i - u_0}{h_i} \right|$$



CNR DT212/2013, drift suggeriti sulla base di diversi stati limite:

Tabella 3.2. Intervalli indicativi dei valori del drift e della resistenza residua per i diversi stati di danno.

danno	Drift (%)			Resistenza residua	
	3	4	5	3→4	4→5
pressoflessione	0.4 ÷ 0.8	0.8 ÷ 1.2	1.2 ÷ 1.8	1.0	0.8 ÷ 0.9
taglio	0.25 ÷ 0.4	0.4 ÷ 0.6	0.6 ÷ 0.9	0.6 ÷ 0.8	0.25 ÷ 0.6

← Maschio

Tabella 3.3 Intervalli indicativi del valore del drift e della resistenza residua per i diversi stati di danno.

danno	Drift (%)			Resistenza residua	
	3	4	5	3→4	4→5
Architrave senza catena/cordolo	0.40 ÷ 0.60	0.80 ÷ 1.20	1.80 ÷ 2.20	0.40 ÷ 0.60	
Architrave con catena/cordolo	0.80 ÷ 1.20	1.60 ÷ 2.00	2.40 ÷ 2.60	1.00	0.60 ÷ 0.80
Arco	0.15 ÷ 0.25	0.45 ÷ 0.75	1.20 ÷ 2.00	0.30 ÷ 0.50	
Arco con catena	0.20 ÷ 0.40	0.50 ÷ 0.80	1.40 ÷ 2.40	1.00	0.40 ÷ 0.60

Fascia →

GRUPPO DI LAVORO

Per l'esecuzione delle analisi e la redazione dei capitoli



UniGE (Università di Genova)

Responsabile Scientifico e Coordinatore dell'attività: Prof. S. Cattari
Collaboratori: S. Degli Abbatì, D. Ottonelli



UniPV (Università di Pavia)

Responsabile Scientifico e Coordinatore del WP10: Prof. G. Magenes
Collaboratori: C.F. Manzini, P. Morandi



UniCH (Università di Chieti-Pescara)

Responsabile Scientifico: Prof. G. Camata
Collaboratori: Prof. E. Spacone, C. Marano



UniCT-a (Università di Catania)

Responsabile Scientifico: Prof. I. Calì
Collaboratori: B. Pantò, F. Canizzaro, G. Occhipinti



UniNA-d (Università Federico II di Napoli)

Responsabile Scientifico: Prof. B. Calderoni
Collaboratori: A.E. Cordasco



UniBO (Università di Bologna)

Responsabile Scientifico: Prof. S. de Miranda
Collaboratori: G. Castellazzi, A.M. D'Altri



IUAV (Università di Venezia)

Responsabile Scientifico: Prof. A. Saetta
Collaboratori: L. Berto, A. Doria, D. Talledo



Per la revisione del documento

Prof. G. Milani (POLIMI - Politecnico di Milano)

GRAZIE PER L'ATTENZIONE