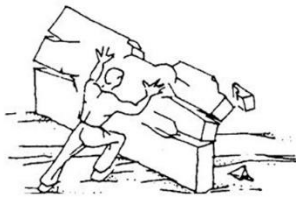


Sommario

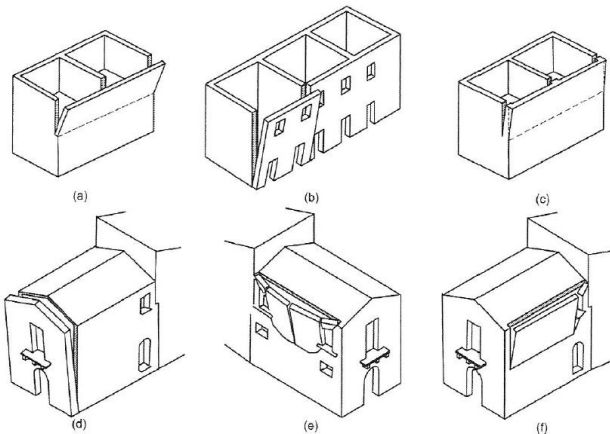
- ✓ **Introduzione**
- ✓ **Formulazione meccanica**
- ✓ **Validazione ed esempi**
- ✓ **Conclusioni**

Introduzione

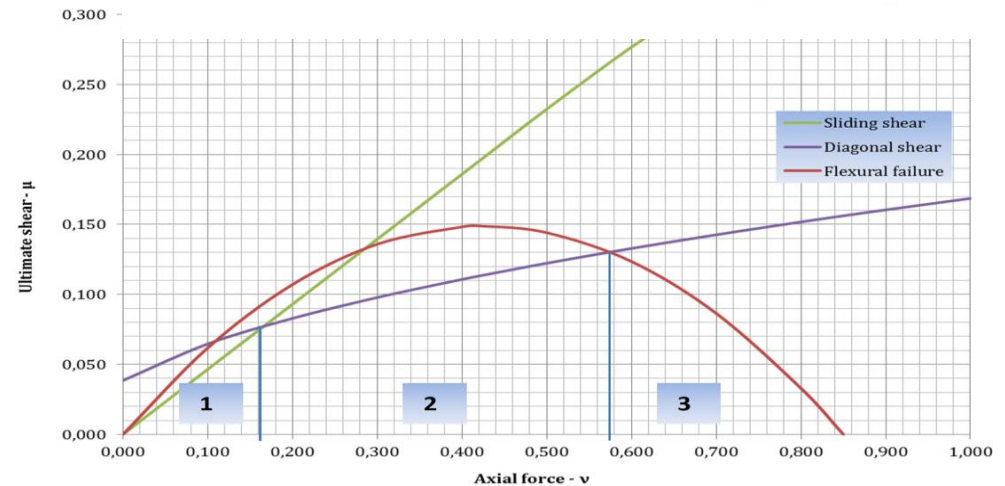
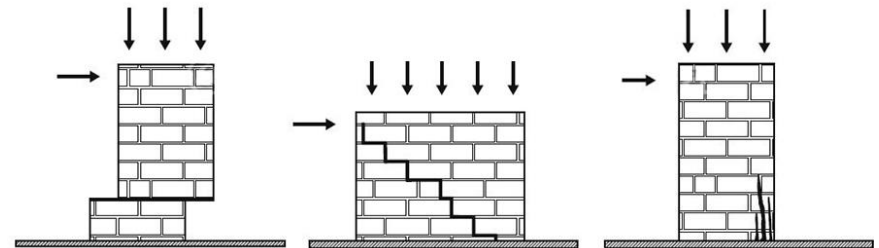
Meccanismi di crisi



- Meccanismi fuori piano
(I MODO)



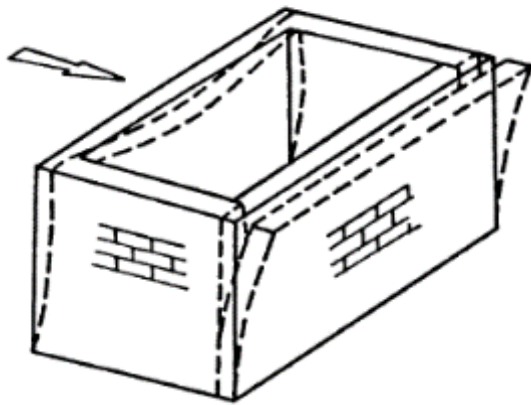
- Meccanismi nel piano
(II MODO)



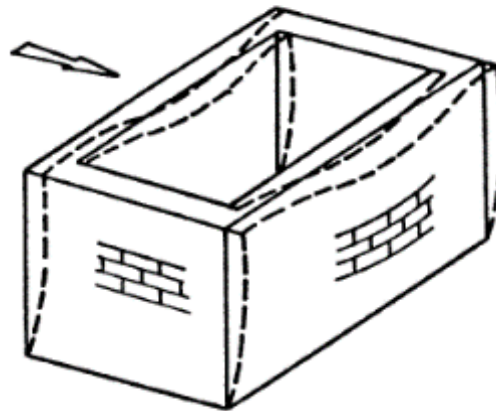


Introduzione

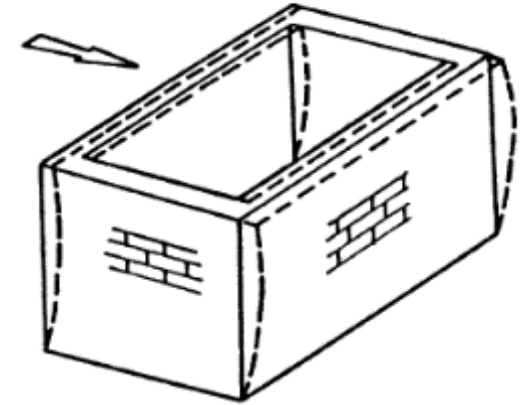
Meccanismi di crisi: il ruolo dell'impalcato



a) con solaio deformabile
e senza cordolo



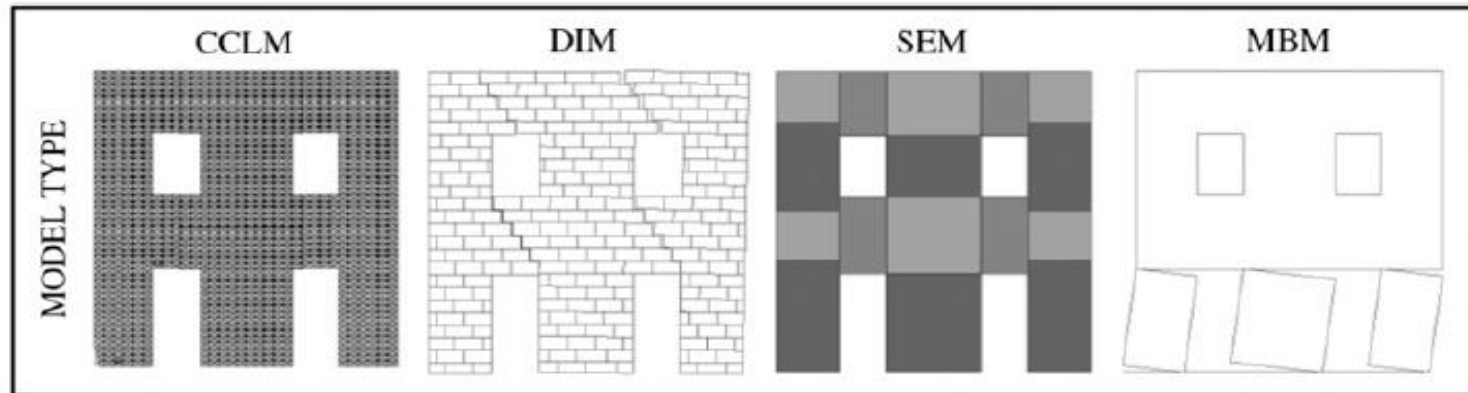
b) con cordolo e con
solaio deformabile



c) con cordolo e con
solaio rigido

Introduzione

Approcci alternativi per la modellazione



CCLM (Continuous Constitutive Law Models)

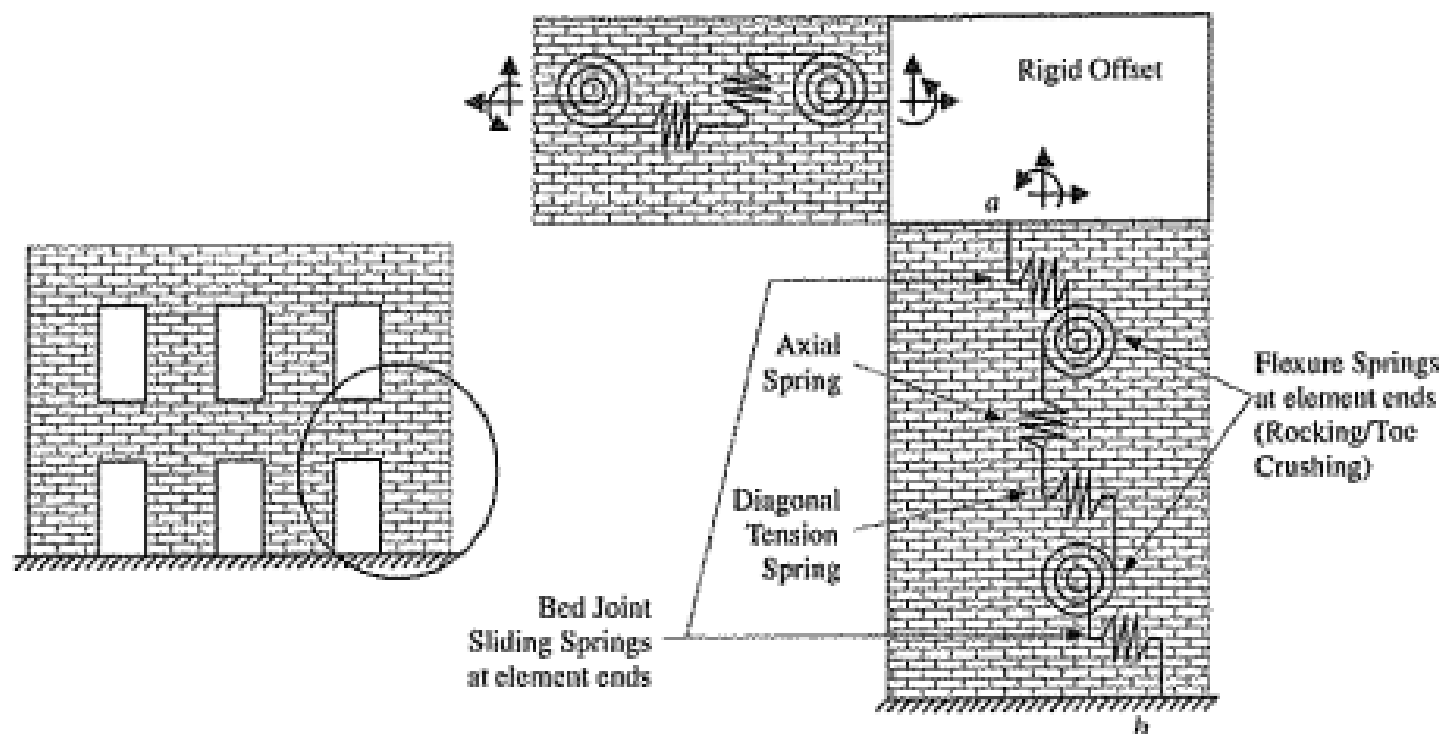
DIM (Discrete Interface Models)

SEM (Structural Elements Models)

MBM (Macro-Blocks Models)

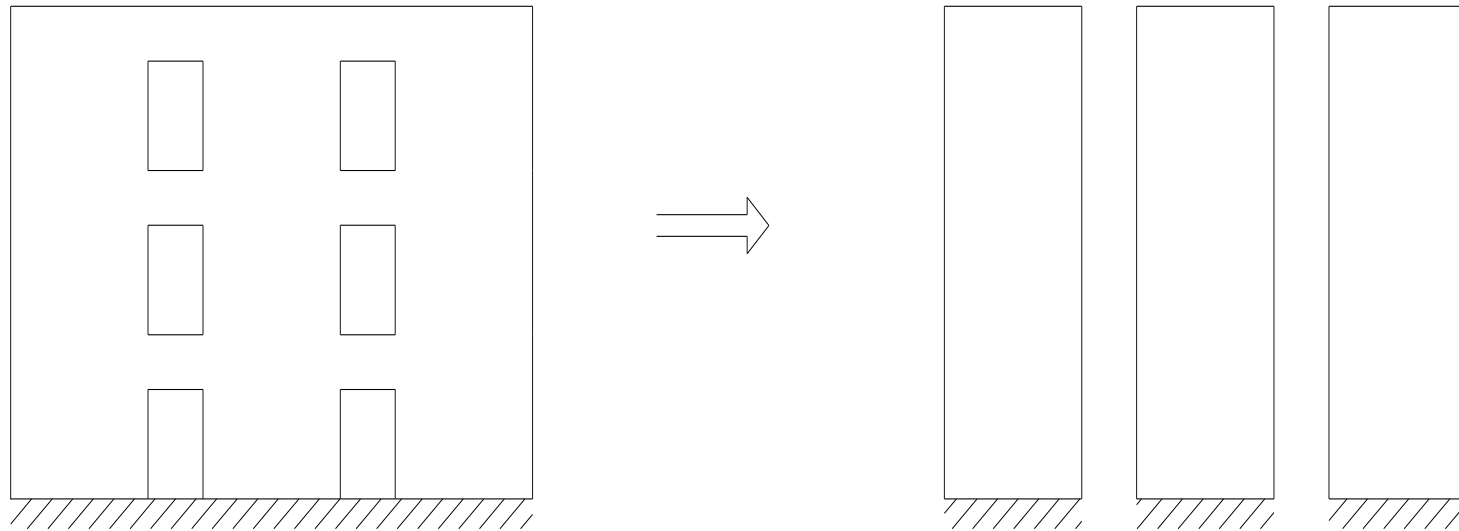
Introduzione

Approcci a macro-elementi



Introduzione

Approcci a macro-elementi: casi estremi

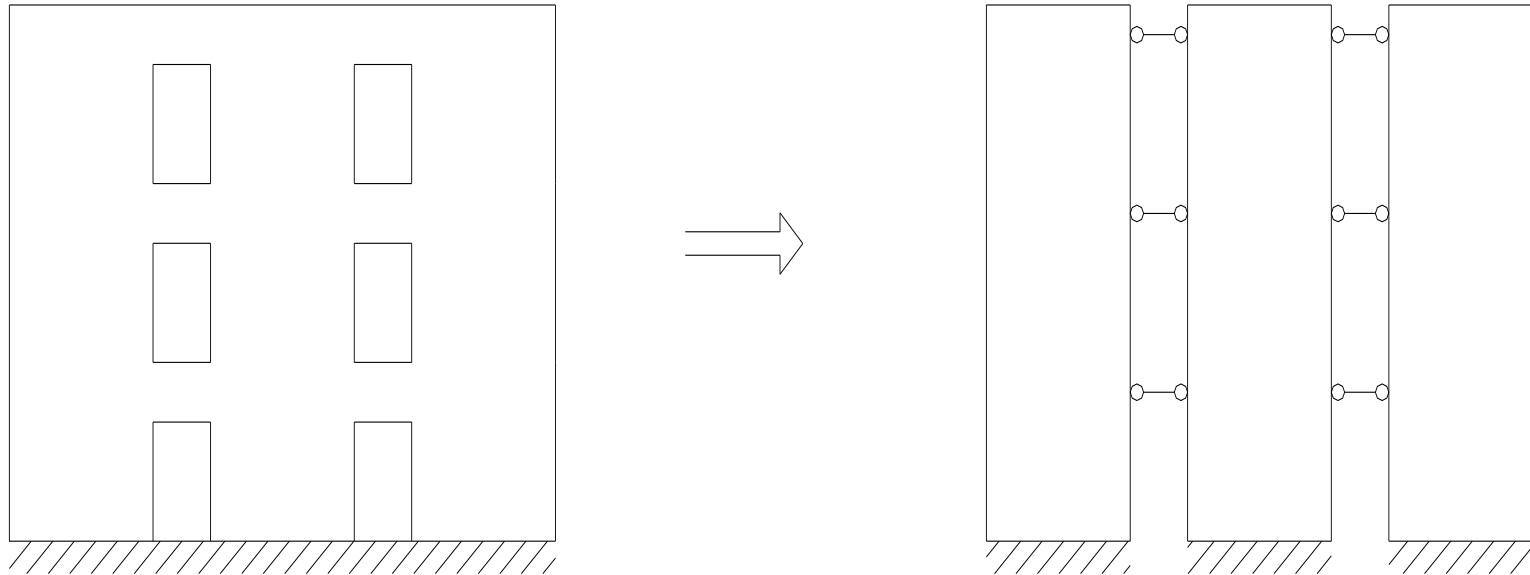


Rigidezza estensionale nulla

Rigidezza flessionale nulla

Introduzione

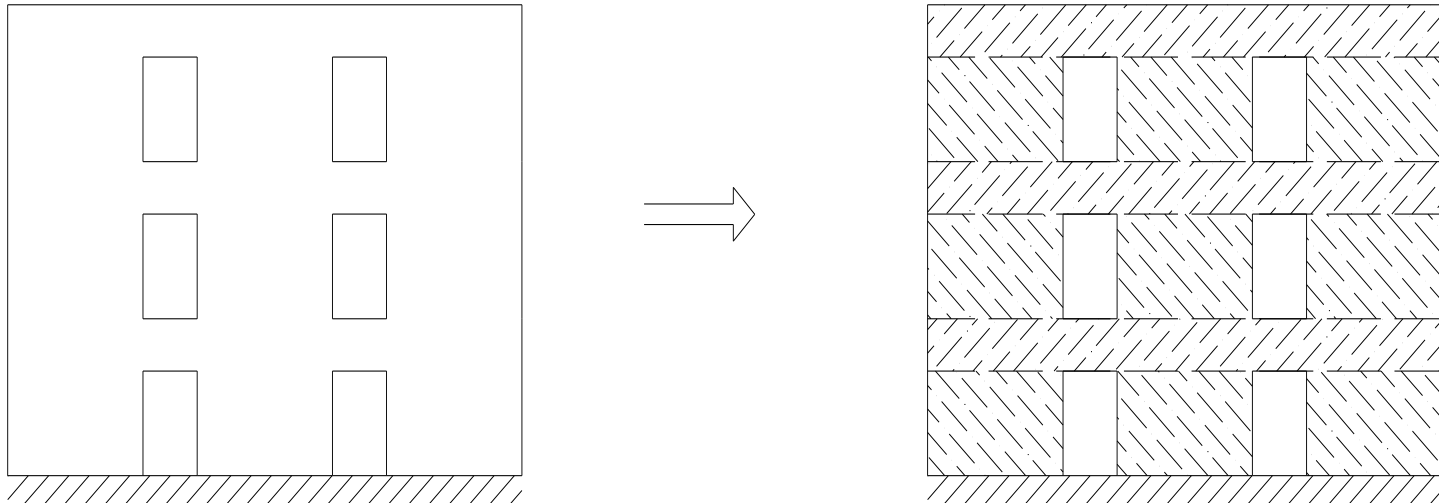
Approcci a macro-elementi: casi estremi



Rigidezza estensionale
Rigidezza flessionale nulla

Introduzione

Approcci a macro-elementi

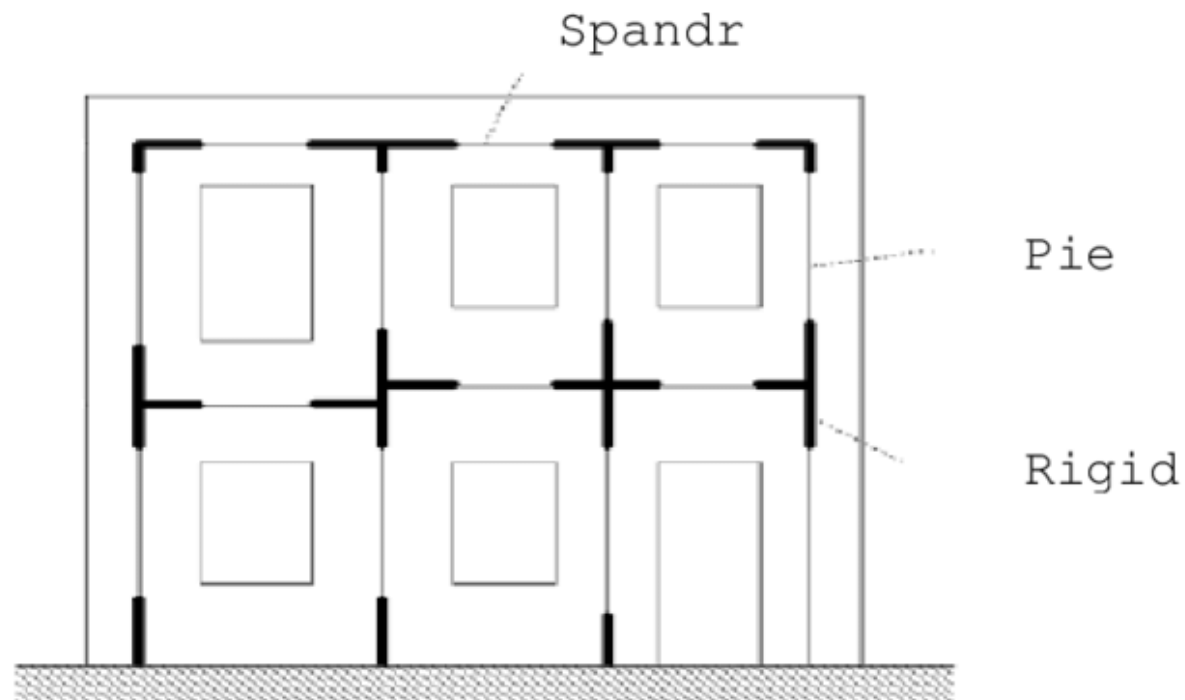


Rigidezza estensionale

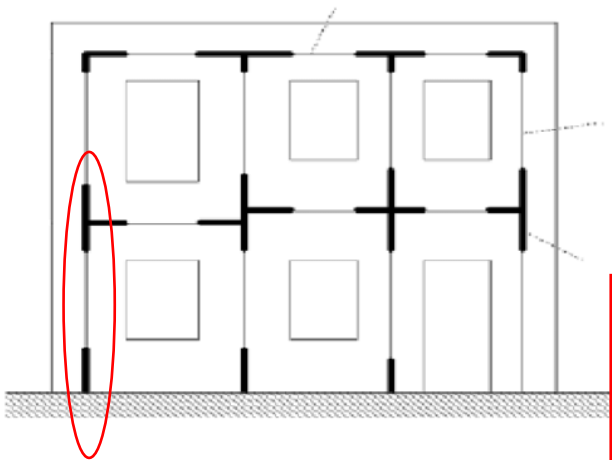
Rigidezza flessionale

Introduzione

Approcci a macro-elementi: telaio equivalente



Formulazione Elemento muratura

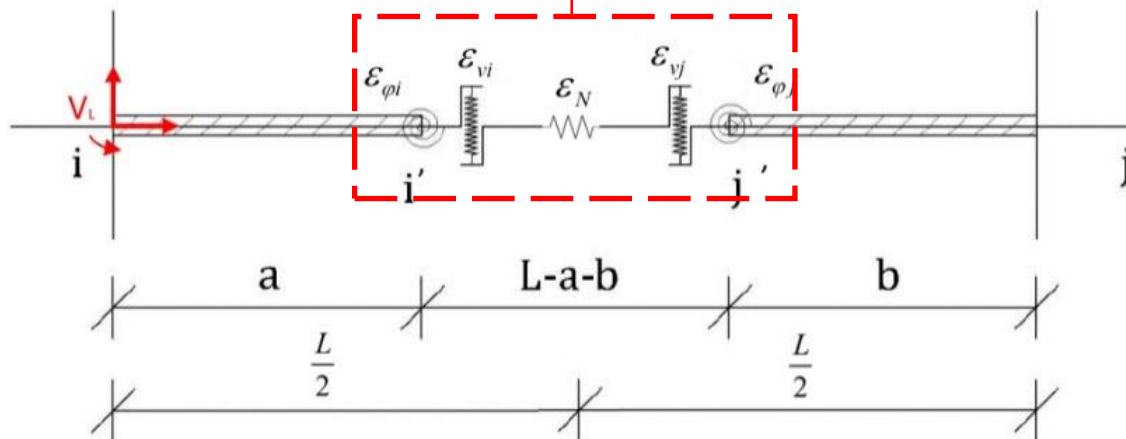


Coefficienti di deformabilità

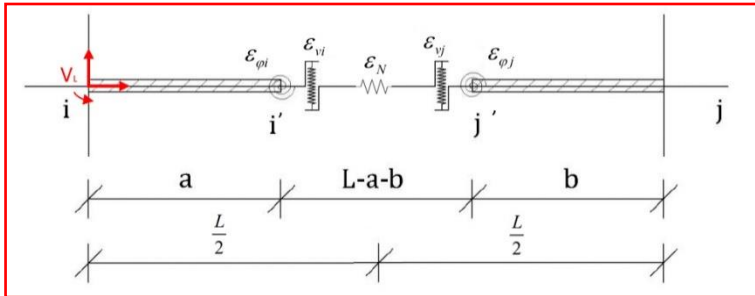
$$\alpha_{ij} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{3 \cdot EI} + \varepsilon_{\phi i} + \frac{\varepsilon_{vi} + \varepsilon_{vj}}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} + \frac{\chi}{GA \cdot [L \cdot (1 - r_i - r_j)]}$$

$$\alpha_{ji} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{3 \cdot EI} + \varepsilon_{\phi j} + \frac{\varepsilon_{vi} + \varepsilon_{vj}}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} + \frac{\chi}{GA \cdot [L \cdot (1 - r_i - r_j)]}$$

$$\beta_{ij} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{6 \cdot EI} + \frac{\varepsilon_{vi} + \varepsilon_{vj}}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} - \frac{\chi}{GA \cdot [L \cdot (1 - r_i - r_j)]}$$



Formulazione Elemento muratura



Coefficienti di deformabilità

$$\alpha_{ij} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{3 \cdot EI} + \varepsilon_{\phi i} + \frac{\varepsilon_{vi} + \varepsilon_{vj}}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} + \frac{\chi}{GA \cdot [L \cdot (1 - r_i - r_j)]}$$

$$\alpha_{ji} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{3 \cdot EI} + \varepsilon_{\phi j} + \frac{\varepsilon_{vi} + \varepsilon_{vj}}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} + \frac{\chi}{GA \cdot [L \cdot (1 - r_i - r_j)]}$$

$$\beta_{ij} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{6 \cdot EI} + \frac{\varepsilon_{vi} + \varepsilon_{vj}}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} - \frac{\chi}{GA \cdot [L \cdot (1 - r_i - r_j)]}$$

Matrice di trasformazione

$$W_{ij} = \frac{\alpha_{ji}}{\alpha_{ij} \cdot \alpha_{ji} - \beta_{ij}^2}$$

$$V_{ij} = \frac{\beta_{ij}}{\alpha_{ij} \cdot \alpha_{ji} - \beta_{ij}^2}$$

$$U_{ij} = \frac{W_{ij} + U_{ji}}{L}$$

$$\underline{v'} = \begin{bmatrix} u'_i \\ v'_i \\ \varphi'_i \\ u'_j \\ v'_j \\ \varphi'_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & r_i \cdot L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -r_j \cdot L \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ \varphi_i \\ u_j \\ v_j \\ \varphi_j \end{bmatrix}$$

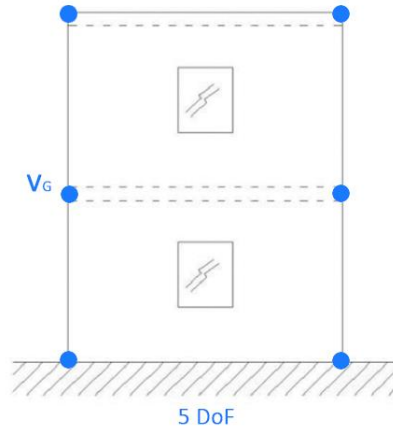
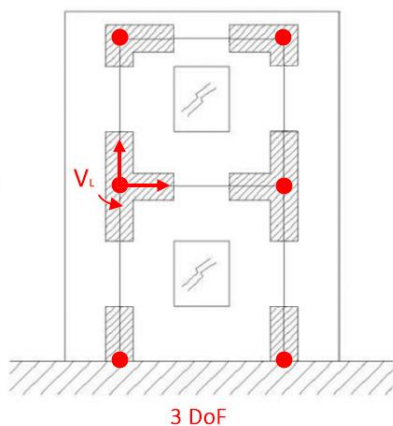
$$\underline{f'} = \underline{\underline{K'}} \cdot \underline{v'} + \underline{f'_0}$$

$$\underline{v'} = \underline{\underline{T}} \cdot \underline{v}$$

$$\underline{\underline{F}} = \underline{\underline{K}} \cdot \underline{s} + \underline{F_0}$$

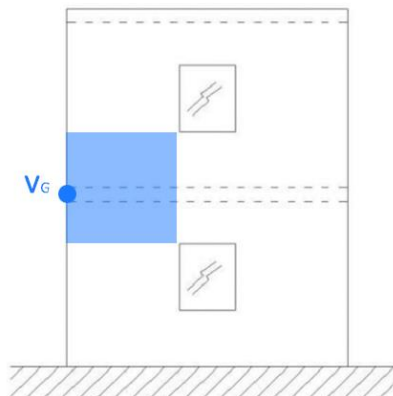
Formulazione

Assemblaggio della parete 2D e della strutture 3D

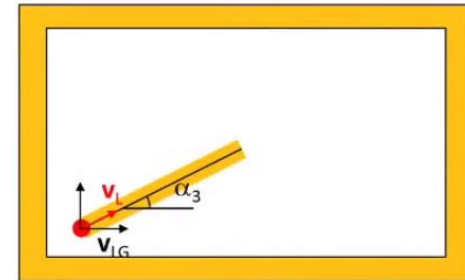


$$\underline{F} = \underline{\underline{K}} \cdot \underline{s} + \underline{F}_0$$

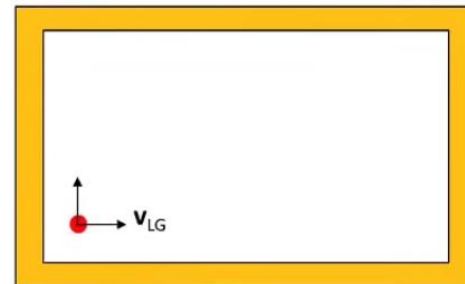
$$\underline{s} = \underline{\underline{K}}^{-1} \cdot (\underline{F} - \underline{F}_0)$$



$$\underline{v}_{LG} = \underline{LG}_2 \underline{v}_G$$



$$\underline{v}_L = \underline{LG}_1 \underline{v}_{LG}$$

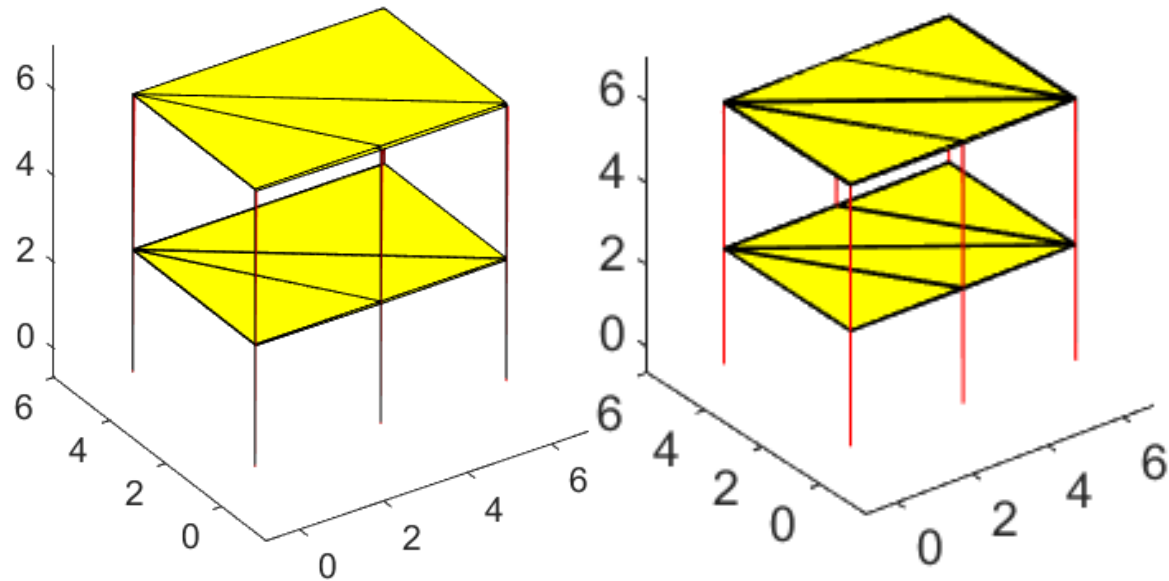
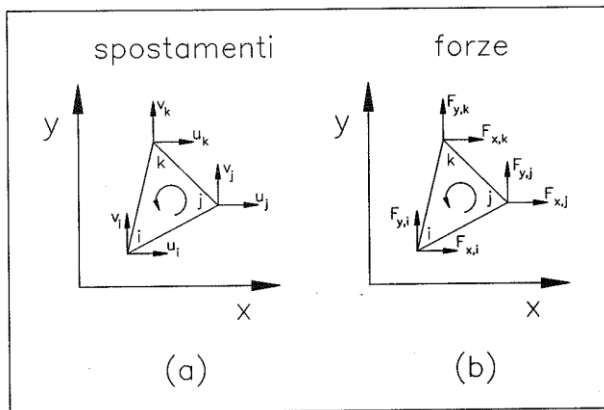


Formulazione

Impalcati: elementi membrana elastica lineare (ortotropa)

$$\mathbf{F}_M = \mathbf{K}_M \mathbf{s}_M$$

$$\mathbf{F}_M = \begin{bmatrix} F_{x,i} \\ F_{y,i} \\ F_{x,j} \\ F_{y,j} \\ F_{x,k} \\ F_{y,k} \end{bmatrix} \quad \mathbf{s}_M = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_k \\ v_k \end{bmatrix}$$

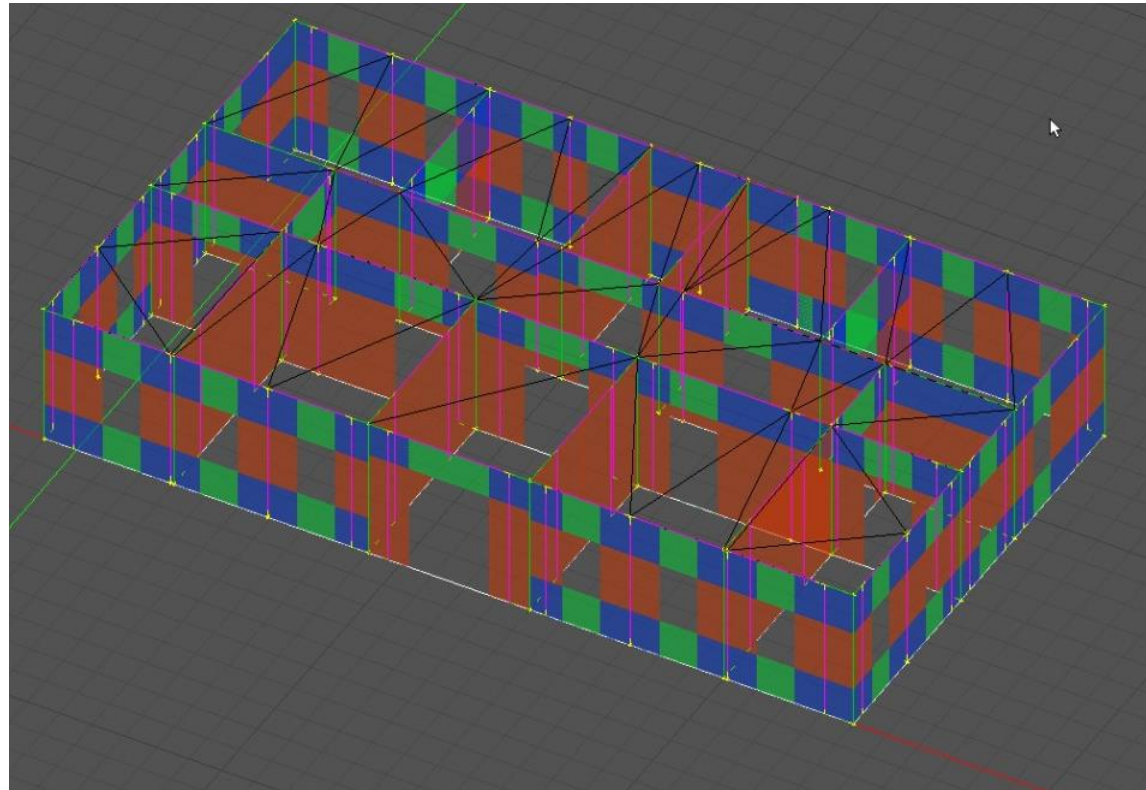
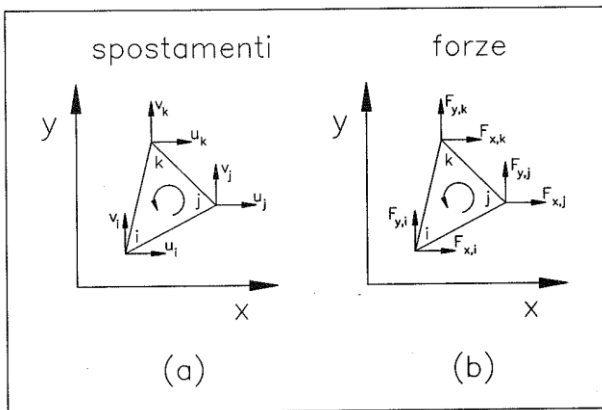


Formulazione

Impalcati: elementi membrana elastica lineare (ortotropa)

$$\mathbf{F}_M = \mathbf{K}_M \mathbf{s}_M$$

$$\mathbf{F}_M = \begin{bmatrix} F_{x,i} \\ F_{y,i} \\ F_{x,j} \\ F_{y,j} \\ F_{x,k} \\ F_{y,k} \end{bmatrix} \quad \mathbf{s}_M = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_k \\ v_k \end{bmatrix}$$



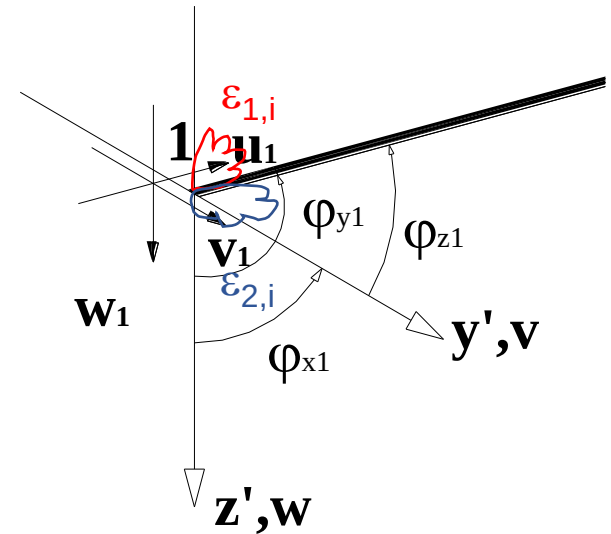
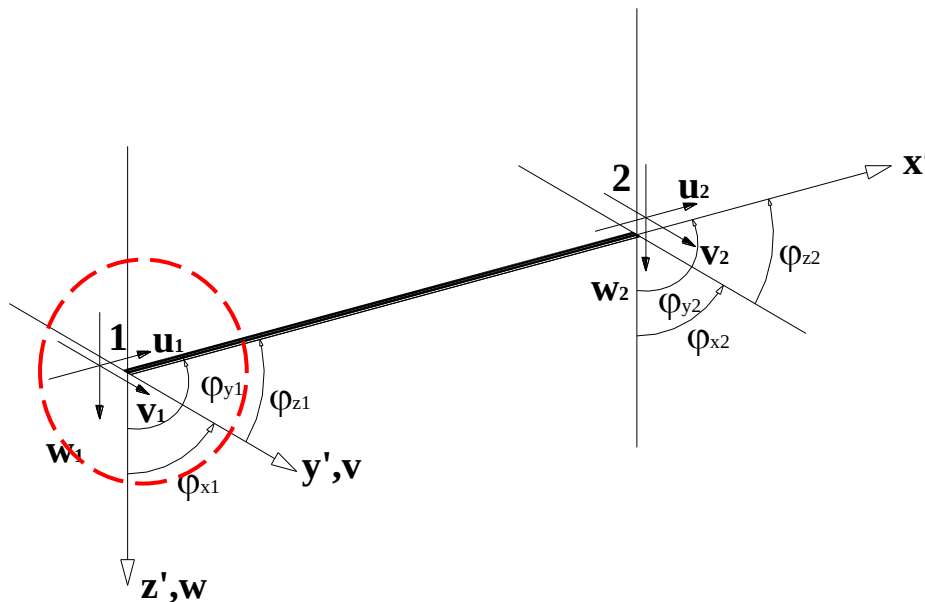
Formulazione

Elementi asta non lineare (elementi in c.a.)

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{K}_A \mathbf{s}_A + \mathbf{F}_{0,A}$$

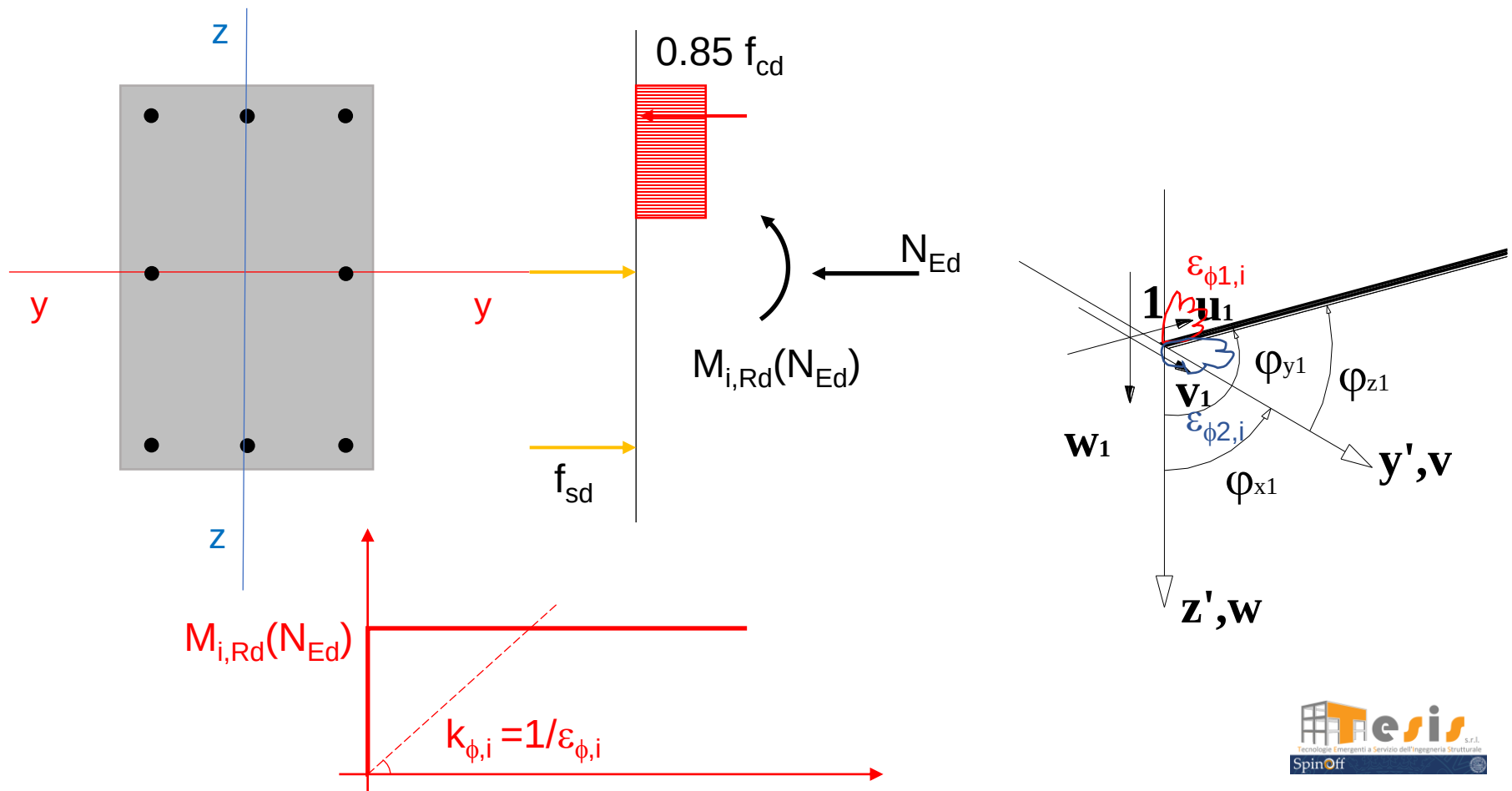
$$\mathbf{s}_A = ((u_1, v_1, w_1, \varphi_{x1}, \varphi_{y1}, \varphi_{z1}), (u_2, v_2, w_2, \varphi_{x2}, \varphi_{y2}, \varphi_{z2}))^T$$

$$\mathbf{F}_A = ((N_1, T_{y1}, T_{z1}, M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}), (N_2, T_{y2}, T_{z2}, M_{x2}, M_{y2}, M_{z2}))^T$$



Formulazione

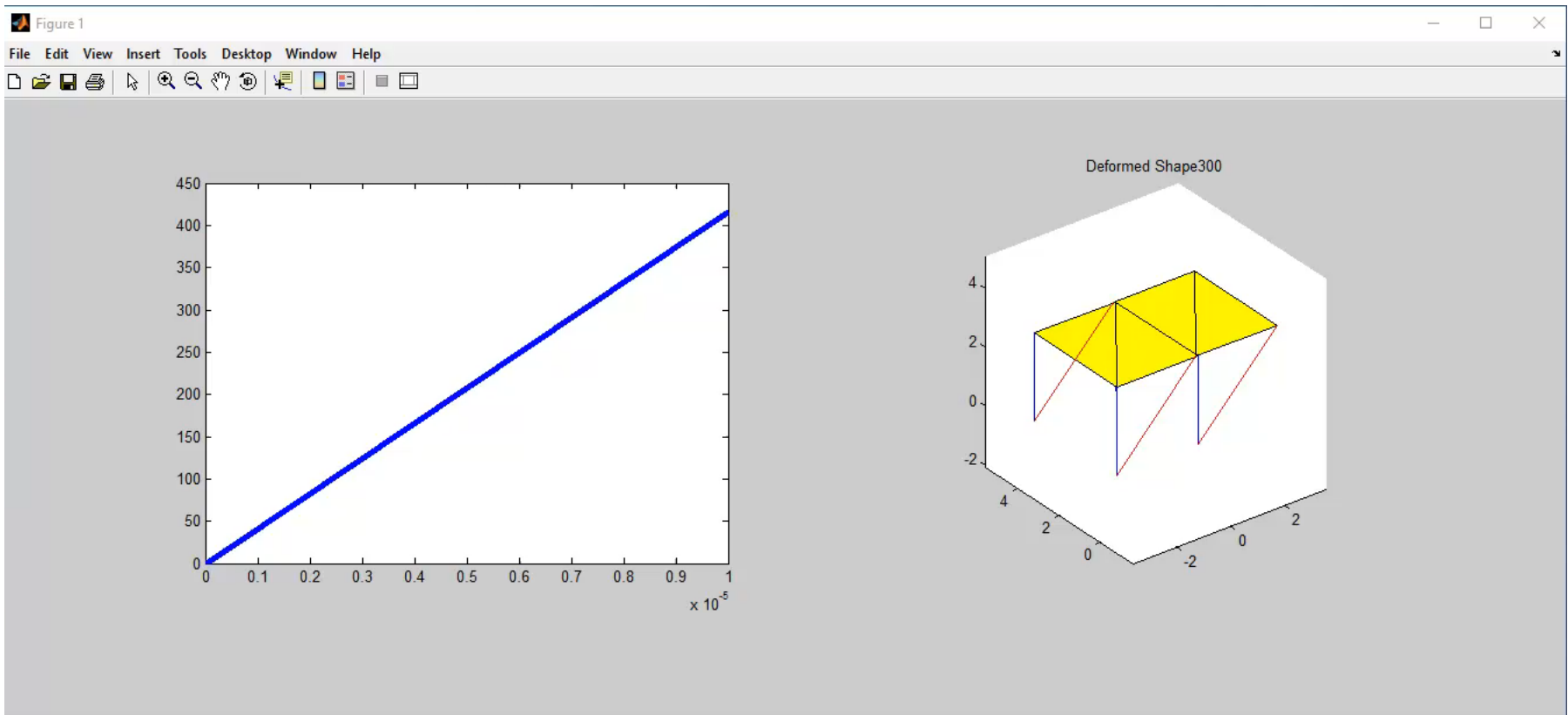
Elementi asta non lineare (elementi in c.a.)





Formulazione

Elementi asta non lineare (elementi in c.a.)



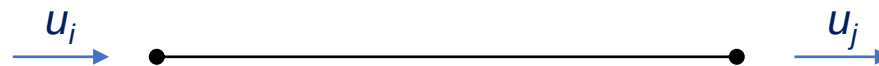
Formulazione

Elementi tirante elastici

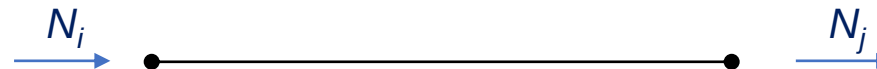
$$\mathbf{F}_T = \mathbf{K}_T \mathbf{s}_T + \mathbf{F}_{0,T} \quad \text{Presollecitazione}$$

$$\mathbf{F}_T = \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \end{bmatrix} \quad \mathbf{s}_T = \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix}$$

Spostamenti

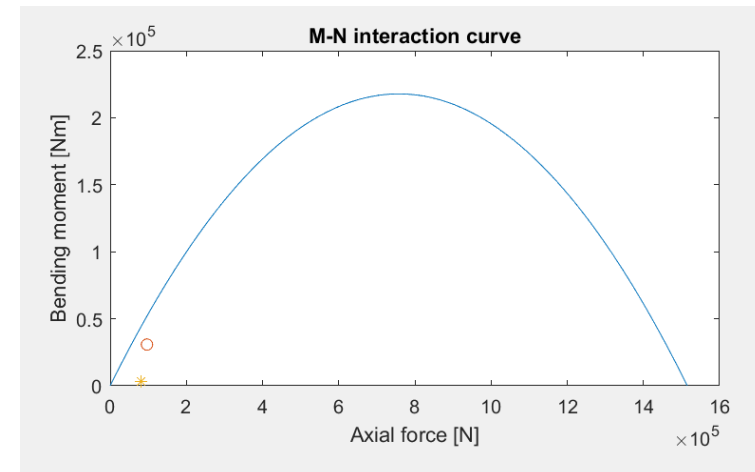
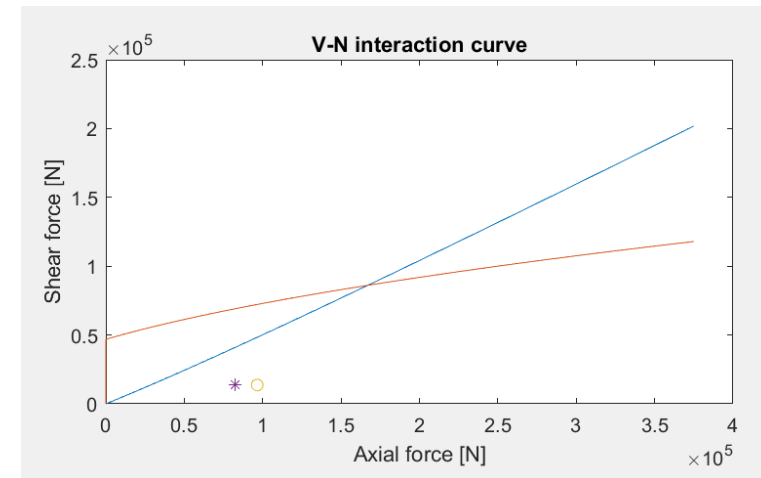
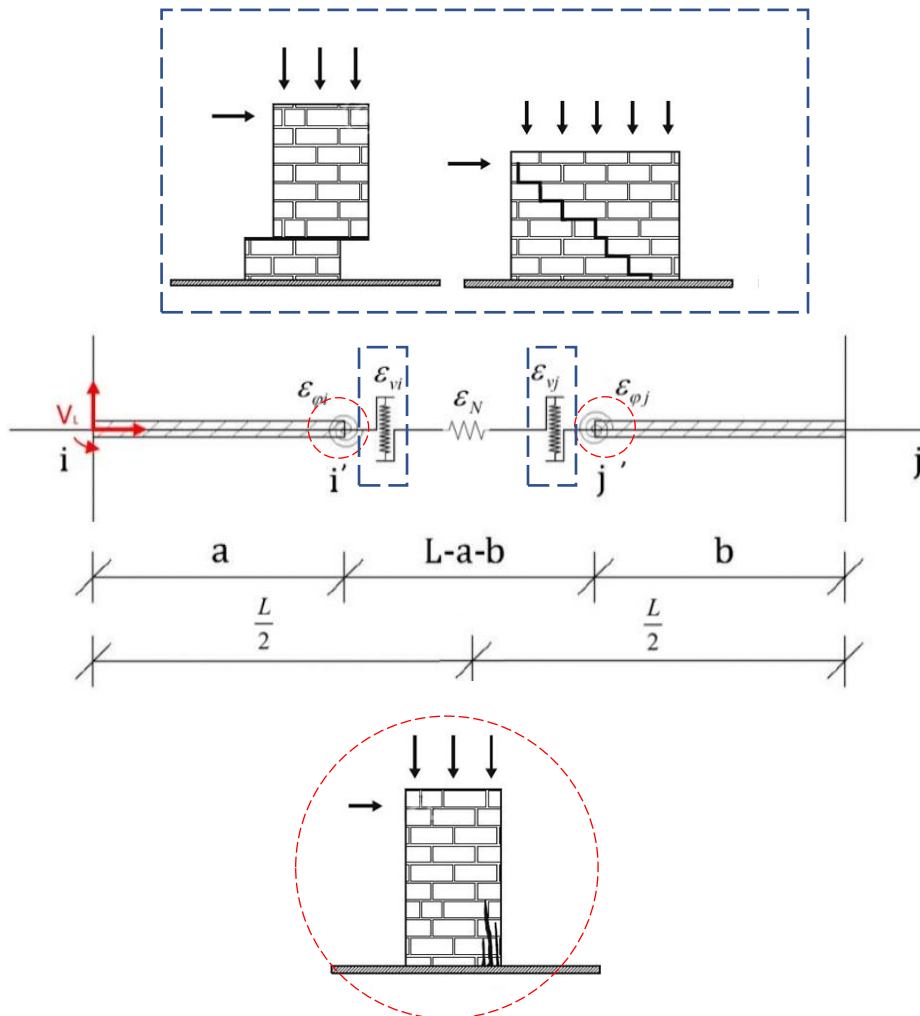


Forze



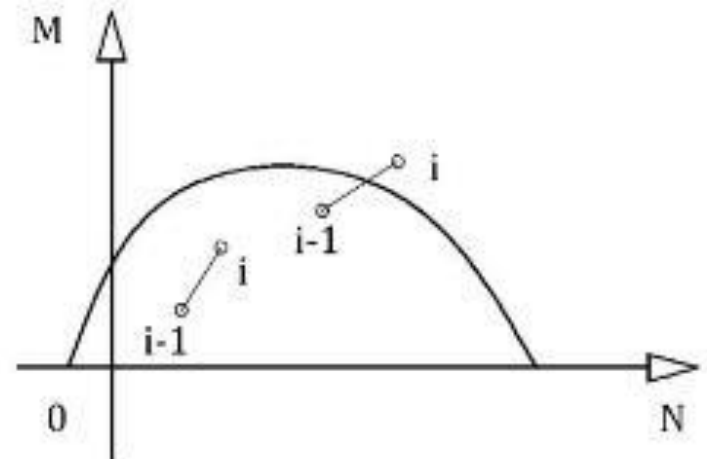
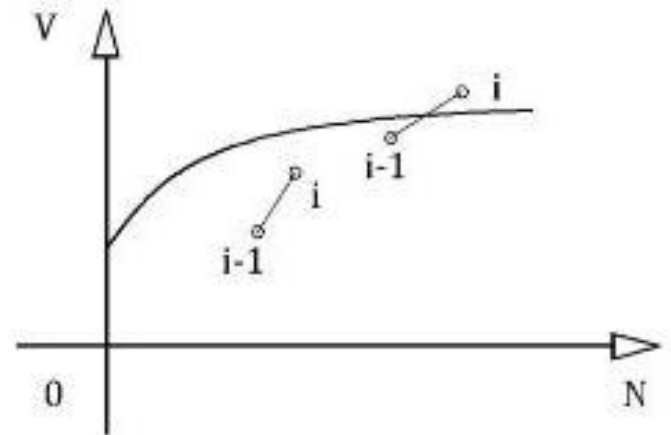
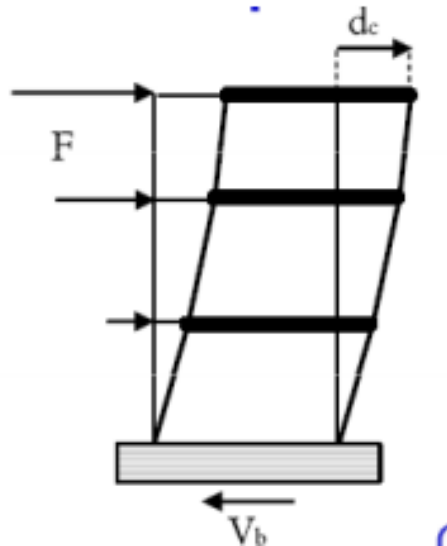
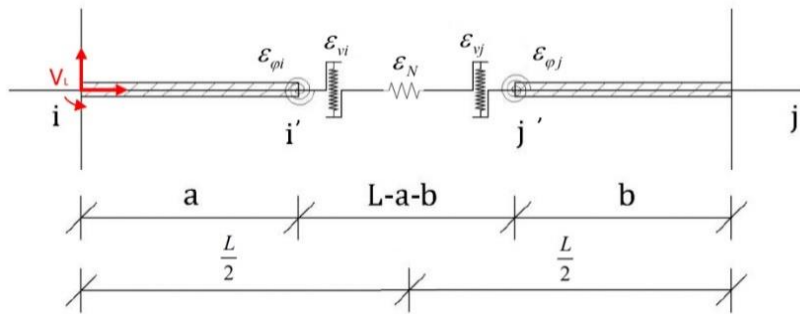
Formulazione

Analisi incrementale non-lineare



Formulazione

Analisi incrementale non-lineare



Formulazione

Analisi incrementale non-lineare: meccanismi di crisi

M.II.TT. (2018), NTC 2018, D.M. 17.01.2018



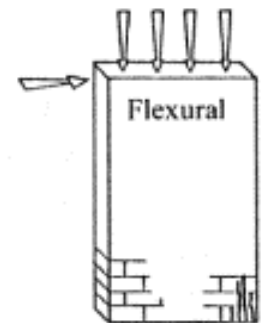
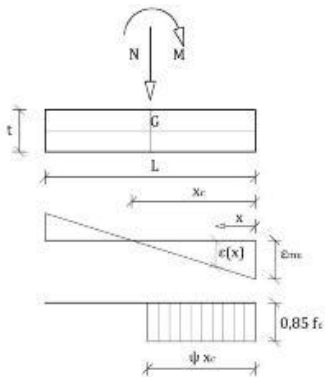
$$M_u = \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot t \cdot L^2 \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{0,85 \cdot f_c} \right)$$

$$V_f = \frac{2 \cdot M_u}{h}$$

$$\delta_u = 0.010 \cdot h$$

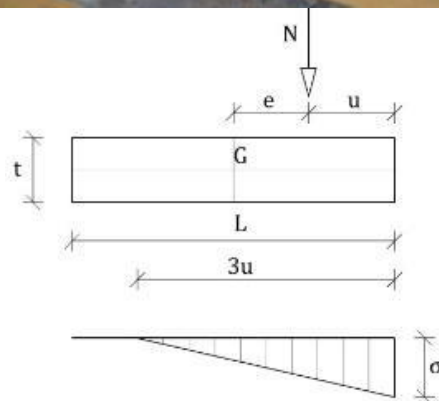
$$\nu > 0.2$$

$$\delta_u = 0.0125 (1 - \nu)$$



Formulazione

Analisi incrementale non-lineare: meccanismi di crisi

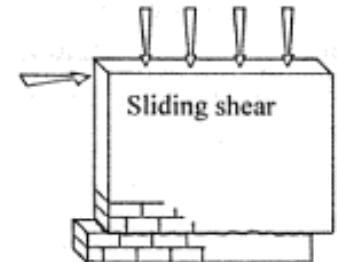


$$f_{vd} = f_{vd0} + \mu \cdot \sigma' \quad \sigma' = \frac{N}{t \cdot D'}$$

$$\text{se: } e < L / 6 \quad D' = L$$

$$\text{se: } e > L / 6 \quad D' = 3u = 3 \cdot \left(\frac{L}{2} - e \right)$$

$$\delta_u = 0.005 \cdot h$$





Formulazione

Analisi incrementale non-lineare: meccanismi di crisi

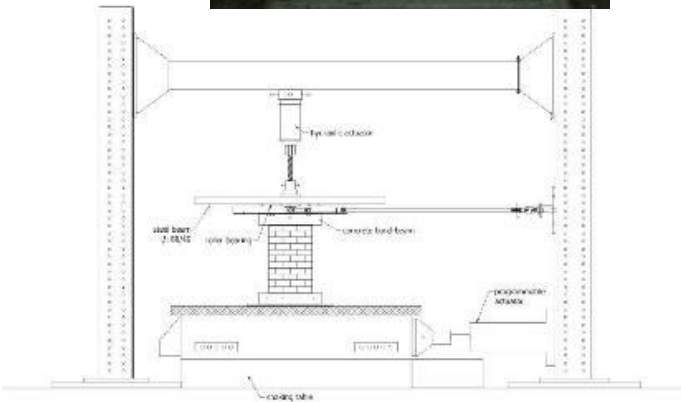
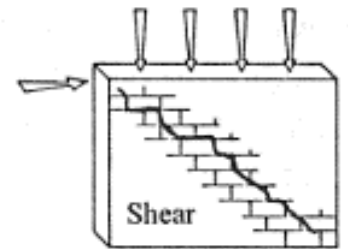


$$b = \frac{h}{L}$$

$$\sigma = \frac{N}{L \cdot t}$$

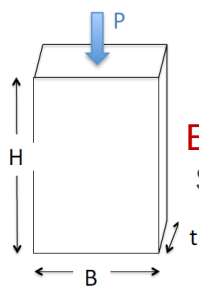
$$V_{ds} = L \cdot t \cdot \frac{1,5 \cdot \tau_{0,d}}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma}{1,5 \cdot \tau_{0,d}}}$$

$$\delta_u = 0.005 \cdot h$$

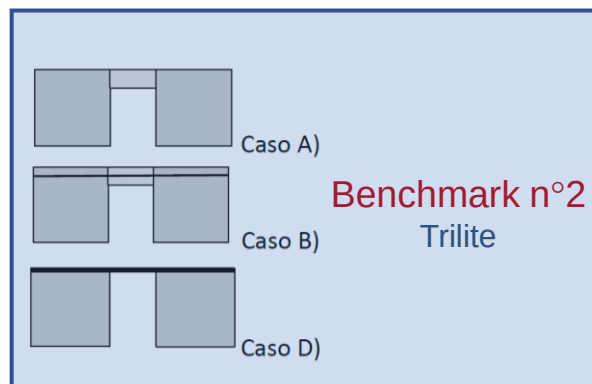


Validazione

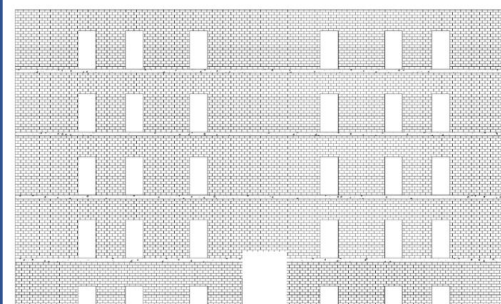
Strutture benchmark



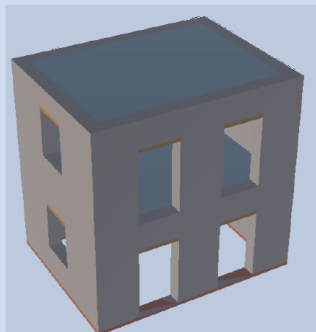
Benchmark n°1
Singolo pannello



Benchmark n°2
Trilite



Benchmark n°3
Parete 2D



Benchmark n°4
Edificio monocellula bipiano



Benchmark n°5
Edificio complesso

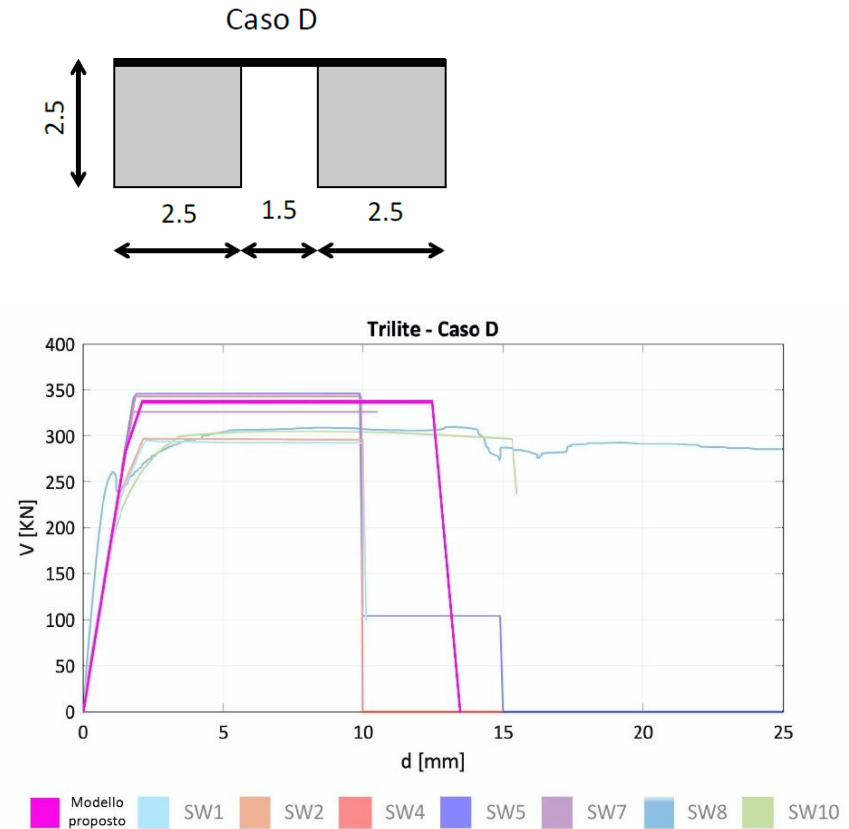
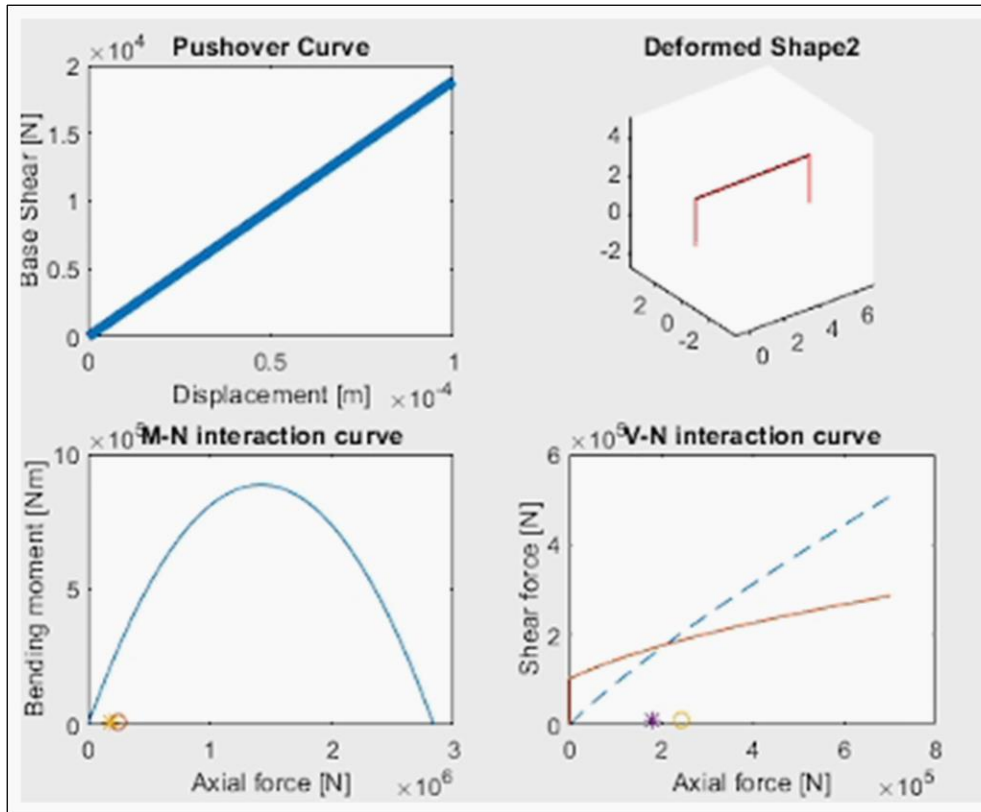


Rete dei Laboratori Universitari
di Ingegneria Sismica e Strutturale



Validazione

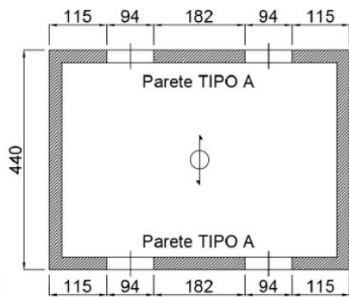
Strutture benchmark: edificio bipiano (#2)



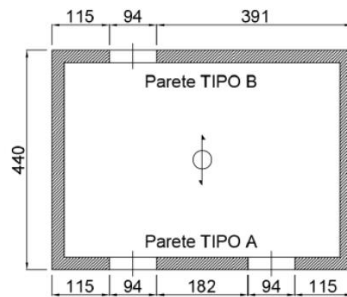
Validazione

Strutture benchmark: edificio bipiano (#4)

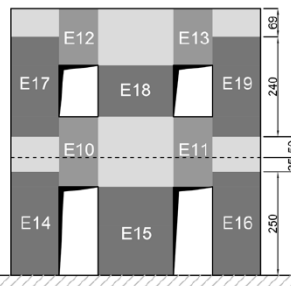
Configurazione I



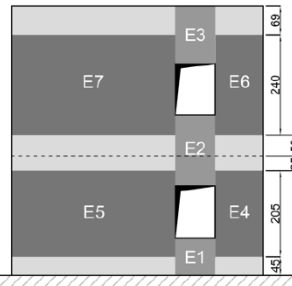
Configurazione II



Parete di Tipo A

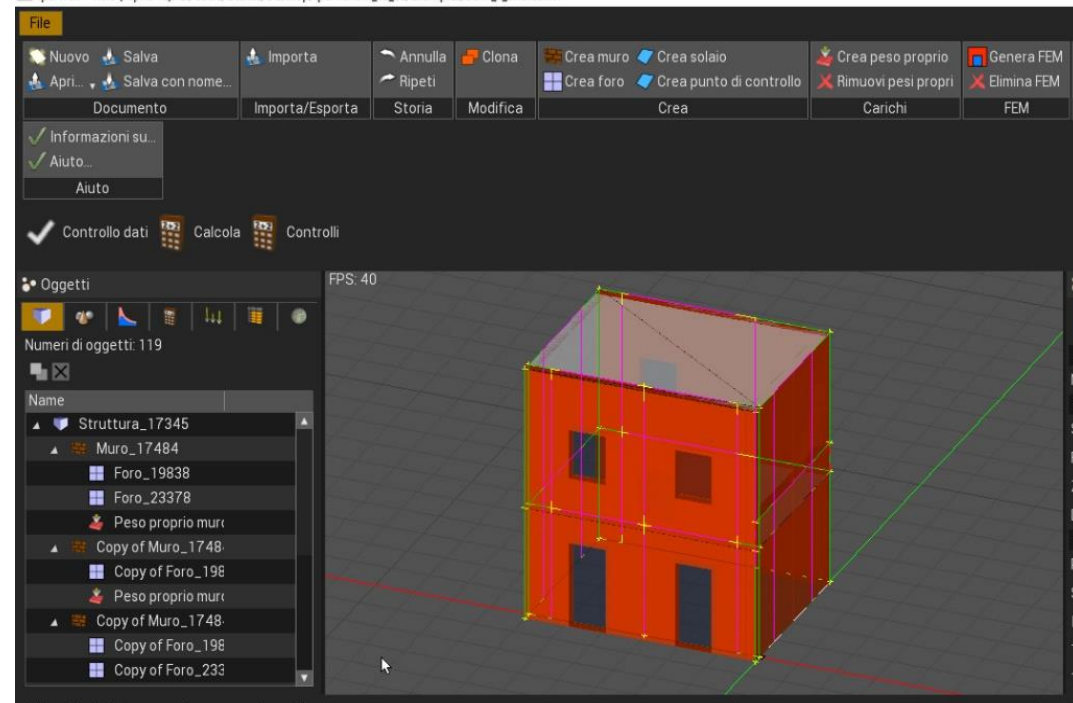


Parete di Tipo B



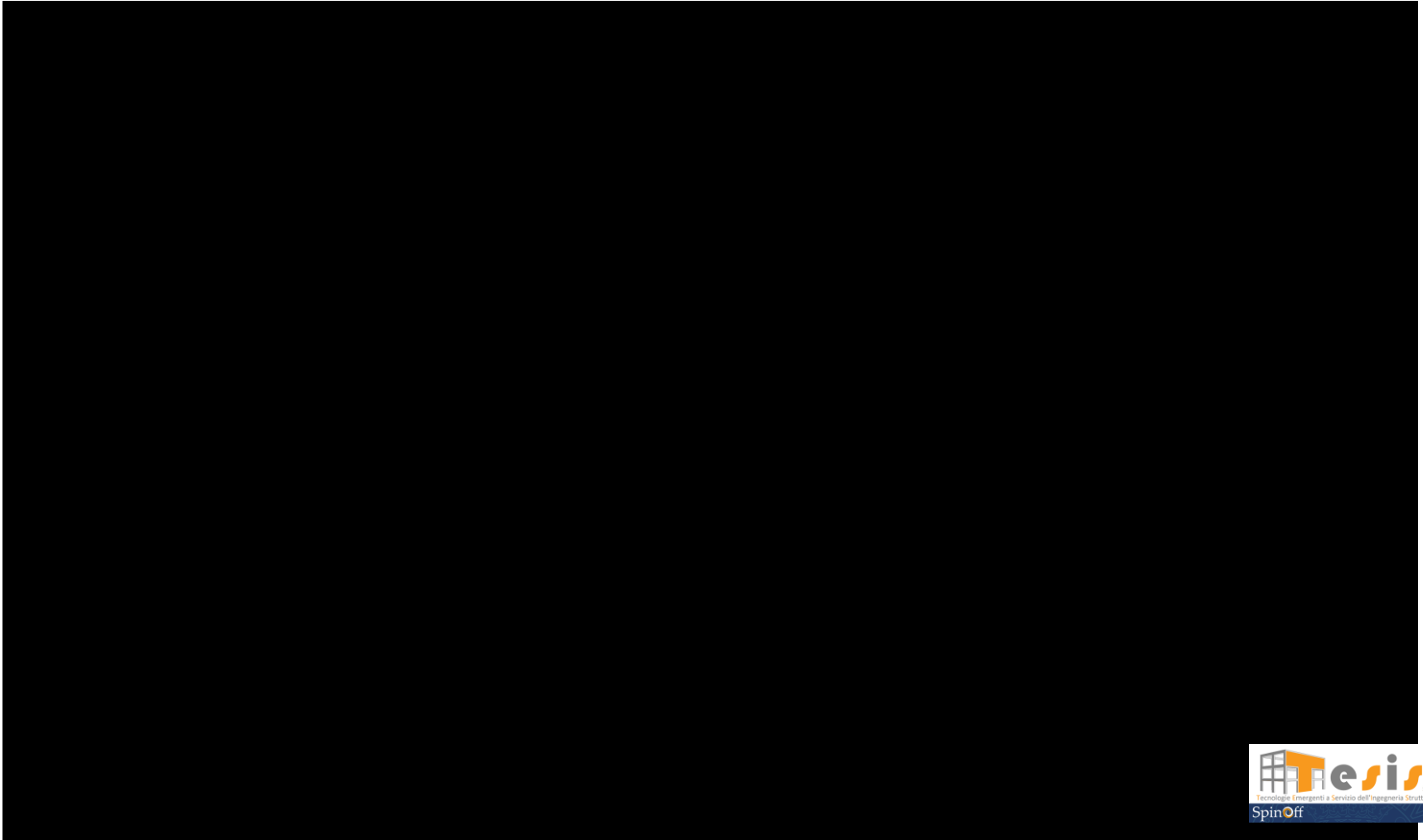
□ NODI ■ MASCHI ■ FASCE

IperWall - 1.0.0 (Alpha 18): C:/Users/Utente/Desktop/iperwallbin_18_08/examples/Ben4_II_andrea.iwf



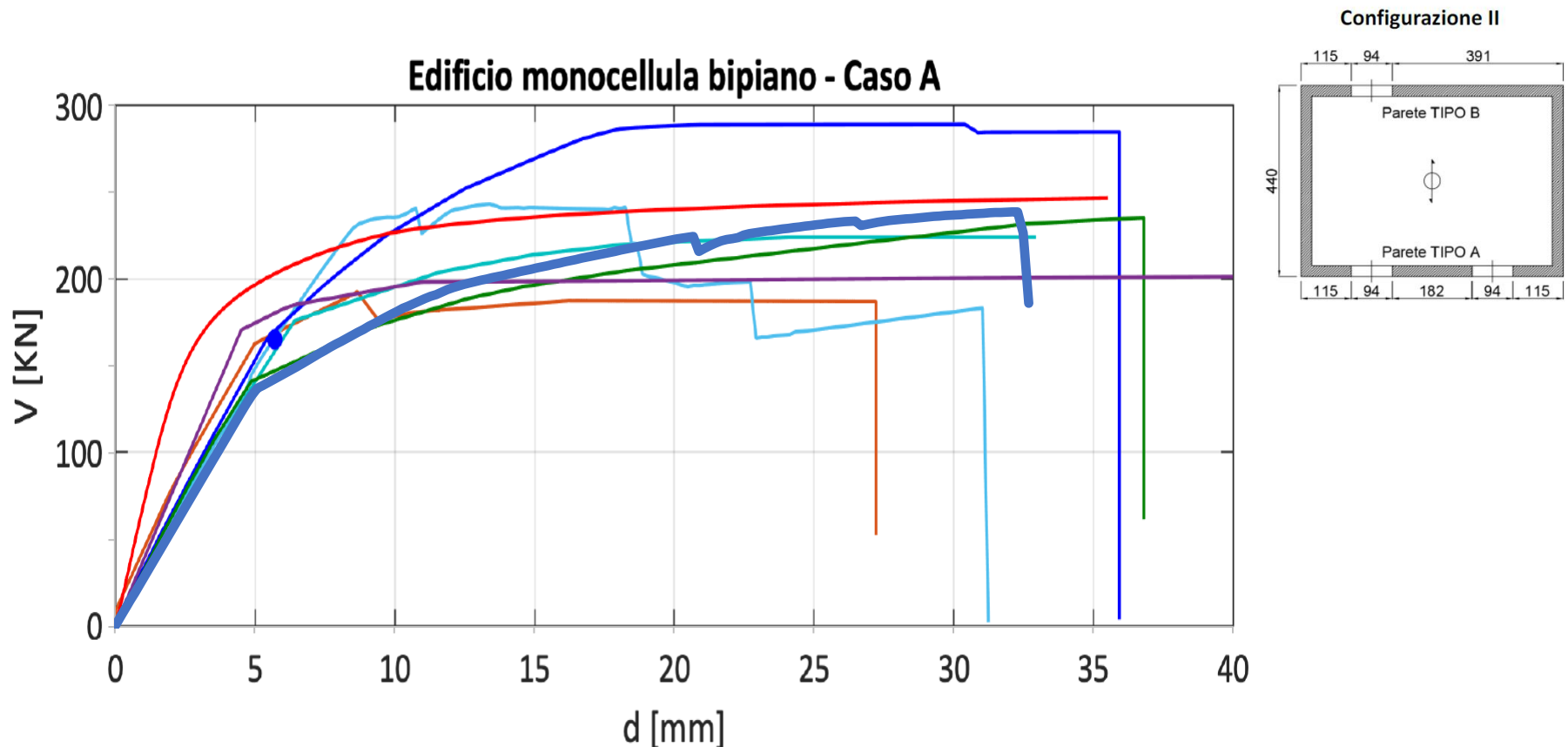
Validazione

Strutture benchmark: edificio bipiano (#4)



Validazione

Strutture benchmark: edificio bipiano (#4) – Config. II



Validazione

Strutture benchmark: edificio bipiano (#4) – Config. II

7.8.2.2.4 Travi in muratura

La verifica di travi di accoppiamento in muratura ordinaria, in presenza di azione assiale orizzontale nota, viene effettuata in analogia a quanto previsto per i pannelli murari verticali. Qualora l'azione assiale non sia nota dal modello di calcolo (ad es. quando l'analisi è svolta su modelli a telaio con l'ipotesi di solai infinitamente rigidi nel piano), ma siano presenti, in prossimità della trave in muratura, elementi orizzontali dotati di resistenza a trazione (catene, cordoli), i valori delle resistenze possono essere assunti non superiori ai valori di seguito riportati ed associati ai meccanismi di rottura per taglio o per pressoflessione.

La capacità a taglio V_t di travi di accoppiamento in muratura ordinaria in presenza di un cordolo di piano o di un architrave resistente a flessione efficacemente ammorso alle estremità, può essere calcolata in modo semplificato come

$$V_t = h \cdot t \cdot f_{vd0} \quad [7.8.4]$$

dove:

h è l'altezza della sezione della trave

$f_{vd0} = f_{vk0} / \gamma_M$ è la resistenza di progetto a taglio in assenza di compressione; nel caso di analisi statica non lineare può essere posta pari al valore medio ($f_{vd0} = f_{vm0}$).

La capacità massima a flessione, associata al meccanismo di pressoflessione, sempre in presenza di elementi orizzontali resistenti a trazione in grado di equilibrare una compressione orizzontale nelle travi in muratura, può essere valutata come

$$M_u = H_p \cdot \frac{h}{2} \cdot \left[1 - \frac{H_p}{(0,85 \cdot f_{bd} \cdot h \cdot t)} \right] \quad [7.8.5]$$

dove

H_p è il minimo tra la capacità a trazione dell'elemento teso disposto orizzontalmente ed il valore $0,4 f_{hd} h t$

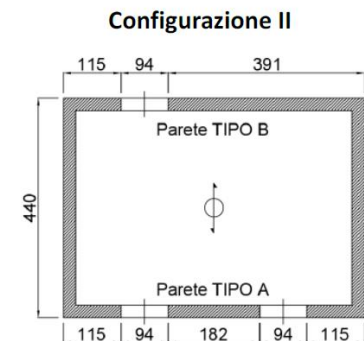
$f_{hd} = f_{hk} / \gamma_M$ è la resistenza di progetto a compressione della muratura in direzione orizzontale (nel piano della parete). Nel caso di analisi statica non lineare essa può essere posta uguale al valore medio ($f_{hd} = f_{hm}$).

La capacità a taglio, associata a tale meccanismo, può essere calcolata come:

$$V_p = 2 M_{fu} / l \quad [7.8.6]$$

dove l è la luce libera della trave in muratura.

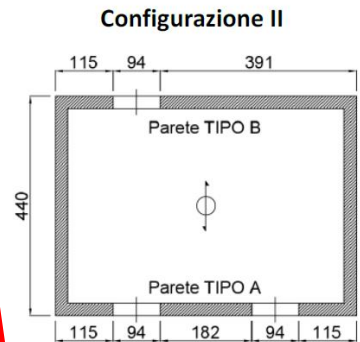
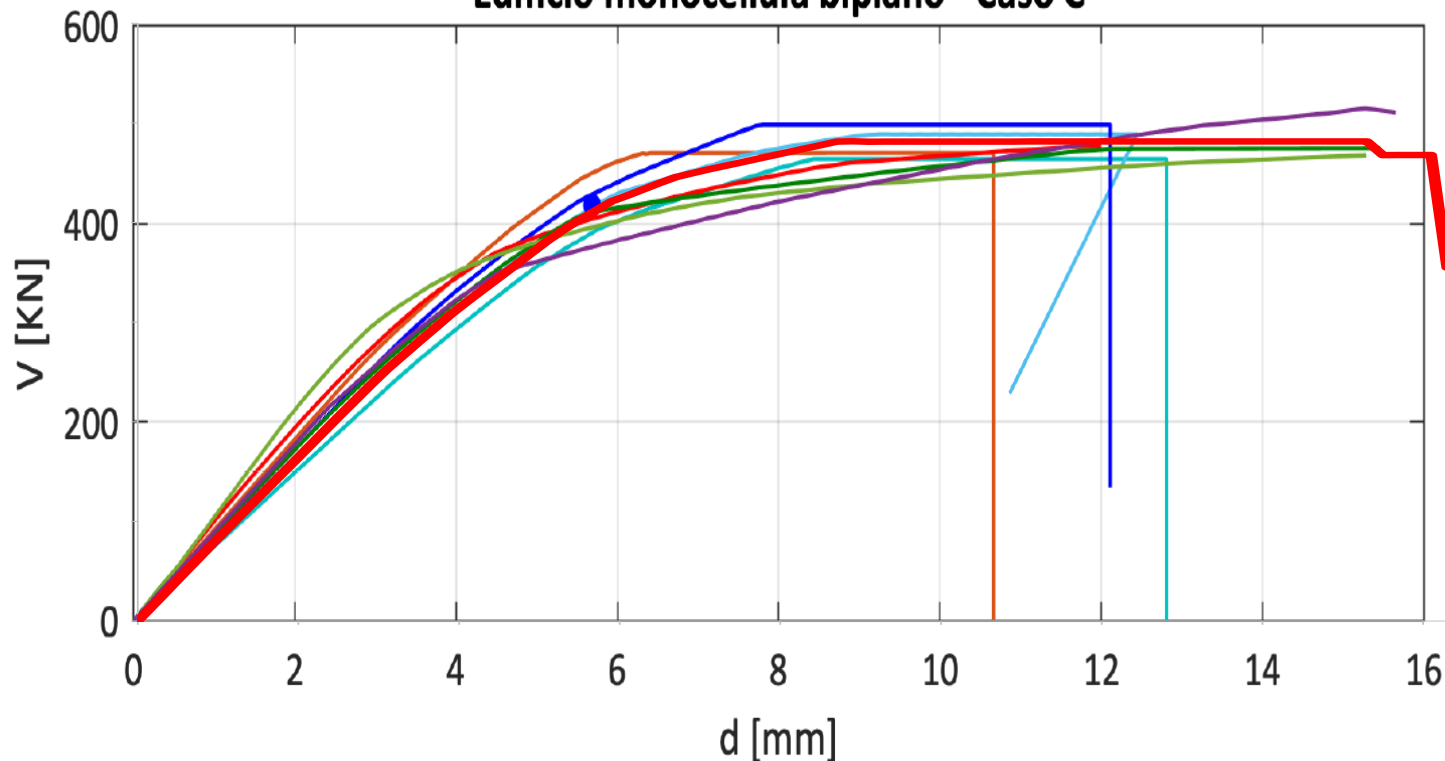
Il valore della capacità a taglio per l'elemento trave in muratura ordinaria è assunto pari al minimo tra V_t e V_p .



Validazione

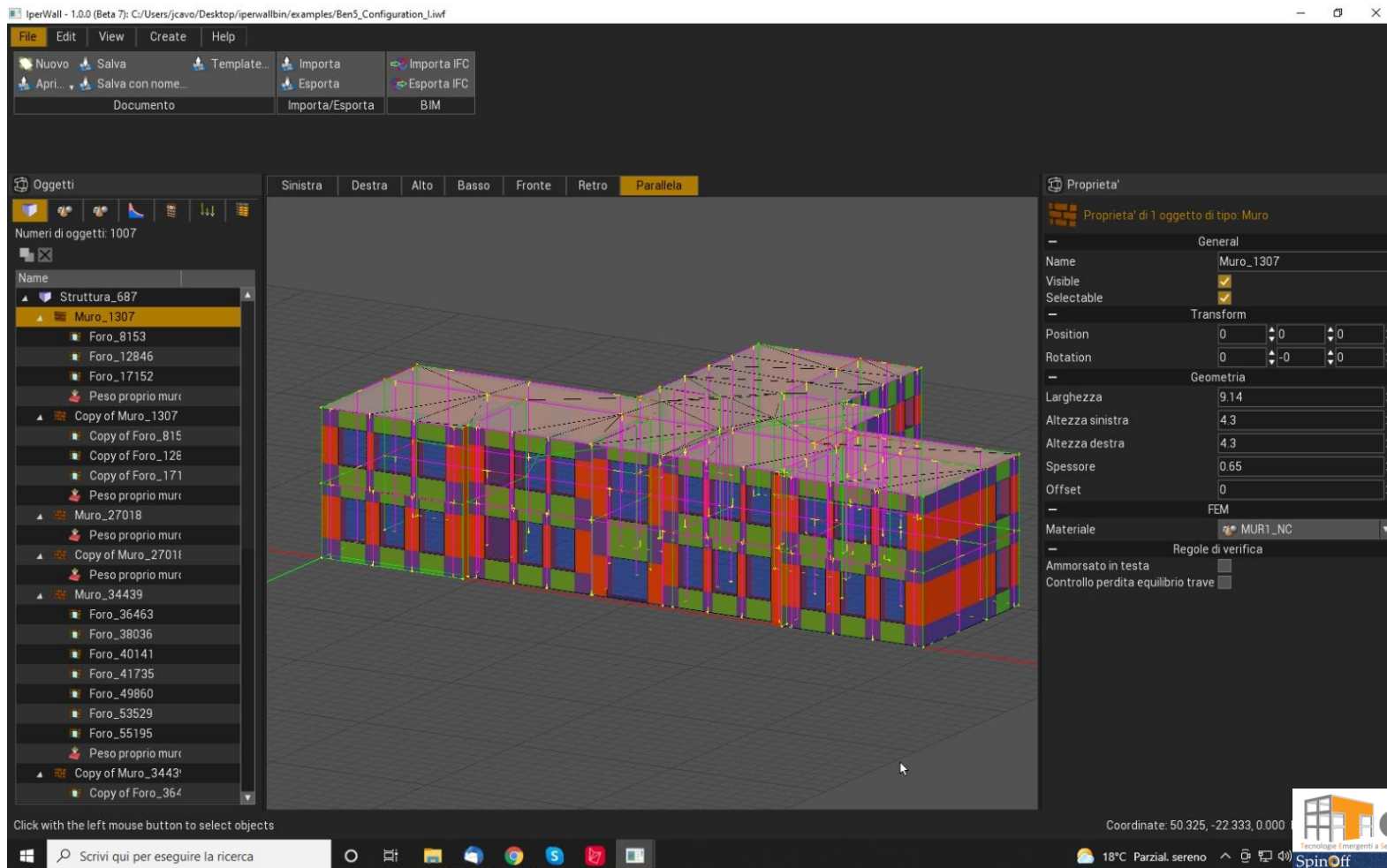
Strutture benchmark: edificio bipiano (#4) – Config. II

Edificio monocellula bipiano - Caso C



Validazione

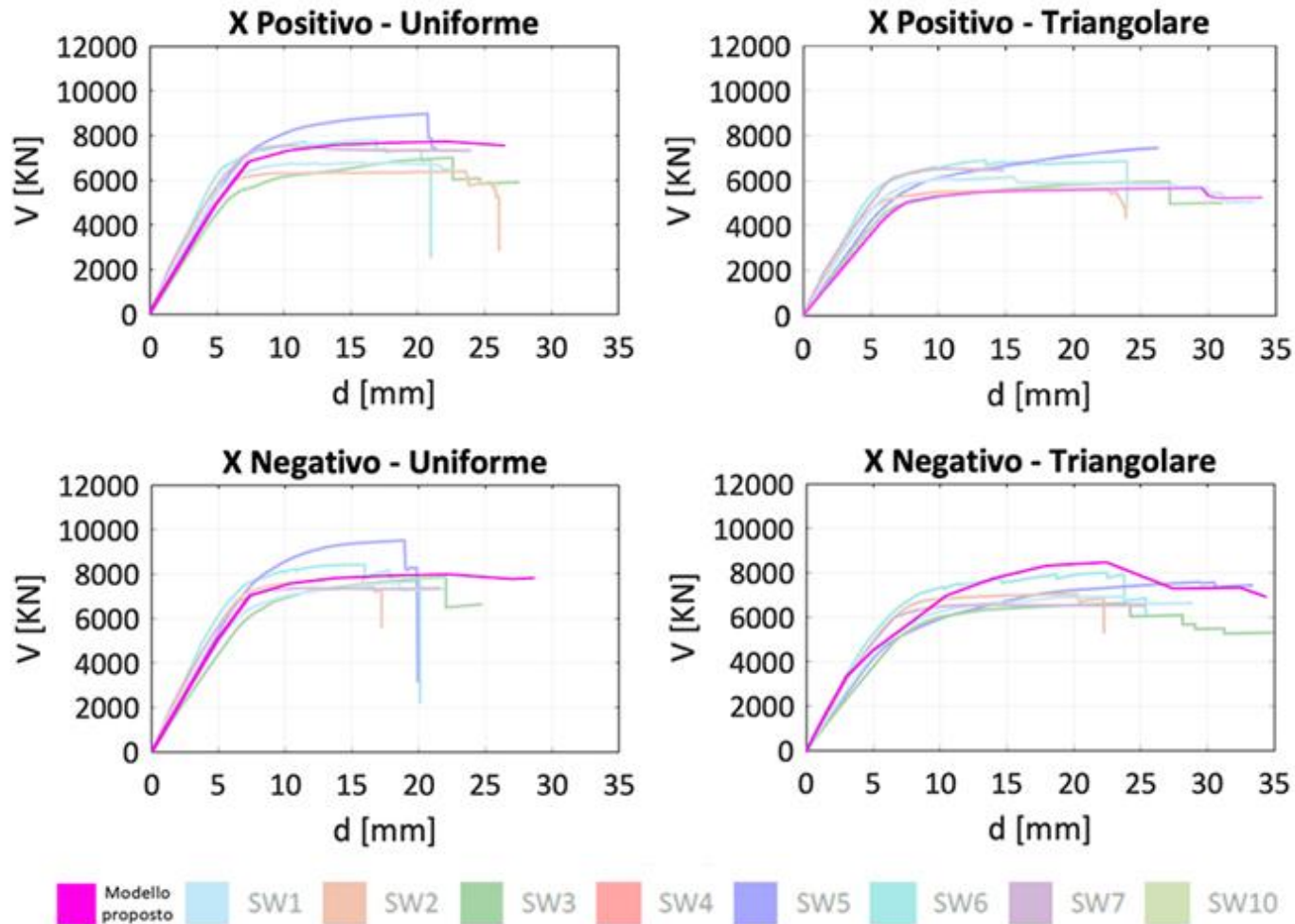
Strutture benchmark: edificio complesso (#5)





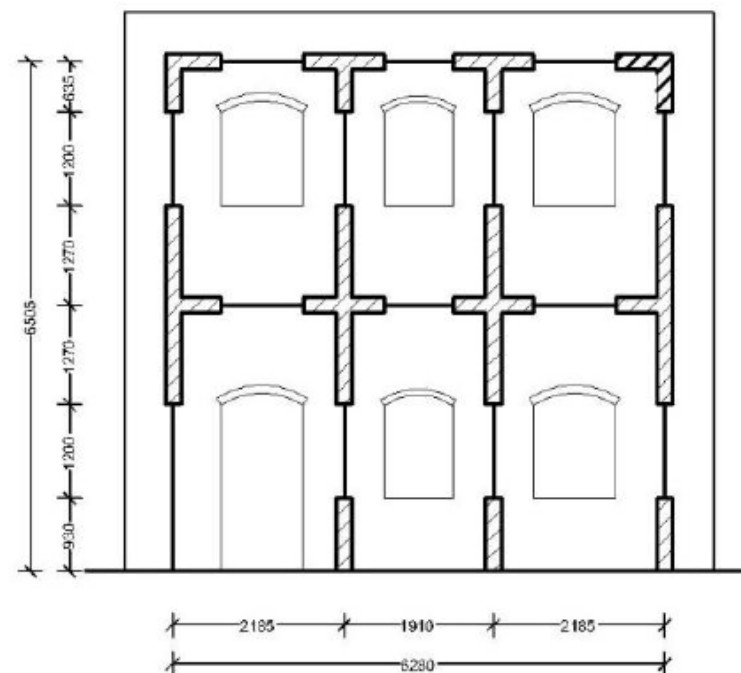
Validazione

Strutture benchmark: edificio complesso (#5)



Validazione

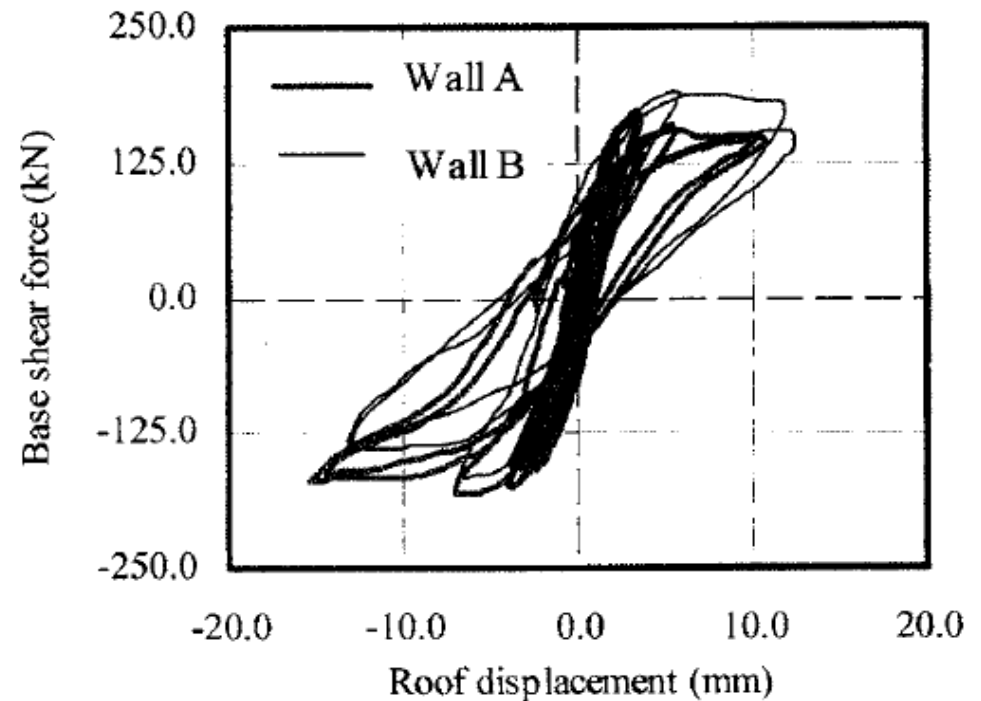
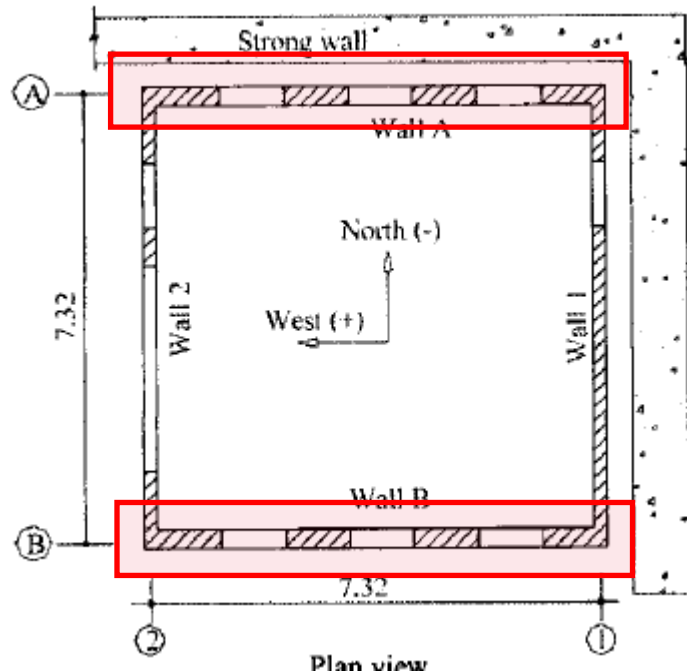
Struttura testata in laboratorio (Yi et al, 2006)





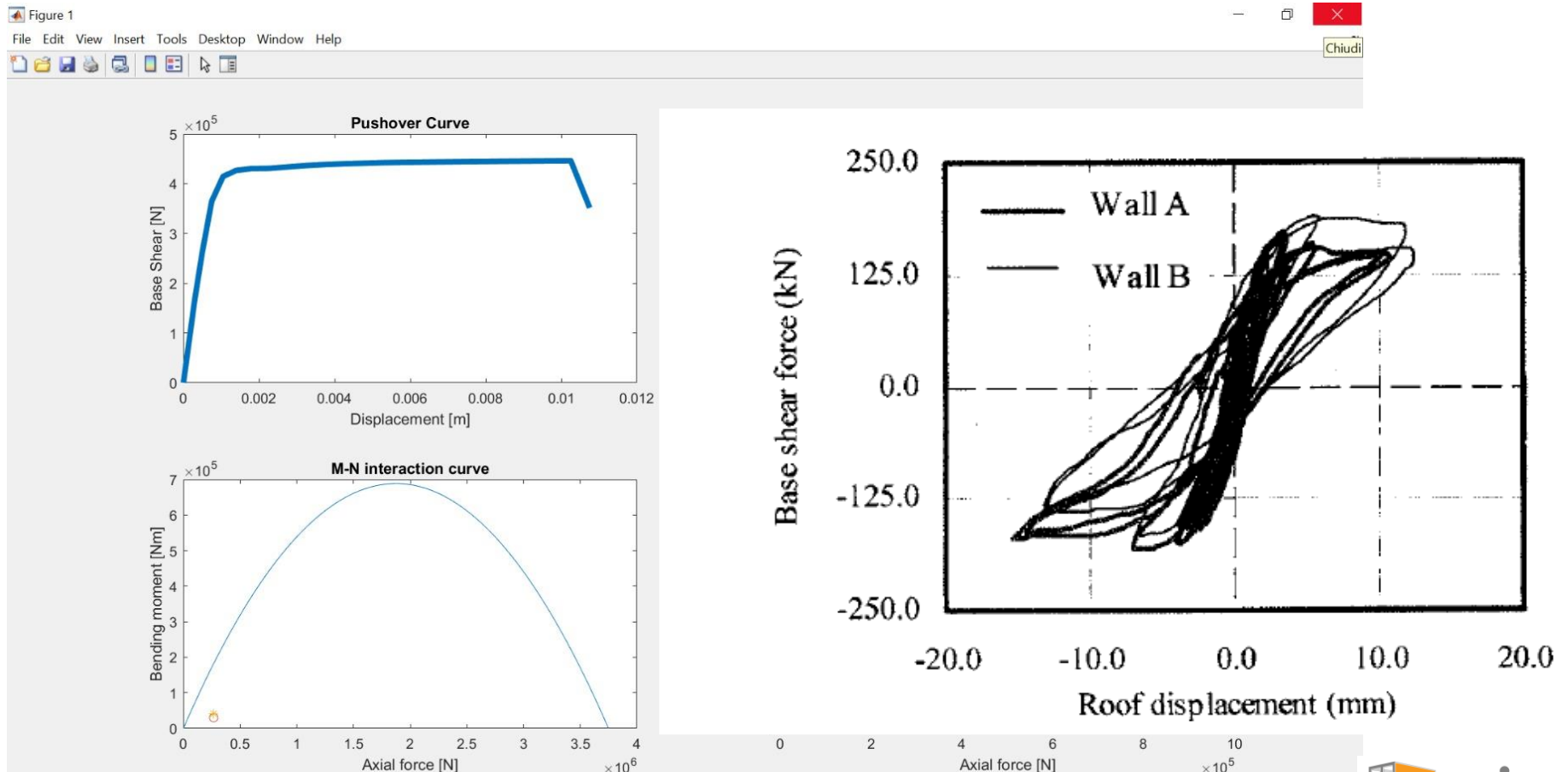
Validazione

Struttura testata in laboratorio (Yi et al, 2006)



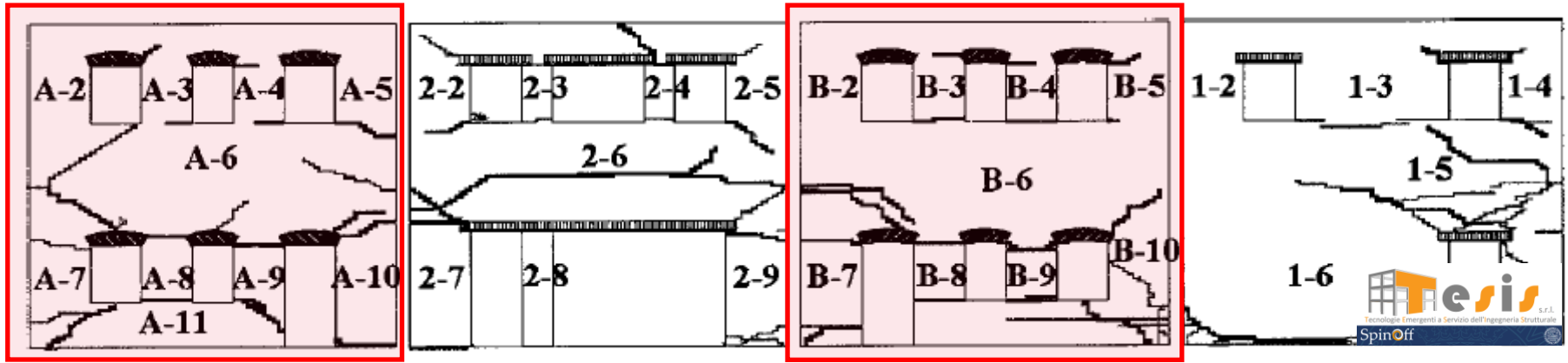
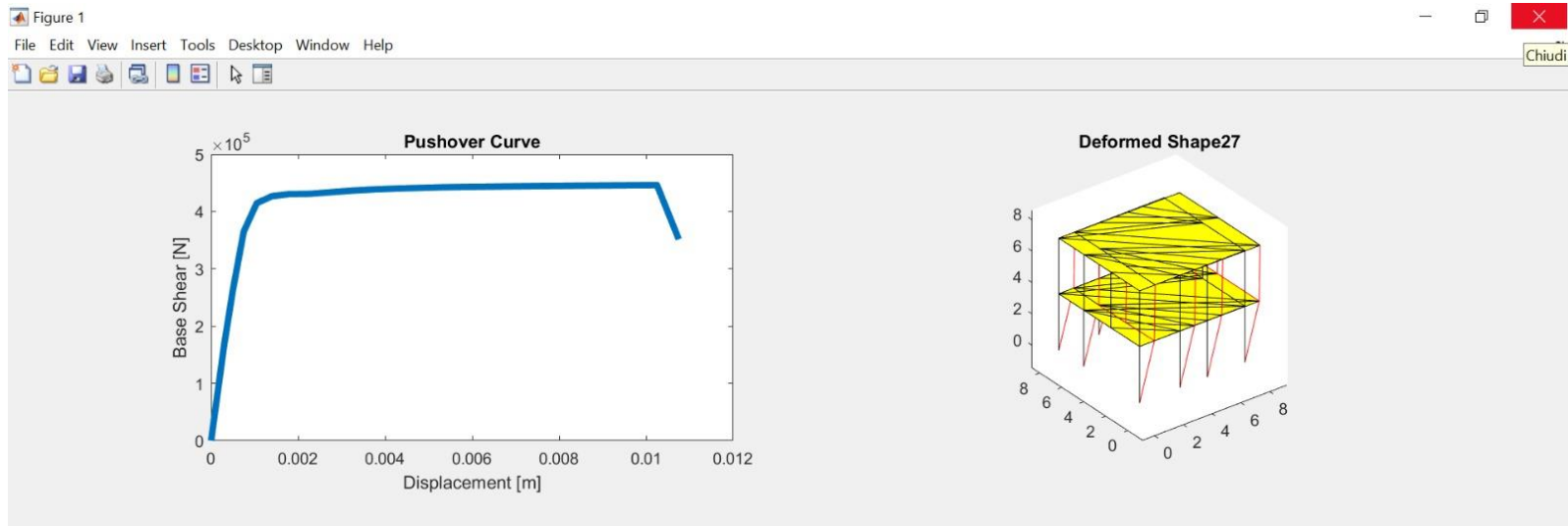
Validazione

Struttura testata in laboratorio (Yi et al, 2006)



Validazione

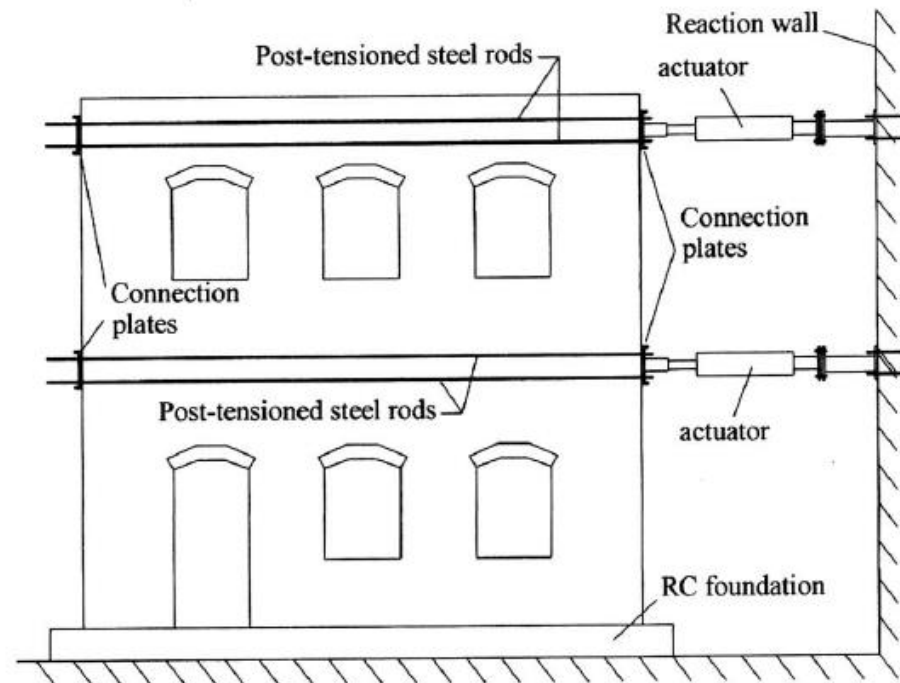
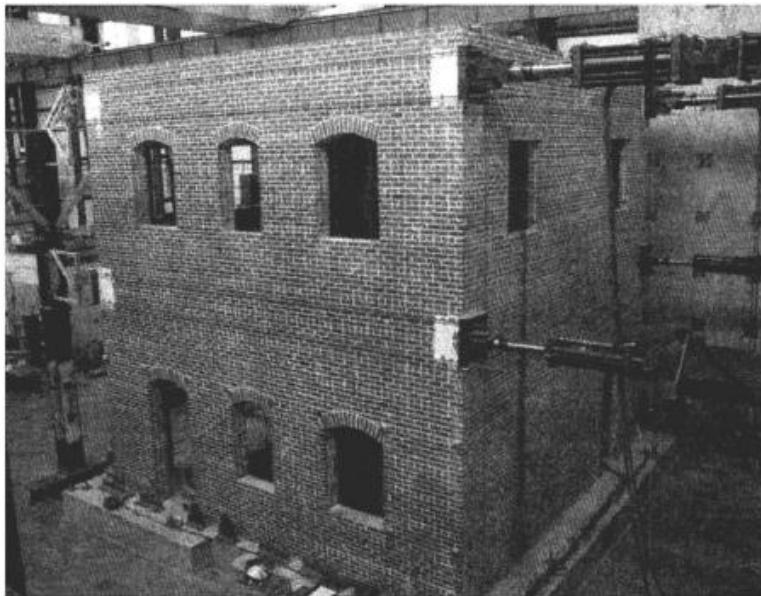
Struttura testata in laboratorio (Yi et al, 2006)





Validazione

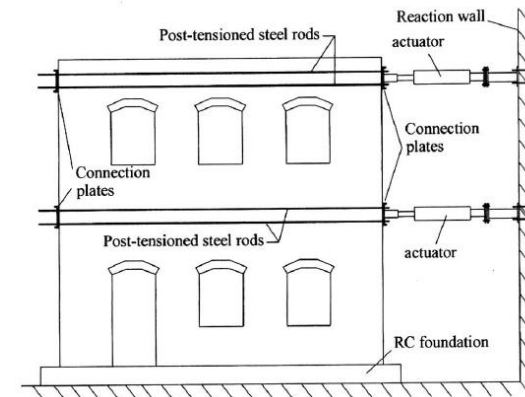
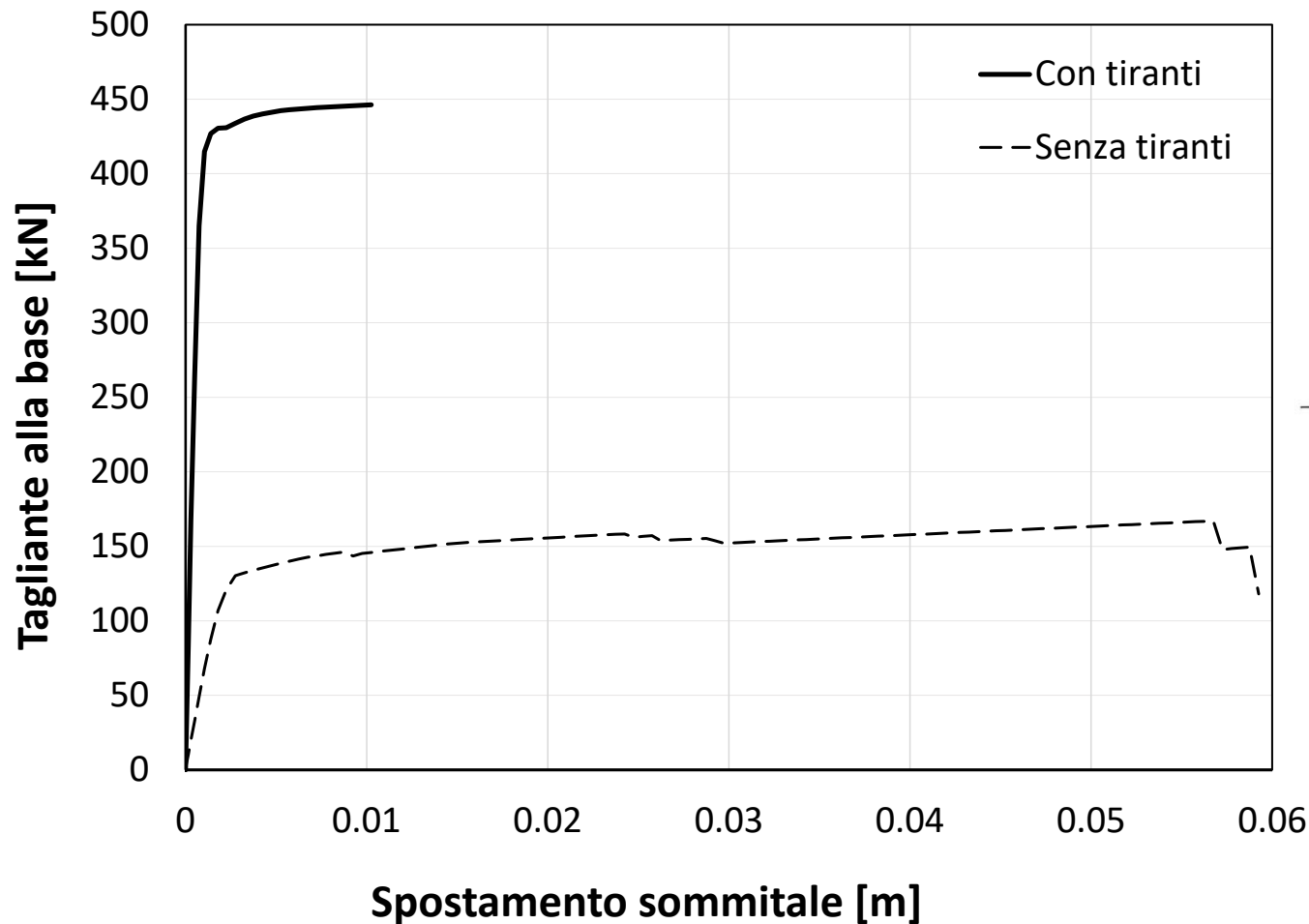
Struttura testata in laboratorio (Yi et al, 2006)



second floor level, as shown in Fig. 1. A slight post-tensioning (350 kN) was used to connect the actuators to the masonry walls at the connection points.

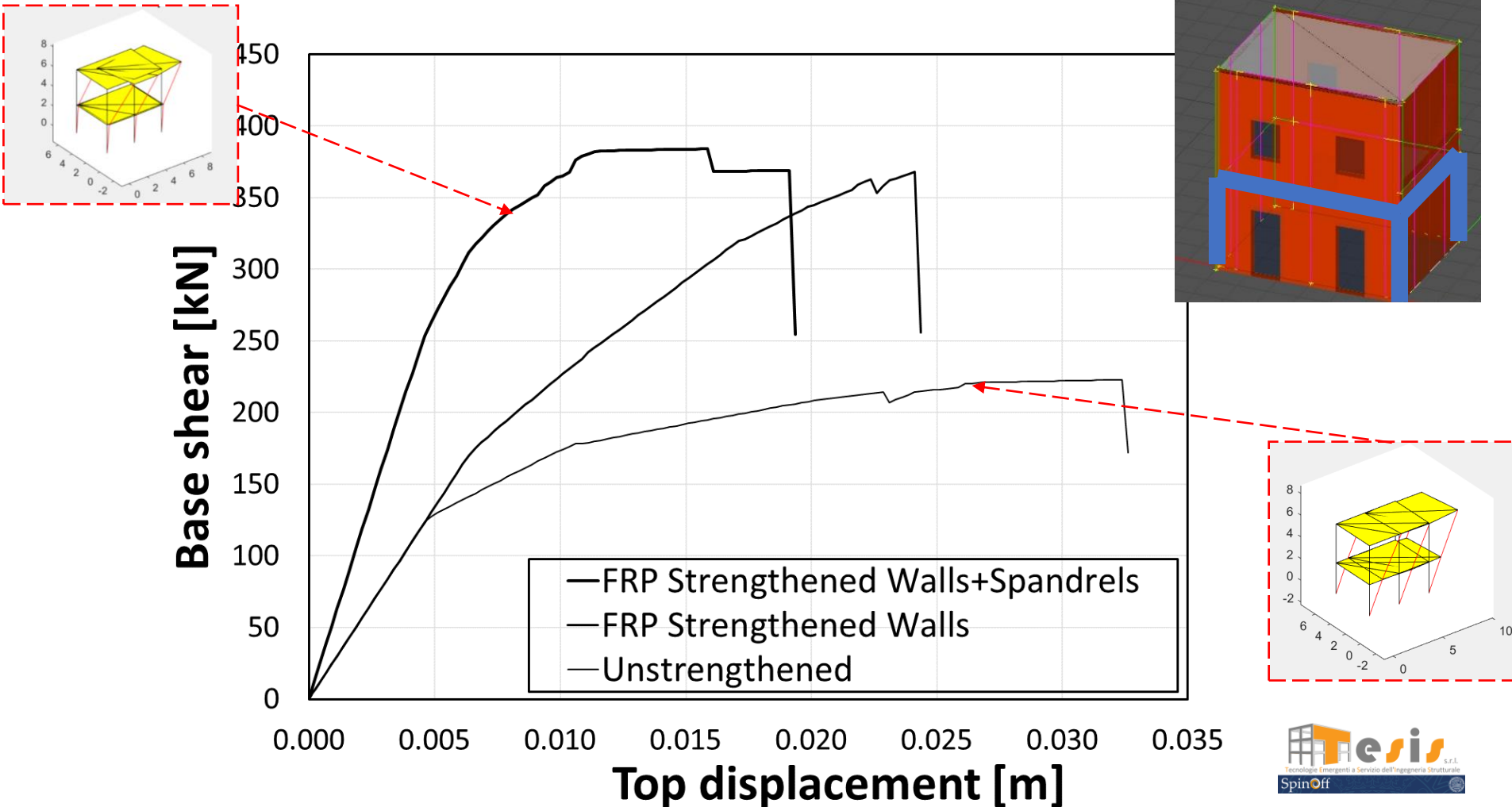
Validazione

Struttura testata in laboratorio (Yi et al, 2006)



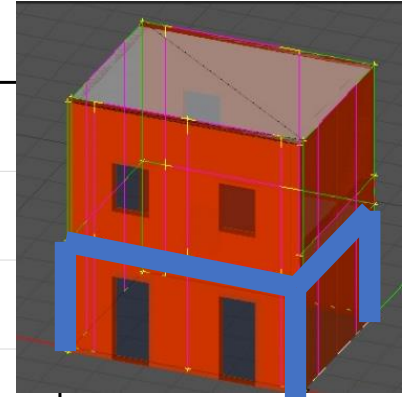
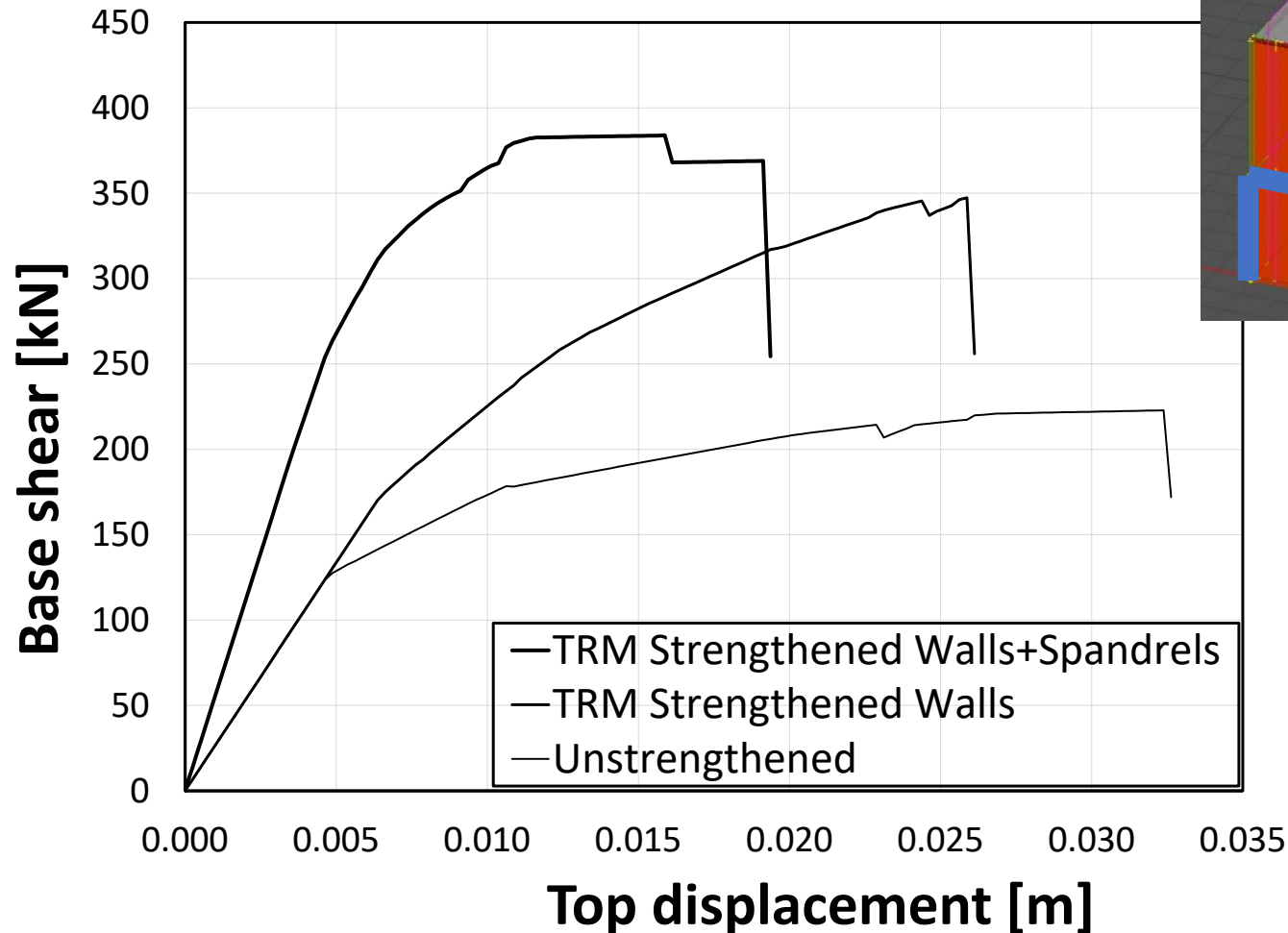
Analisi

Effetto di rinforzi in FRP



Analisi

Effetto di rinforzi in TRM



Conclusioni

Riepilogo delle funzionalità di IPERWALL BIM

IPERWALL BIM permette di eseguire analisi statiche non lineari (*pushover*) su edifici in muratura (semplice, armata o rinforzata) o misti muratura-calcestruzzo. In particolare:

- ✓ si basa su una schematizzazione a telaio equivalente con elementi che includono parti deformabili (zone di maschio o di fascia) e parti rigide (zone di nodo);
- ✓ gli elementi muratura e gli elementi in c.a. sono modellati secondo un approccio a plasticità concentrata (tramite elementi deformabili localizzati alle estremità);
- ✓ per gli elementi in muratura si considerano i tre classici meccanismi di crisi nel piano, ciascuno caratterizzabile per resistenza e capacità di spostamento;
- ✓ per gli elementi in c.a. si considerano le condizioni di pressoflessione deviata sia in campo elastico che post-elastico;
- ✓ gli impalcati sono modellati come elementi elastici caratterizzati da rigidità membranale (anche ortotropa) collegati ai nodi in cui convergono anche gli altri elementi;
- ✓ nella versione attuale si effettuano anche verifiche di flessione fuori piano (indipendentemente dall'analisi pushover) secondo D.M. 17/01/2018.

Conclusioni

Riferimenti bibliografici

- ✓ Chen S.-Y. , Moon F.L., Yi T. (2008), *A macroelement for the nonlinear analysis of in-plane unreinforced masonry piers*, Engineering Structures, 30(8):2242-2252;
- ✓ M.II.TT. (2018), *Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*, D.M. 17.01.2018, Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20 febbraio 2018 - Serie generale;
- ✓ M.II.TT. (2019), *Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018*, Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP., Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale", n. 35 del 11 febbraio 2019 - Serie generale;
- ✓ Lagomarsino S., Cattari S. (2015), *PERPETUATE guidelines for seismic performance based assessment of cultural heritage masonry structures*, Bulletin of Earthquake Engineering, 13, pp: 13–47;
- ✓ Macorini L., Izzuddin B.A. (2010), *3D mesoscale modelling for nonlinear analysis of brick-masonry*, 8th International Masonry Conference, Pages: 297-306
- ✓ Toulaitos P.G. (1996), *Seismic behaviour of traditionally-built constructions. Repair and Strengthening*. In Petrini V. and Save M., editors, *Protection of the architectural heritage against earthquakes*, pages 57-69, Springer, New York, 1996;
- ✓ Yi T., Moon F.L., Leon R.T, Kahn L.F. (2006), *Lateral Load Tests on a Two-Story Unreinforced Masonry Building*, ASCE Journal of Structural Engineering, 132(5), 643-652;
- ✓ Zucchini A., Lourenço P.B. (2009), *A micro-mechanical homogenisation model for masonry: Application to shear walls*, International Journal of Solids and Structures, 46(3-4), 871–886.



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA



GRAZIE PER L'ATTENZIONE.