
AIST

Associazione Italiana Software Tecnico



Caserta
5-7 Maggio
2022

Miglioramento sismico di strutture esistenti: casi pratici di progettazione e modellazione

Modellazione di strutture murarie ordinarie e monumentali

Corrado Chisari

La muratura: un materiale antico...



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=71577590>



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24352578>

AIST



...e moderno



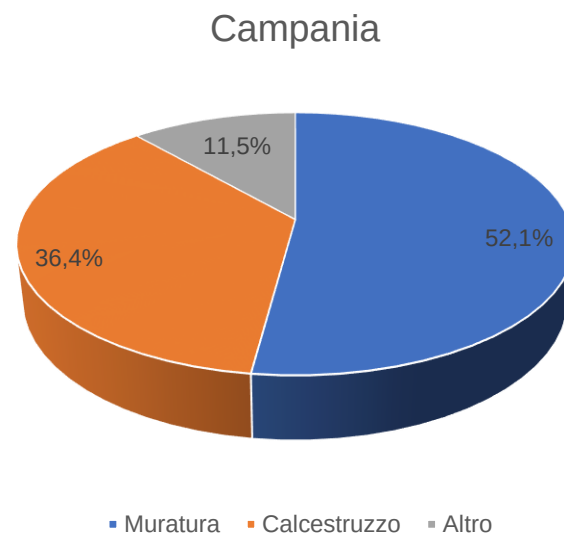
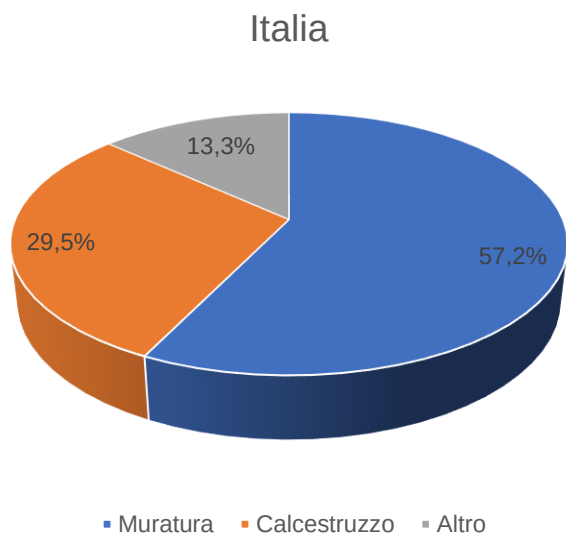
<https://passivehouseplus.ie/magazine/new-build/red-brick-surrey-home-becomes-an-unintentional-passive-house>



https://block.arch.ethz.ch/brg/project/venice-biennale-2016_droneport

Rilevanza delle strutture in muratura

Edifici residenziali in Italia (censimento 2011)



Fonte: <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx>

Riferimenti normativi

- DECRETO 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»
- CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. - Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018
- CIRCOLARE 2 dicembre 2010, n. 26 - Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale



Il «materiale» muratura

La muratura come materiale da costruzione



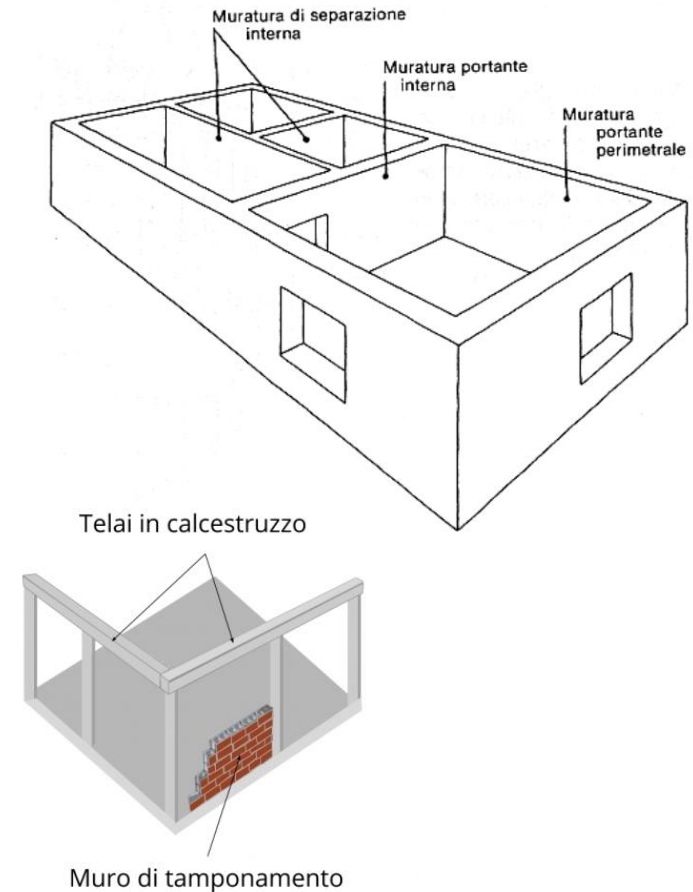
La muratura come materiale da costruzione



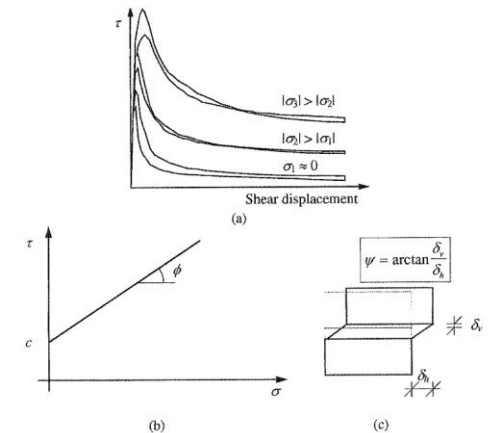
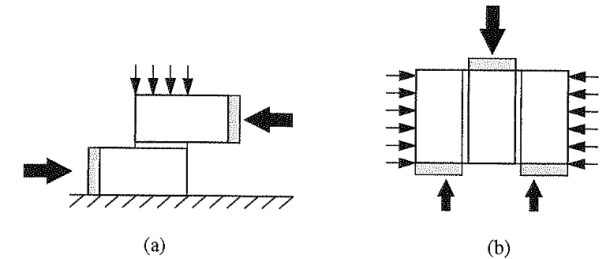
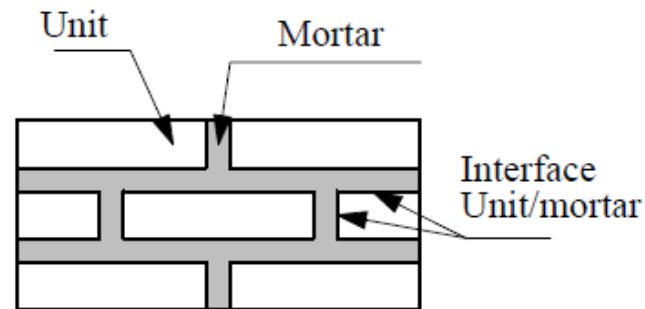
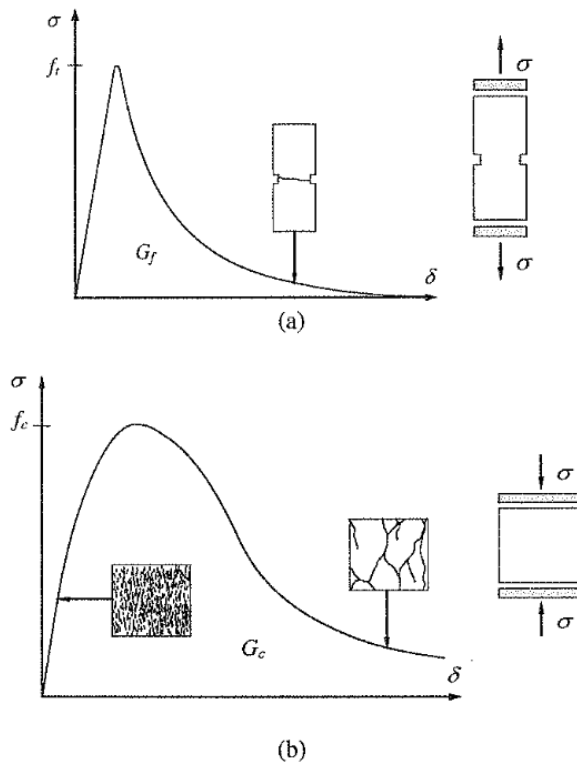
Fonte: <https://www.abacommurature.it>

La muratura come sistema costruttivo

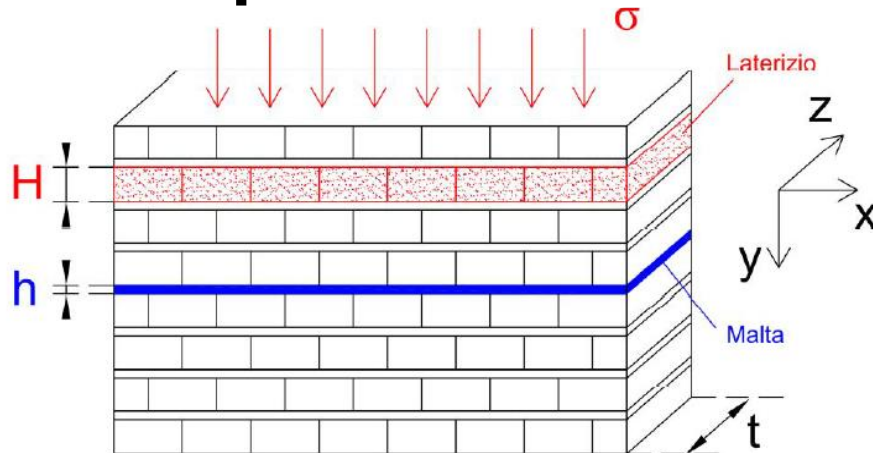
- Muratura portante (ordinaria, armata, confinata)
- Muratura non portante (muratura di tamponamento, di suddivisione)



Relazioni costitutive (componenti)



Comportamento a compressione



Se lo spessore è piccolo possiamo considerare uno stato di tensione piano:

$$\sigma_z^L = \sigma_z^M = 0$$

Equilibrio alla traslazione verticale:

$$\sigma_y^L = \sigma_y^M = \sigma$$

Equilibrio alla traslazione orizzontale:

$$\sigma_x^M \cdot h + \sigma_x^L \cdot H = 0$$

Congruenza in direzione x:

$$\varepsilon^L = \frac{1}{E^L} (\sigma_x^L - \nu^L \sigma_y^L) = \varepsilon^M = \frac{1}{E^M} (\sigma_x^M - \nu^M \sigma_y^M)$$

Si ottiene quindi (segno positivo: compressione):

$$\sigma_x^L = \nu^L \frac{1 - \alpha}{1 + \beta \cdot \gamma} \cdot \sigma \quad \sigma_x^M = -\gamma \nu^L \frac{1 - \alpha}{1 + \beta \cdot \gamma} \cdot \sigma$$

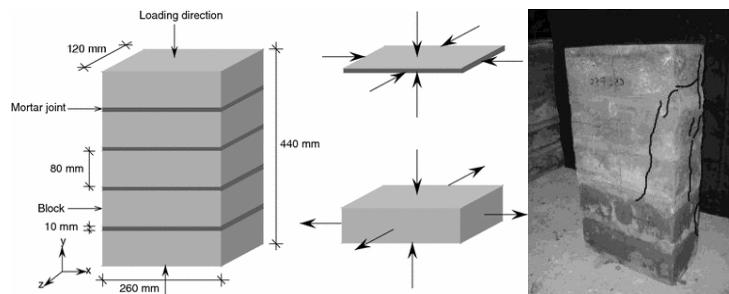
con:

$$\alpha = \frac{E^L}{E^M} \cdot \frac{\nu^M}{\nu^L}$$

$$\beta = \frac{E^L}{E^M}$$

$$\gamma = \frac{H}{h}$$

Quando $\alpha > 1$, si crea uno stato di compressione triassiale nella malta e di compressione-trazione nel mattone



Uday Vyas, C.V. & Venkatarama Reddy, B.V. Prediction of solid block masonry prism compressive strength using FE model. Mater Struct (2010) 43(5): 719-735.

Comportamento sotto stati di sforzo biassiali

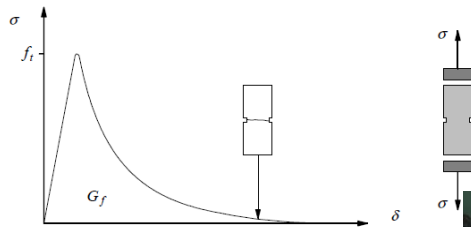
Angle θ	Uniaxial tension	Tension/compression	Uniaxial compression	Biaxial compression
0°				 Splitting crack
22.5°				
45°				
67.5°				
90°				

Le modalità di rottura di un pannello in muratura si possono quindi generalmente ridurre alle seguenti modalità di rottura dei componenti:

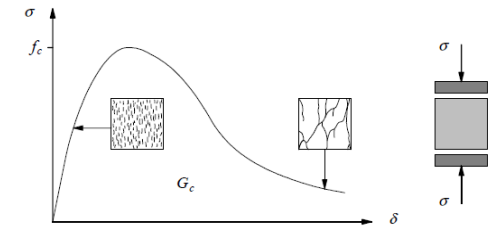
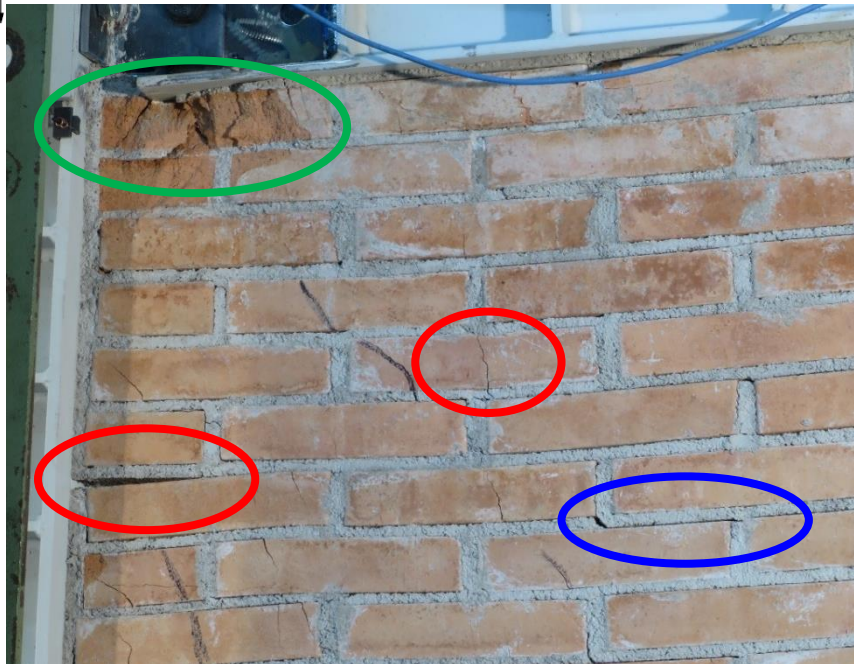
1. Trazione nel mattone
2. Trazione all'interfaccia
3. Scorrimento all'interfaccia
4. Compressione (crushing) del mattone

Dhanasekar, M., Page, A.W. and Kleeman, P.W. (1985) - The failure of brick masonry under biaxial stresses. Proc. Intsn. Civ. Engrs., Part 2, 79, p. 295-313

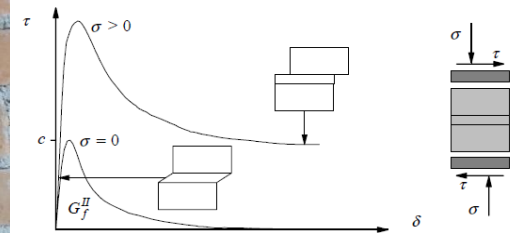
Meccanica della muratura



Modo 1: trazione (mattono o interfaccia)

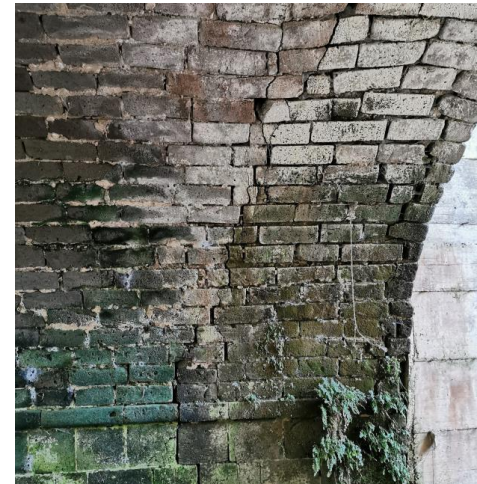


Compression (generalmente mattone)

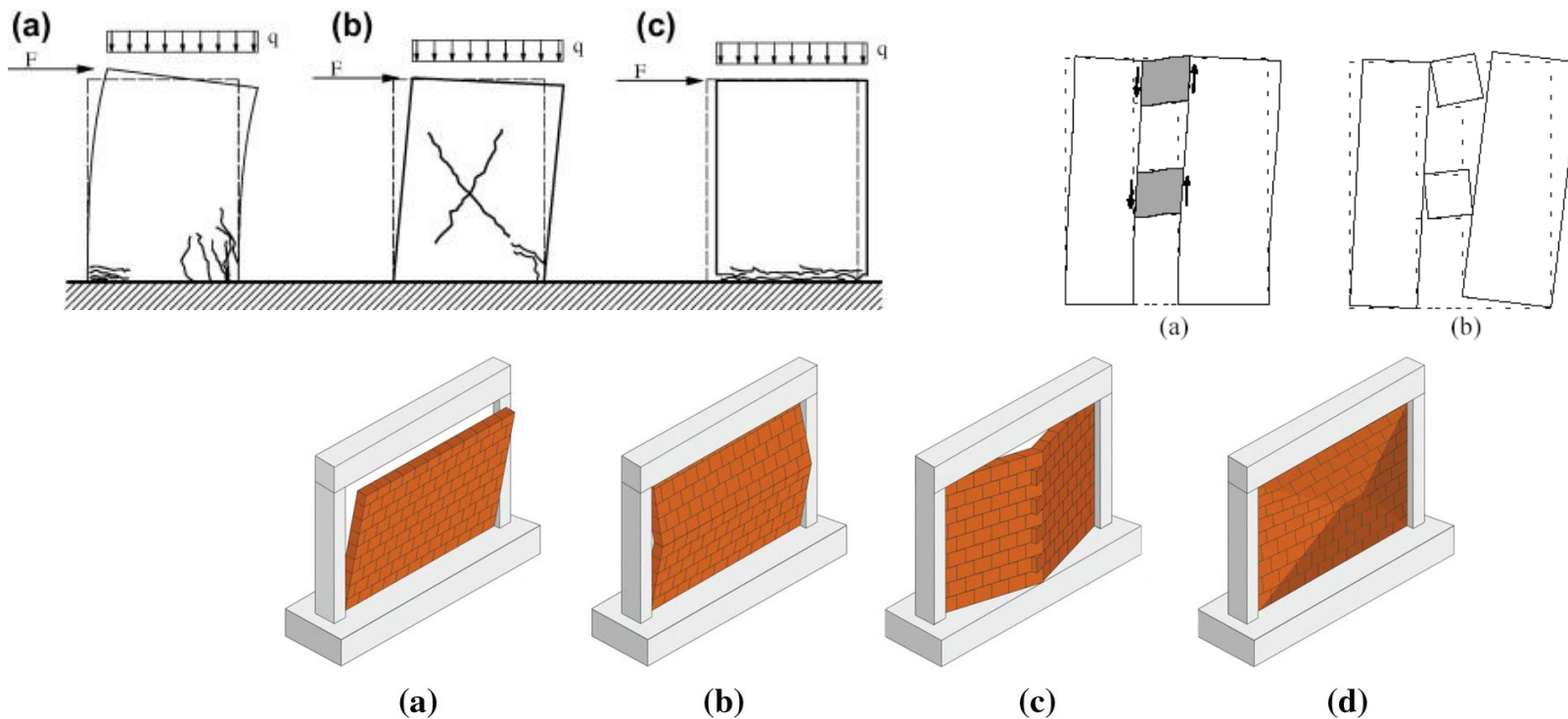


Modo 2: scorrimento (malta o interfaccia)

Fessurazione della muratura

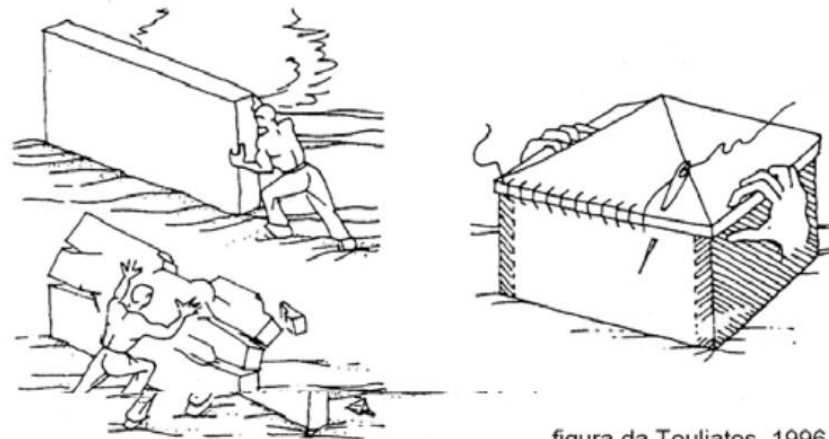


Comportamento meccanico (componenti strutturali)



Butenweg, C., Marinković, M. & Salatić, R. Experimental results of reinforced concrete frames with masonry infills under combined quasi-static in-plane and out-of-plane seismic loading. Bull Earthquake Eng 17, 3397-3422 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00602-7>

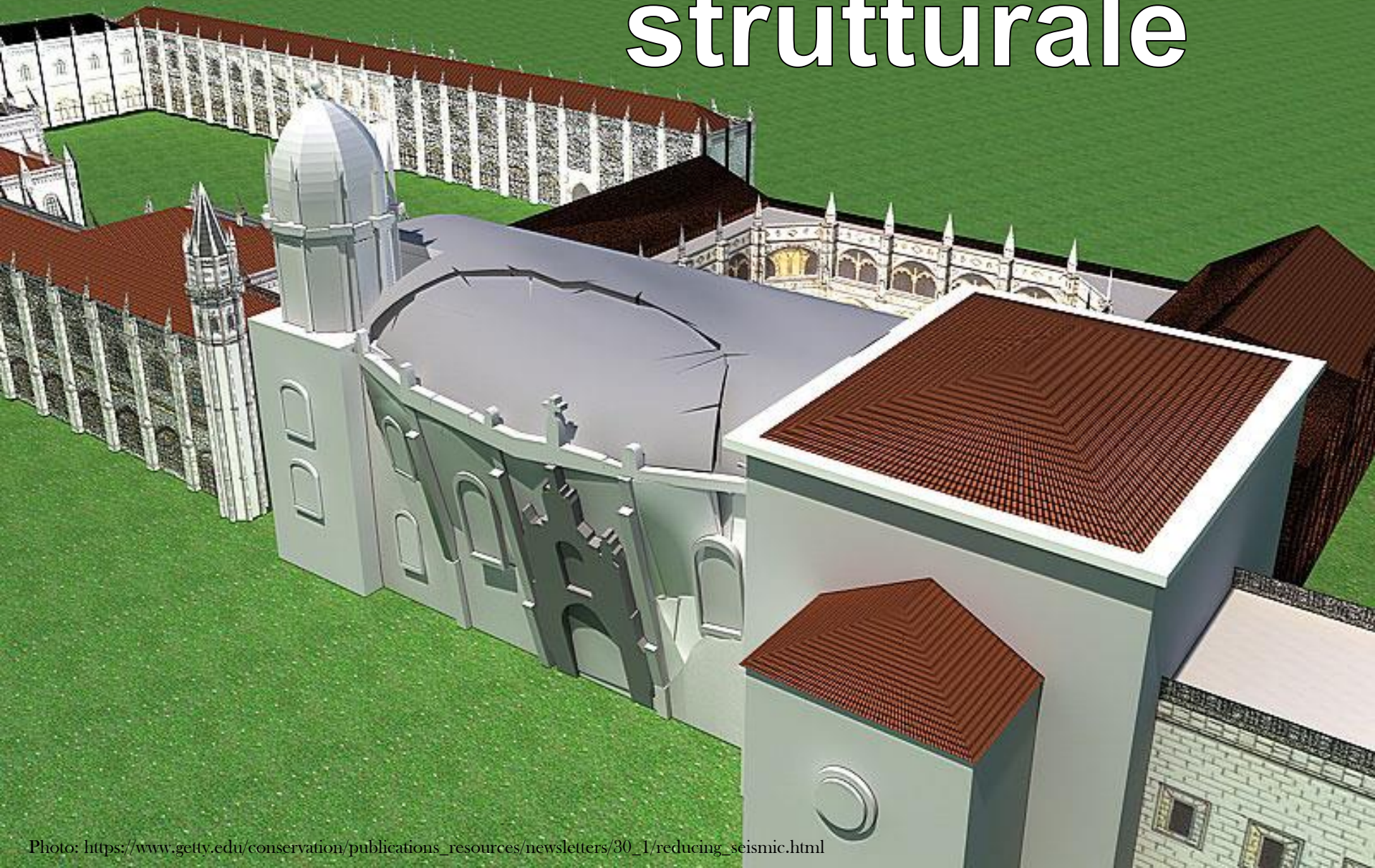
Macro-comportamento (scala strutturale)



- Ammorsamento fra pareti ortogonali
- Ammorsamento fra solai e pareti
- Rigidezza del solaio nel piano

In mancanza di questi, il comportamento fuori piano può dominare la risposta!

La modellazione strutturale



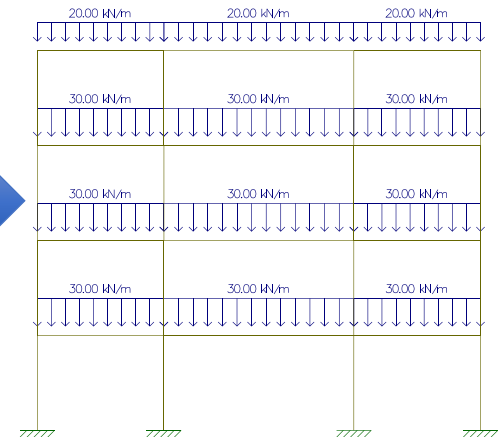
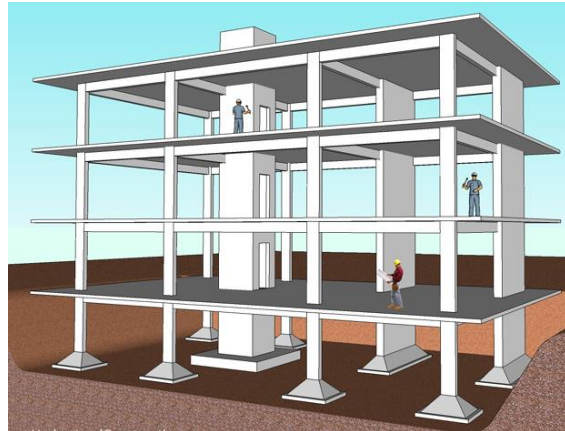
Modelli e simulazioni

Modello: insieme di enti e relazioni matematiche che consente di descrivere in forma semplificata e controllabile i fenomeni che caratterizzano un sistema in genere complesso.

Simulazione: implementazione ed esecuzione di un modello. La simulazione rende operativo un modello, mostrandone il comportamento in risposta agli ingressi: è utile per verificare la consistenza del modello, analizzare il sistema o predire risultati

Modellazione geometrico-meccanica

Strutture ordinarie in c.a.



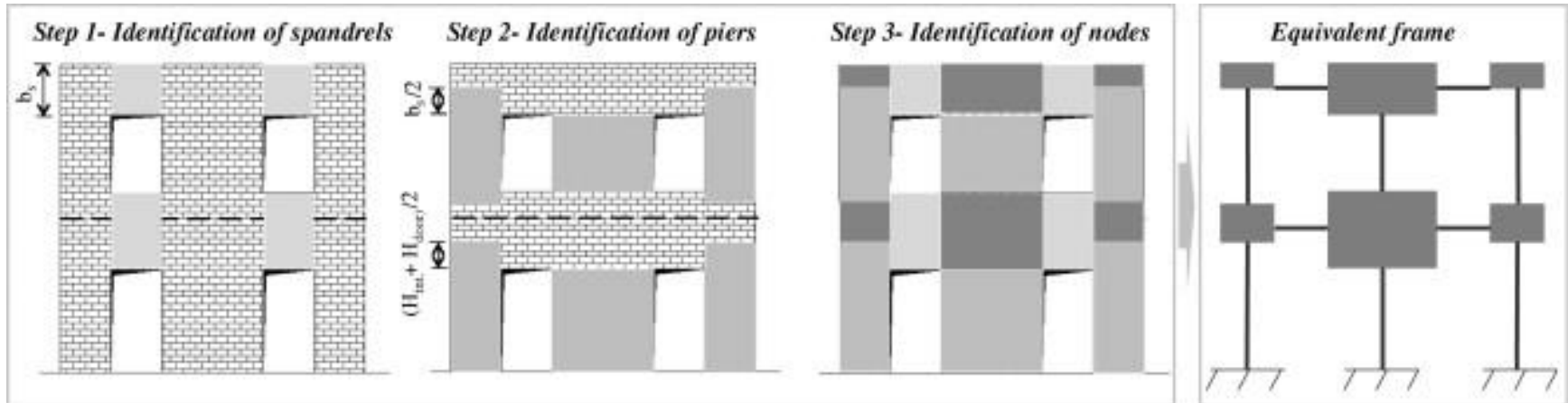
...e la muratura?



Tipologie di modellazione

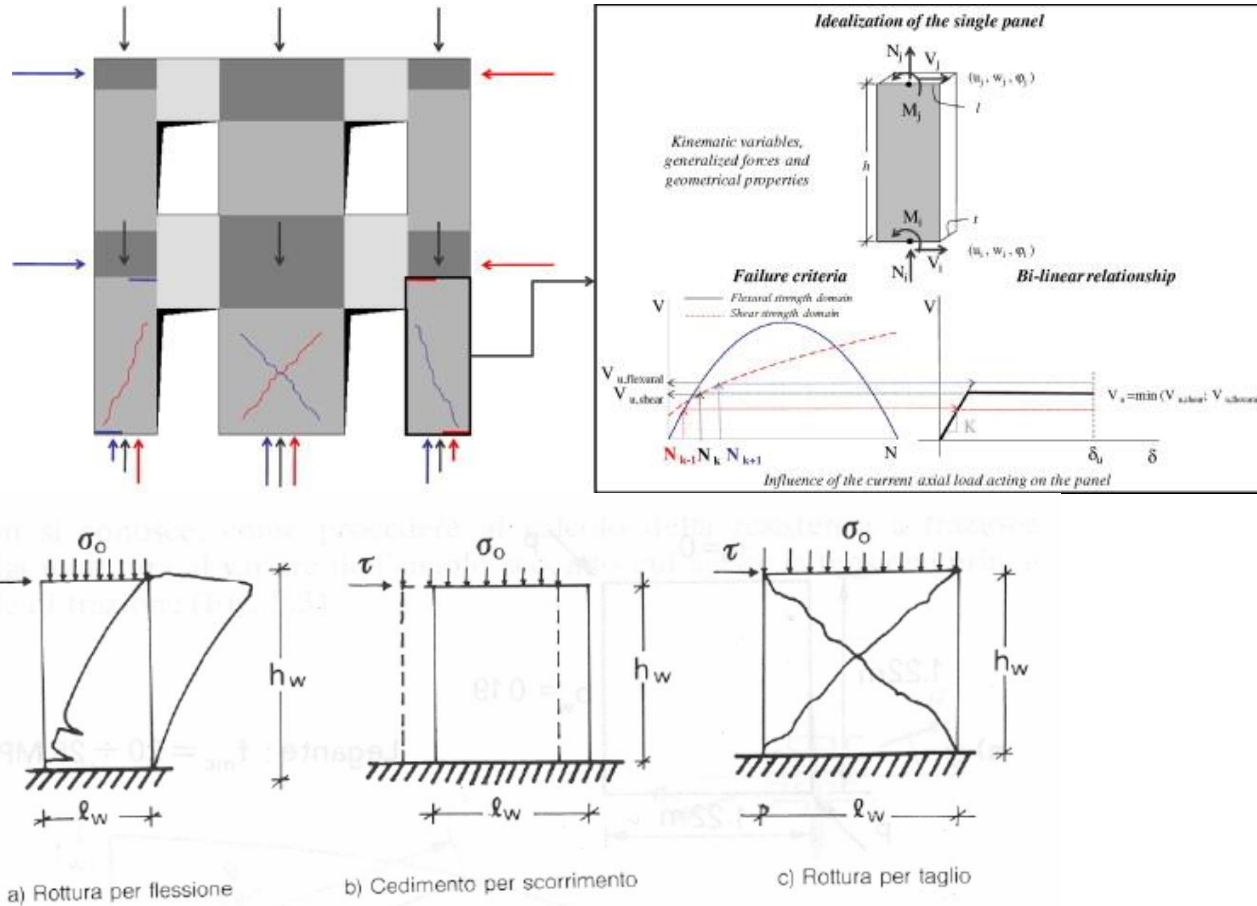
- Continuo equivalente
 - Metodi di livello 0
 - Metodi di livello 1
 - Metodi di livello 2
 - FEM
 - Metodi a telaio
 - Metodi con macro-elementi
 - Metodi avanzati di modellazione
 - DEM
 - Micro- e meso-modellazione
- Macro-modellazione*
- Micro-modellazione*

Modelli a telaio

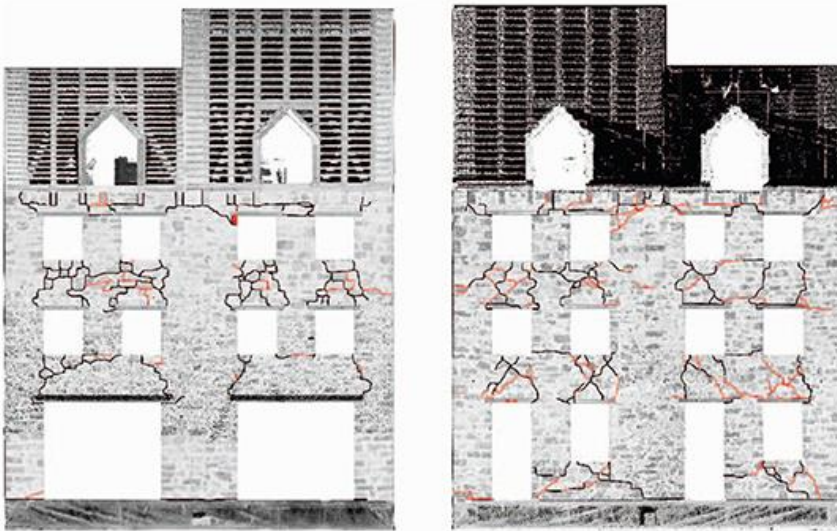


S. Lagomarsino, et al. (2013). TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings, Engineering Structures 56, 1787-1799.

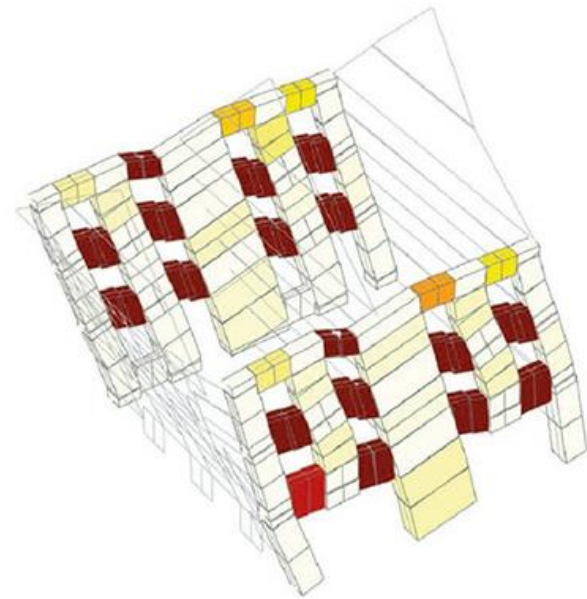
Modelli a telaio



Simulazioni 3D



Montenegro 175%

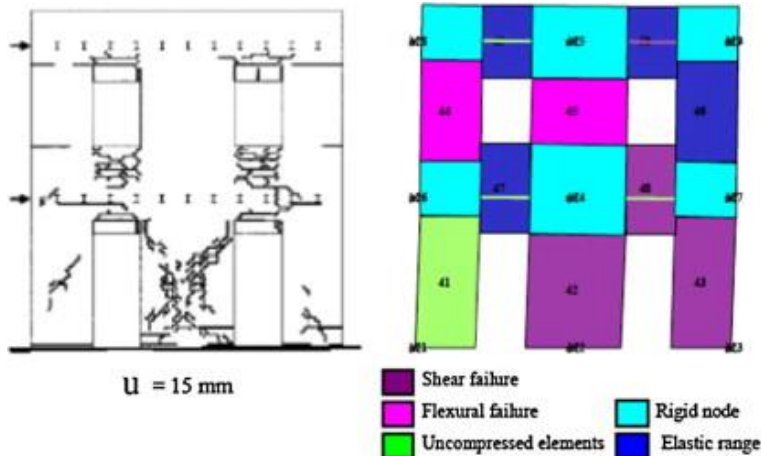


Vanin Francesco, Penna Andrea, Beyer Katrin (2020). Equivalent-Frame Modeling of Two Shaking Table Tests of Masonry Buildings Accounting for Their Out-Of-Plane Response. *Frontiers in Built Environment* 6, DOI: 10.3389/fbuil.2020.00042

Modelli a telaio

Vantaggi

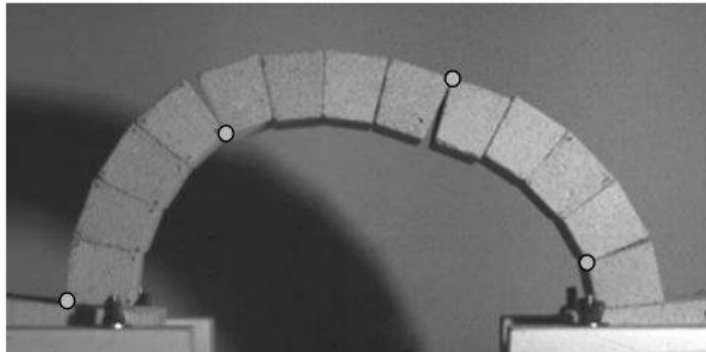
- Semplicità di applicazione
- Onere computazionale ridotto
- Possibilità di tenere in conto varie modalità di rottura



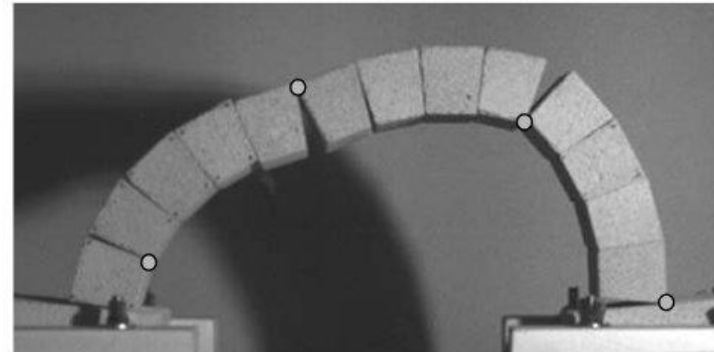
Svantaggi

- Forte approssimazione nella modellazione muro-elemento trave
- Difficoltà nel cogliere la rottura fuori piano (ribaltamento)
- Applicabilità a specifiche tipologie strutturali e molto raramente a quelle storiche

Metodi di livello 0: Analisi limite



(a)



(b)

Osservazione sperimentale: In molti casi, quando una struttura in muratura è a collasso incipiente, si formano poche grandi fessure che suddividono la struttura stessa in macro-porzioni.

È possibile calcolare il carico di collasso per una determinata configurazione di collasso (=meccanismo) e una distribuzione di azioni (per es., carico verticale gravitazionale + carico orizzontale sismico), scrivendo le **equazioni di equilibrio**.

DeJong M, et al. *Rocking Stability of Masonry Arches in Seismic Regions*, Earthquake Spectra (2008),24(4):847

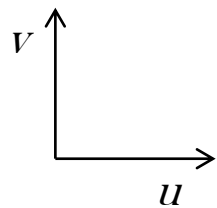
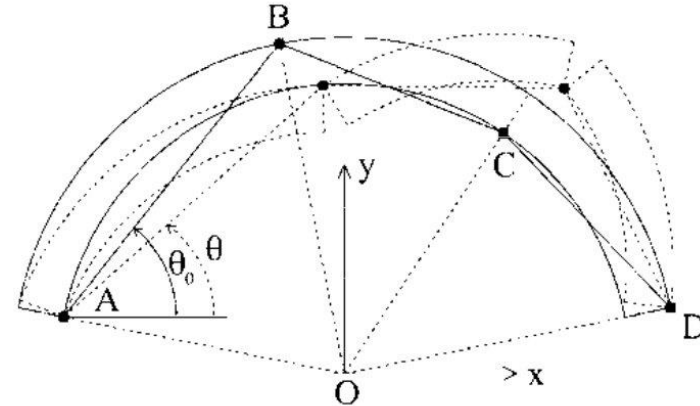
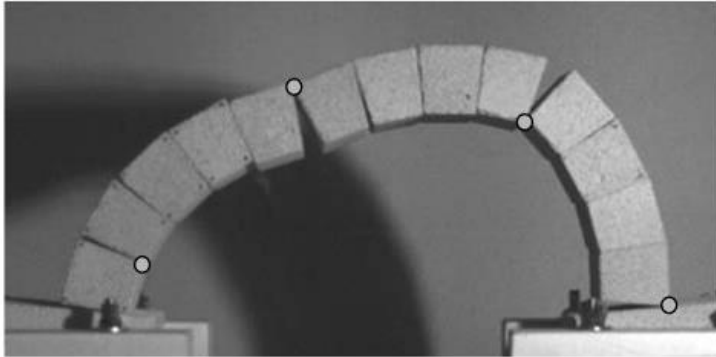
Metodi di livello 0: Analisi limite

Ipotesi (Heyman, 1966):

1. Infinita resistenza a compressione
 2. Scorrimento nullo fra le parti
 3. Resistenza a trazione nulla
-
- a. **Teorema del limite inferiore:** Se è possibile stabilire una distribuzione di azioni interne in equilibrio con le azioni esterne e che non violi le ipotesi costitutive (staticamente ammissibile), il carico esterno è inferiore al carico di rottura.
 - b. **Teorema del limite superiore:** Se è possibile stabilire un meccanismo di collasso tale per cui il lavoro sviluppato dalle forze esterne eguagli l'energia dissipata dalle azioni interne (cinematicamente ammissibile), il carico esterno è superiore al carico di rottura.
 - c. **Teorema di unicità:** un meccanismo di collasso cinematicamente ammissibile che comporti una distribuzione di azioni interne staticamente ammissibile corrisponde al vero meccanismo di rottura.

Permette di stimare il carico di collasso e il meccanismo corrispondente

Metodi di livello 0: Analisi limite



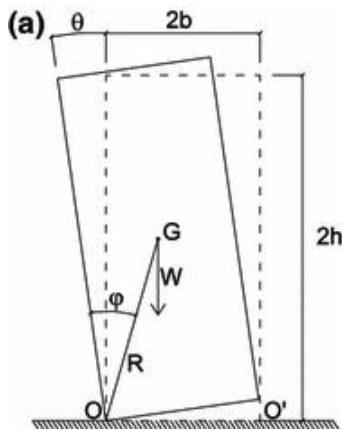
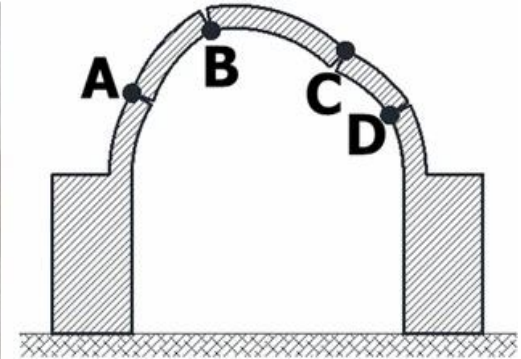
$$\lambda^k = - \frac{\sum_{i=1}^N W_i \cdot v_i}{\sum_{j=1}^M F_j^h \cdot u_j} \rightarrow \lambda_{collapse} = \min_k \lambda^k$$

	Benchmark case study	L.A.+NLP	Comparison																
DeJong et al., 2008	$\gamma=5\text{kN/m}^3$ Mech. I $t=0.03\text{m}$ $R=0.185\text{m}$ $t=0.03\text{m}$ $2\omega=152^\circ$ $R=0.185\text{m}$ $t=0.03\text{m}$ $2\omega=152^\circ$ <table border="1"> <tr> <th>θ_A</th> <th>θ_B</th> <th>θ_C</th> <th>θ_D</th> </tr> <tr> <td>14°</td> <td>72°</td> <td>131°</td> <td>166°</td> </tr> </table>	θ_A	θ_B	θ_C	θ_D	14°	72°	131°	166°	Mech. I° <table border="1"> <tr> <th>θ_A</th> <th>θ_B</th> <th>θ_C</th> <th>θ_D</th> </tr> <tr> <td>14°</td> <td>69°</td> <td>121°</td> <td>166°</td> </tr> </table>	θ_A	θ_B	θ_C	θ_D	14°	69°	121°	166°	10° $\lambda_{\text{Benchmark}}=41\%$ $\lambda_{\text{L.A.+NLP}}=40.90\%$
θ_A	θ_B	θ_C	θ_D																
14°	72°	131°	166°																
θ_A	θ_B	θ_C	θ_D																
14°	69°	121°	166°																

Brandonisio, G., Mele, E. & De Luca, A. *Limit analysis of masonry circular buttressed arches under horizontal loads*. Meccanica 52, 2547–2565 (2017)

Metodi di livello 0: Analisi limite

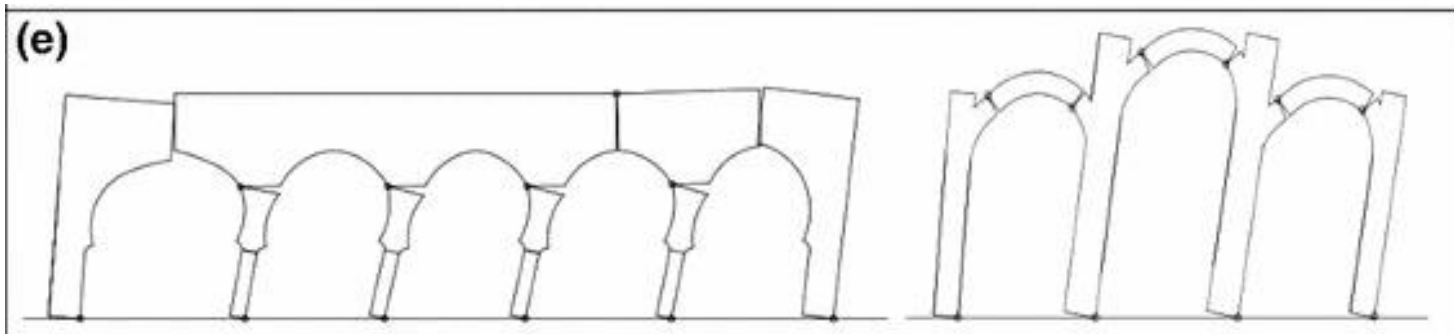
Applicabilità



Lagomarsino, S. *Seismic assessment of rocking masonry structures*. Bull Earthquake Eng 13, 97–128 (2015)

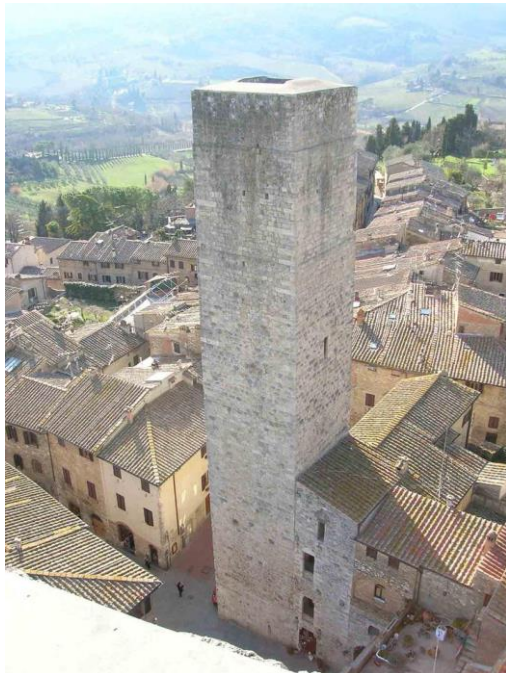
Metodi di livello 0: Analisi limite

Applicabilità



Metodi di livello 0: Analisi limite

Applicabilità



Torelli, G., D'Ayala, D., Betti, M. et al. *Analytical and numerical seismic assessment of heritage masonry towers*. Bull Earthquake Eng 18, 969–1008 (2020).



Metodi di livello 0: Analisi limite

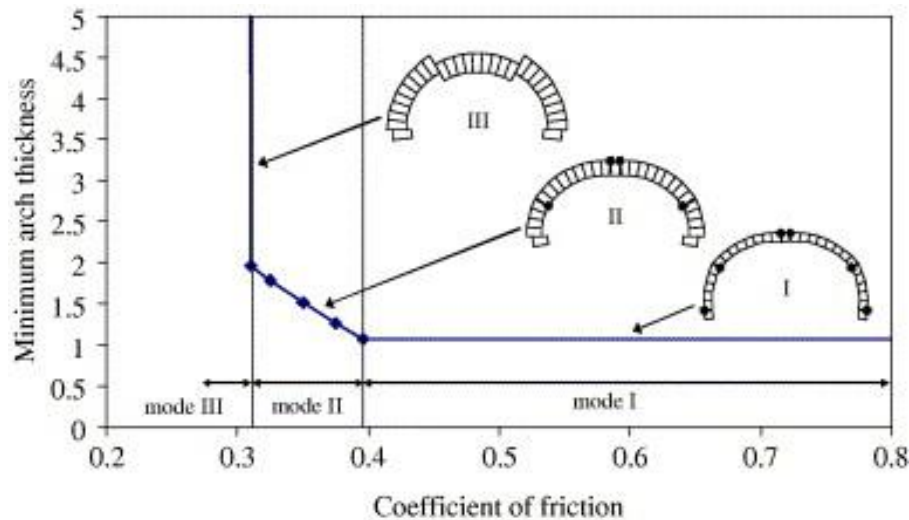
Vantaggi

- Non necessita di informazioni sui materiali
- Facilità di applicazione
- Fornisce sempre un risultato
- Accuratezza nel caso di certe modalità di rottura (ribaltamento)

Svantaggi

- Non fornisce informazioni sul comportamento della muratura lontano dal collasso (Stati limite di esercizio) o sotto carichi ciclici (sismici)
- Difficoltà di individuare i meccanismi in strutture complesse
- Trascura modalità di collasso potenzialmente importanti (taglio, compressione)

Estensioni

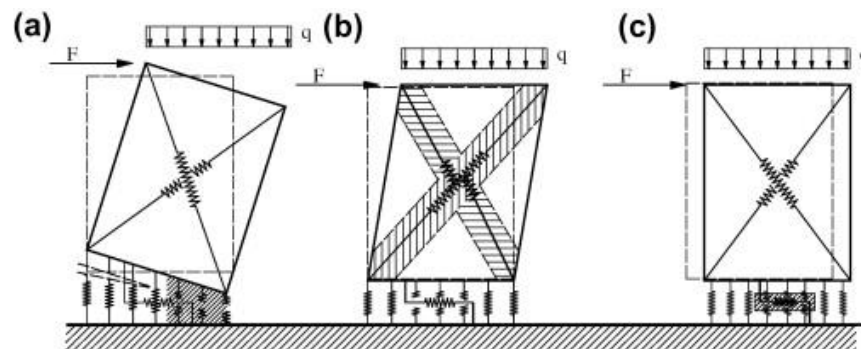
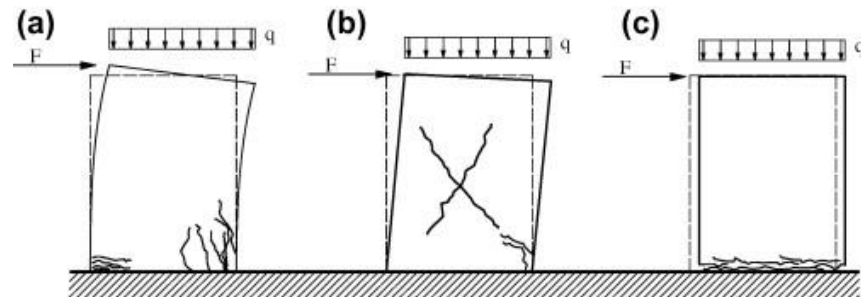
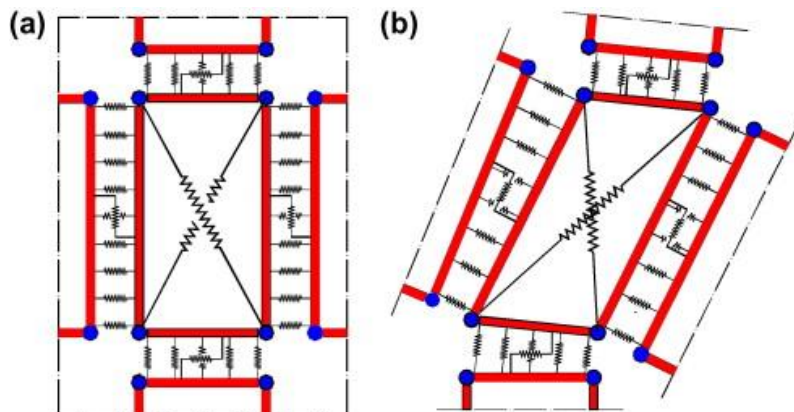


M. Gilbert, C. Casapulla, H.M. Ahmed (2006), Limit analysis of masonry block structures with non-associative frictional joints using linear programming, Computers & Structures 84(13-14): 873-887

Test	Meta-heuristic NURBS limit analysis	Reference results
1	 Ultimate failure load: 19.4 kN	 [23] FE limit analysis: 18.8 kN Experimental failure load: 17.4 kN
2	 Ultimate failure load: 40.9 kN	 [18] FE limit analysis: 37.0 kN Experimental failure load: 40.2 kN
3	 Ultimate failure load: 26.9 kN	 [18] FE limit analysis: 33.0 kN Experimental failure load: 26.0 kN
4	 Ultimate failure load: 13.7 kN	 [18] FE limit analysis: 14.2 kN Experimental failure load: 12.9 kN

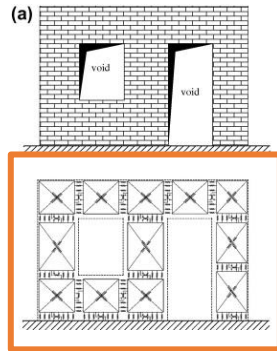
Nicola Grillanda, Andrea Chiozzi, Gabriele Milani, Antonio Tralli, Efficient meta-heuristic mesh adaptation strategies for NURBS upper-bound limit analysis of curved three-dimensional masonry structures, Computers & Structures, Volume 236, 2020, 106271.

Modellazione a macro-elementi discreti

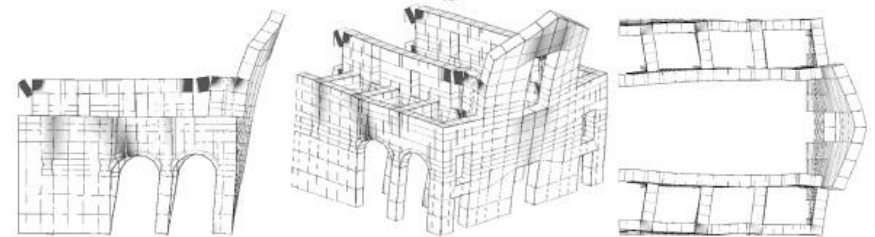
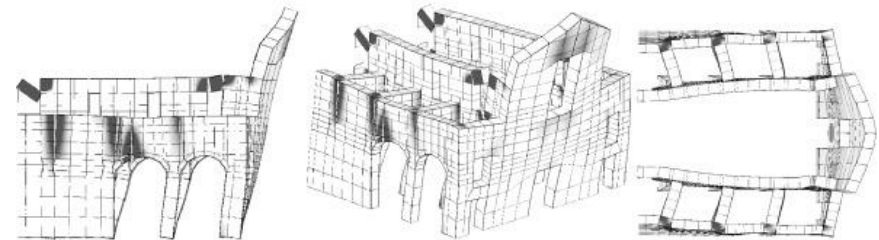
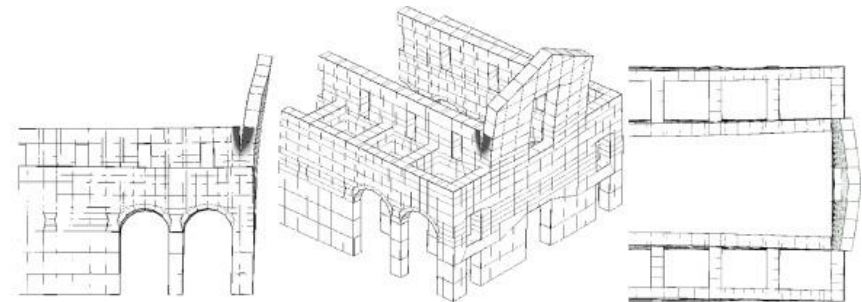
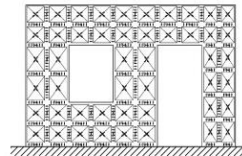


Caliò, I., Marletta, M., Pantò, B. A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings (2012) Engineering Structures, 40, pp. 327-338.

Modellazione a macro-elementi discreti

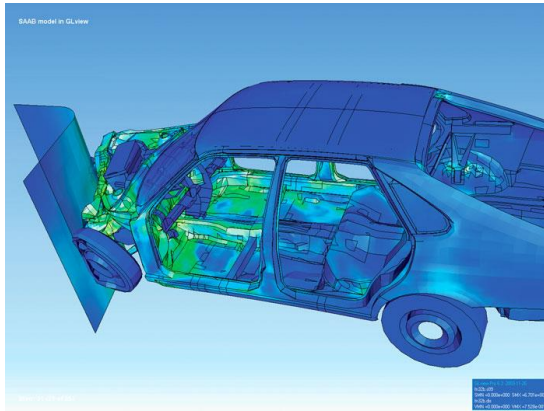


Simile al
modello a
telaio

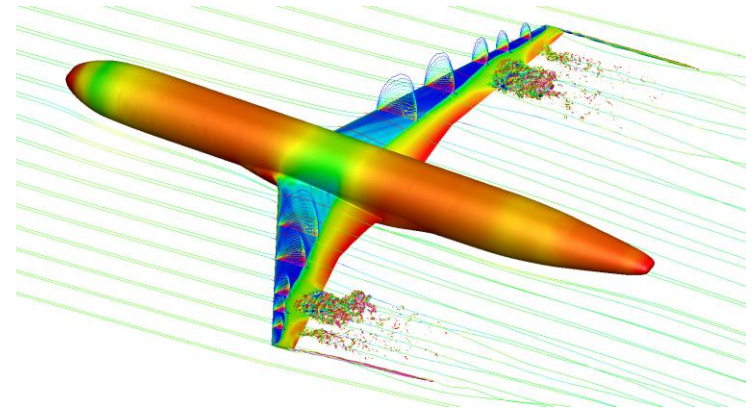


B. Pantò, F. Cannizzaro, S. Caddemi, I. Calìo (2016). 3D macro-element modelling approach for seismic assessment of historical masonry churches, Advances in Engineering Software, 97:40-59.

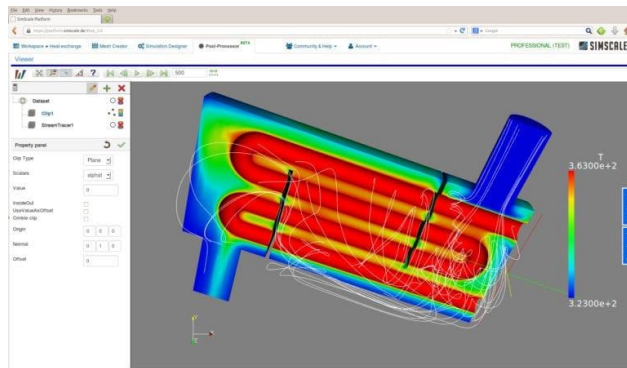
Modellazione FEM



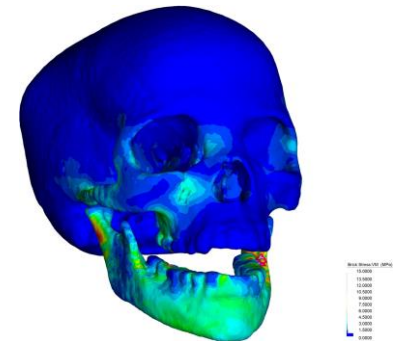
Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=641911>



<http://www.cfd4aircraft.com/index.html>

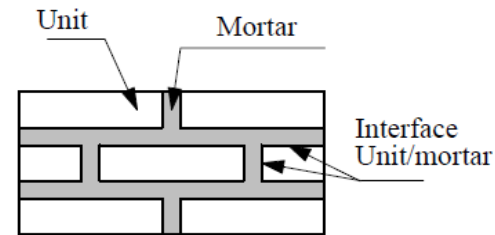


<https://www.simscale.com/blog/2014/01/running-a-thermal-fluid-flow-analysis-in-your-browser/>



Prado, F.B., et al. (2016), Review of *In Vivo* Bone Strain Studies and Finite Element Models of the Zygomatic Complex in Humans and Nonhuman Primates: Implications for Clinical Research and Practice. *Anat. Rec.*, 299: 1753-1778.

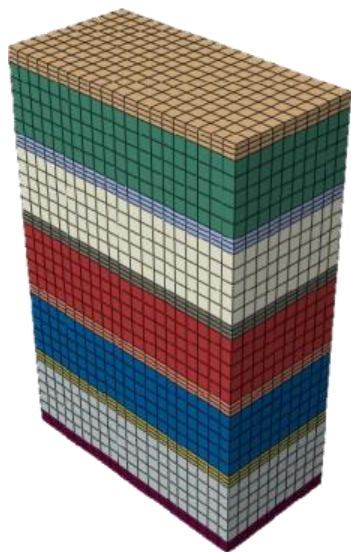
Modellazione FEM



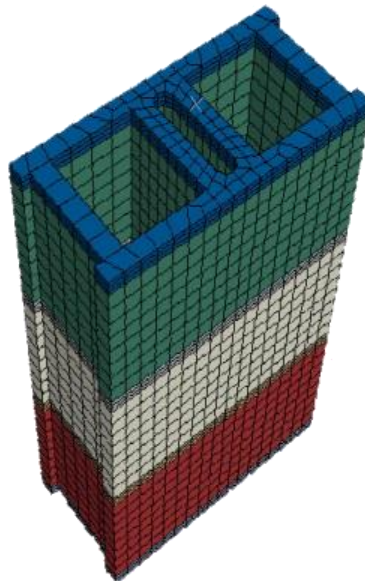
(b)

Micro-modellazione

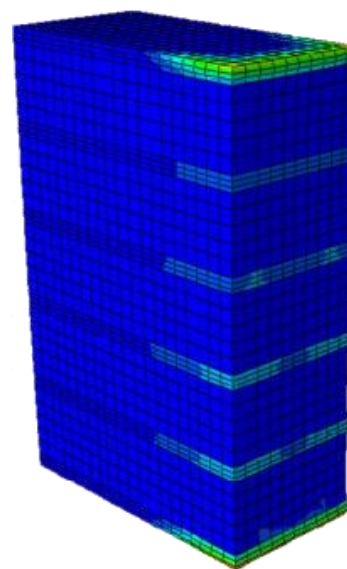
- Modella separatamente (i) malta, (ii) mattone, e, non sempre, (iii) interfaccia malta-mattone
- Possono essere definite le proprietà elastiche e inelastiche di tutti i componenti
- Risultati molto accurati, ma onere computazionale notevole



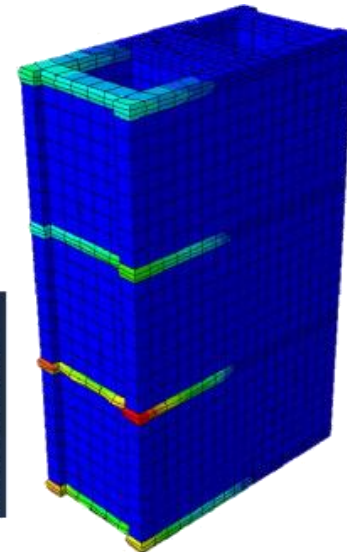
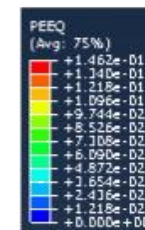
(a)



(b)



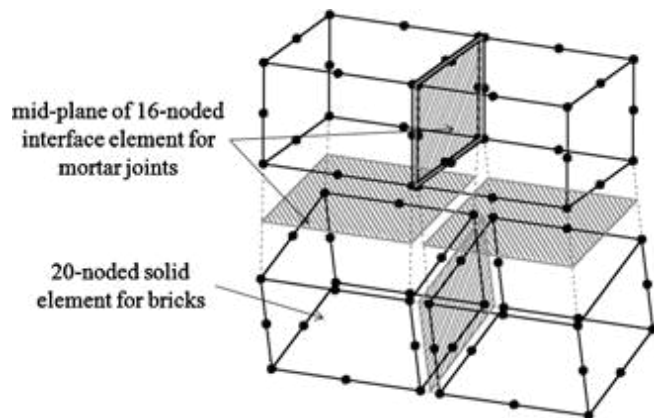
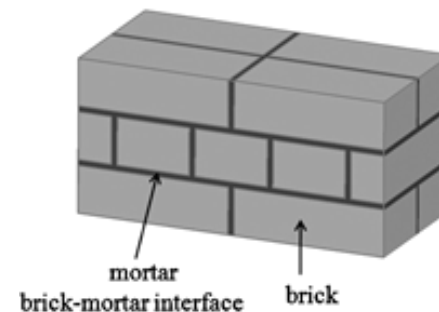
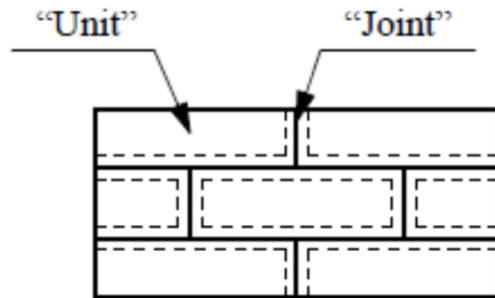
(a)



(b)

Ehsan Moradabadi, Debra F. Laefer, Julie A. Clarke, Paulo B. Lourenço. A semi-random field finite element method to predict the maximum eccentric compressive load for masonry prisms. Construction and Building Materials, Volume 77, 2015, 489–500

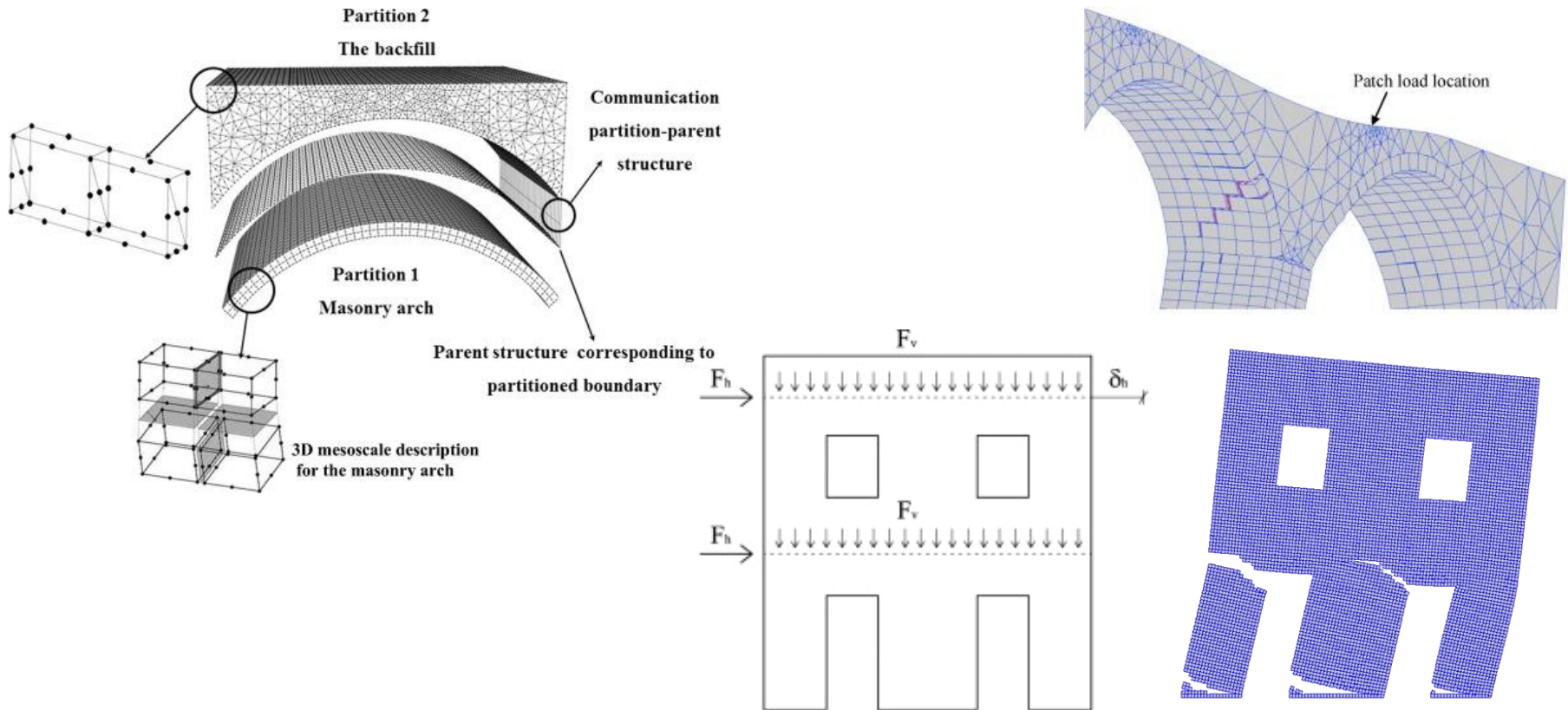
Modellazione FEM alla meso-scala



Mattone: elemento solido elastico a 20 nodi
Interfaccia: elemento interfaccia non lineare a 16 nodi

Macorini, L., Izzudin, B.A., *A non-linear interface element for 3D mesoscale analysis of brick-masonry structures*, Int. J. Numer. Meth. Engrg. 2011; 85: 1584-1608

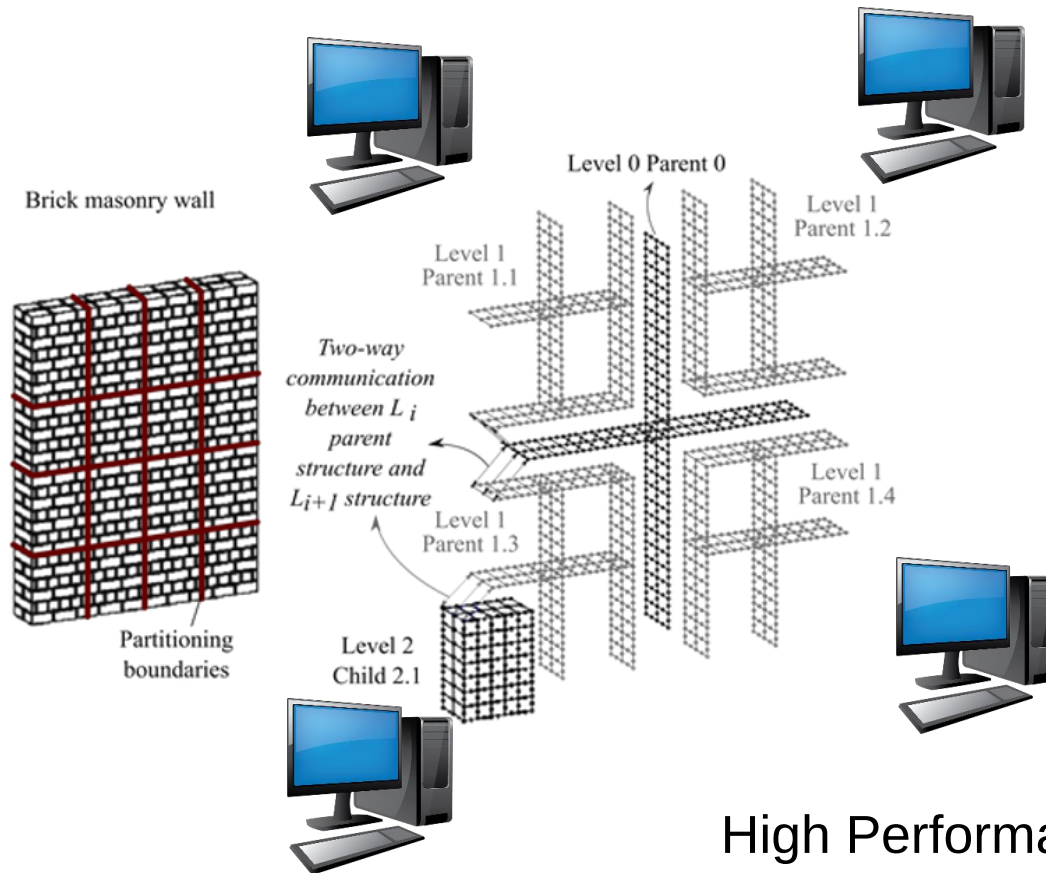
Modellazione FEM alla meso-scala



Y. Zhang, E. Tubaldi, L. Macorini, B. A. Izzuddin, Mesoscale partitioned modelling of masonry bridges allowing for arch-backfill interaction, Construction and Building Materials 173:820-842.

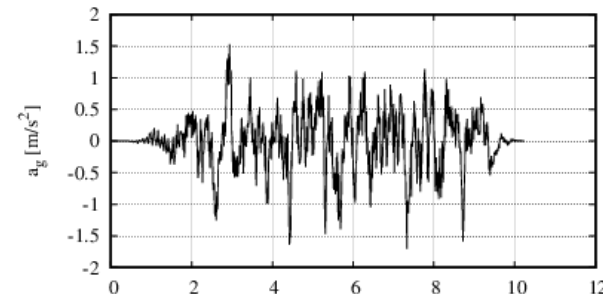
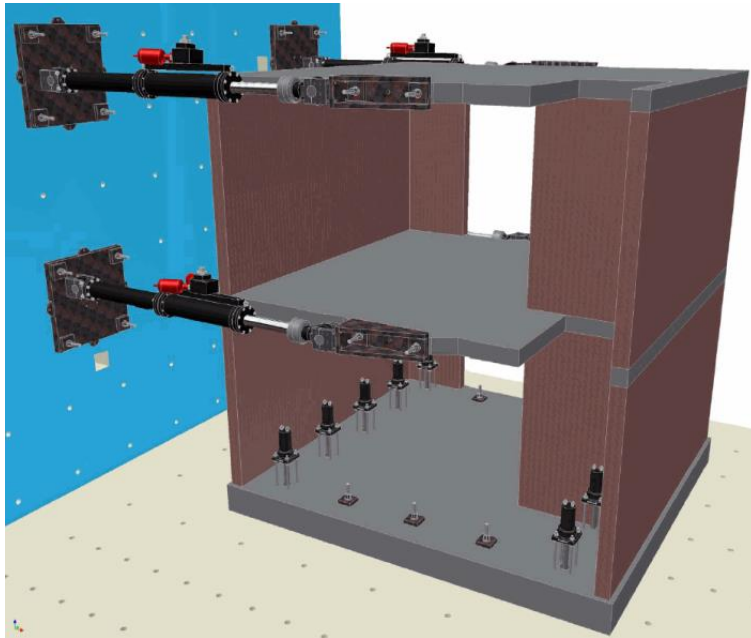
C. Chisari (2015), Inverse techniques for structural identification of masonry structures, PhD Thesis, University of Trieste

Domain decomposition e HPC



High Performance Computing

ESECMaSE project – test pseudo-dinamico

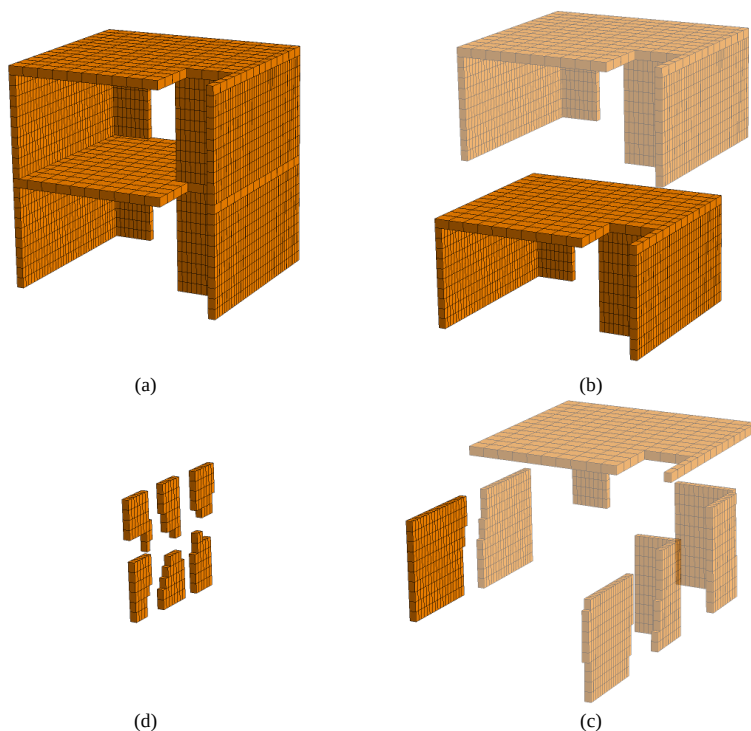


ESECMaSE: Enhanced Safety and efficient construction of Masonry Structures in Europe

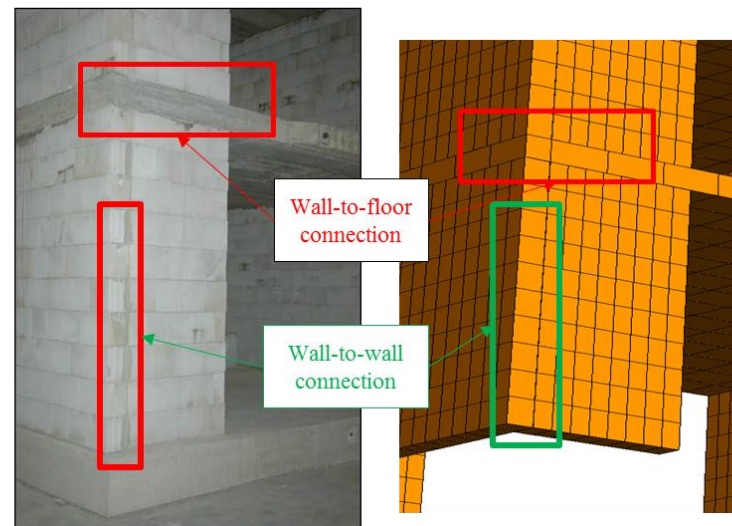
Funded by the European Commission within the 6th Framework-Programme, Horizontal Research Activities Involving SME's of the European Research Area, (ERA).

Modellazione FEM alla mesoscala

Hierarchical partitioning (3 levels) – 86 partitions overall

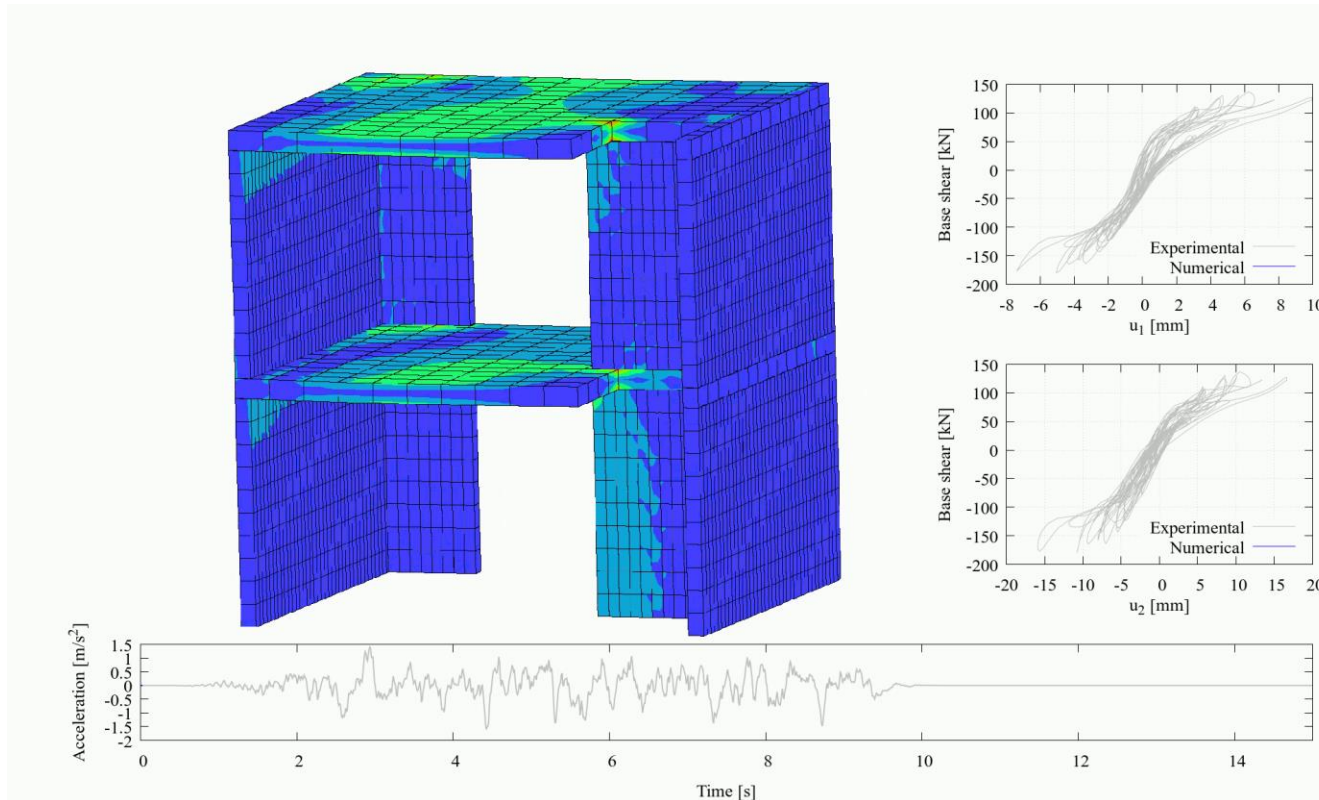


Mesh-tying between non-conforming meshes



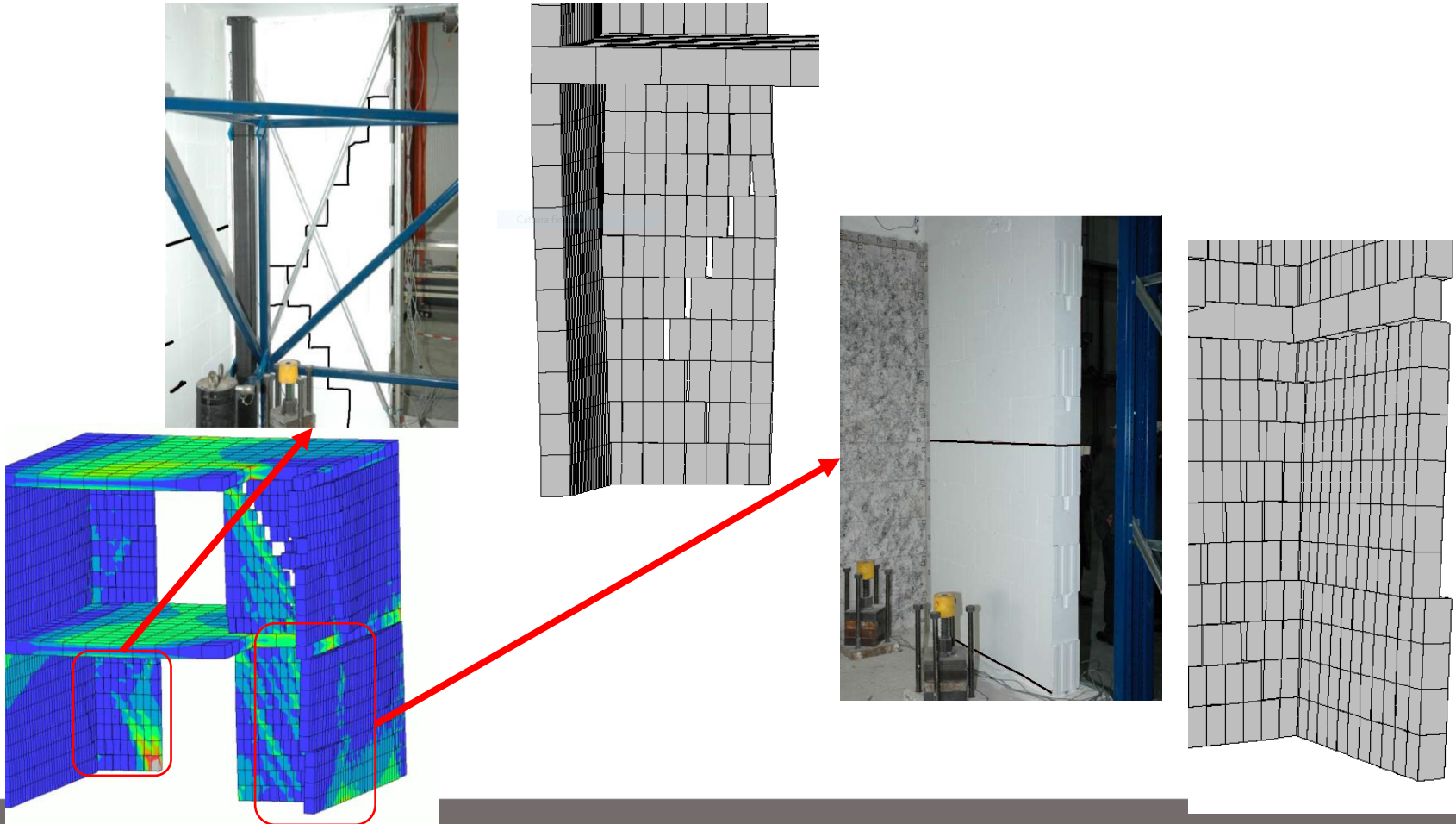
Chisari C, Macorini L, Izzuddin BA, 2021. Mesoscale Modeling of a Masonry Building Subjected to Earthquake Loading. ASCE Journal of Structural Engineering 147(1): 04020294

Nonlinear dynamic analysis response (PGA=0.12g)

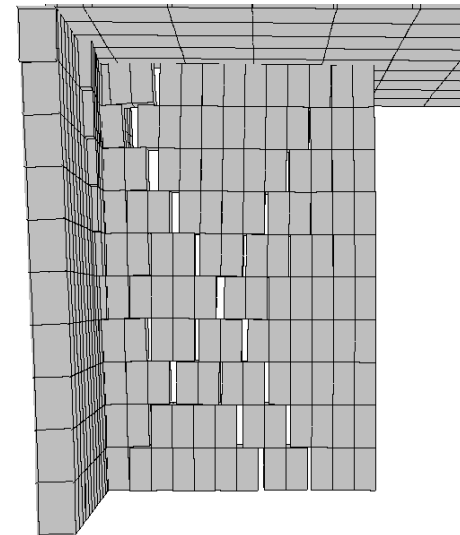
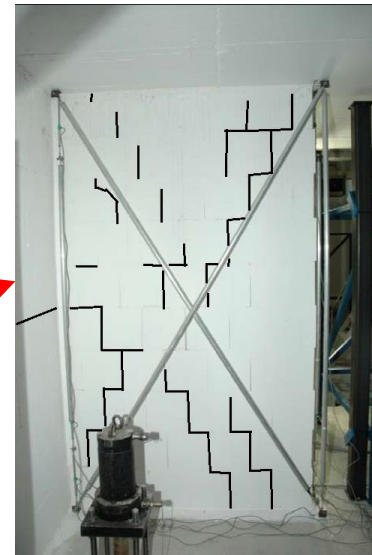
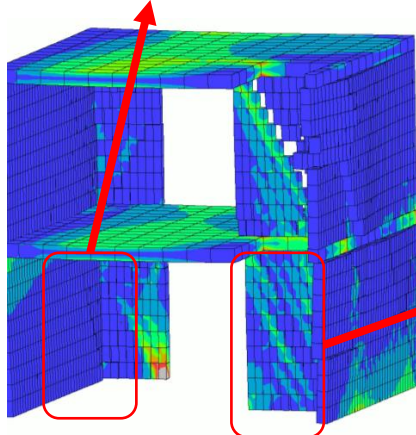
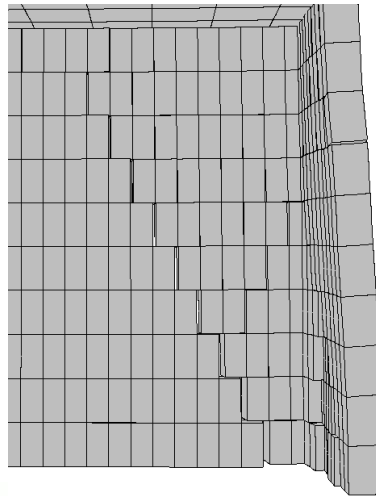


Chisari C, Macorini L, Izzuddin BA, 2021. Mesoscale Modeling of a Masonry Building Subjected to Earthquake Loading. ASCE Journal of Structural Engineering 147(1): 04020294

Stato fessurativo (1)



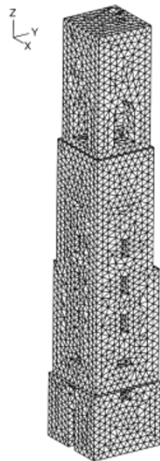
Stato fessurativo (2)



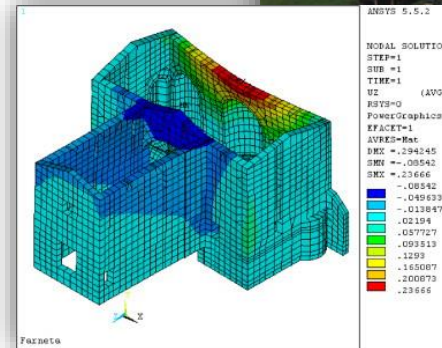
Modellazione FEM

Macro-modellazione (meccanica del continuo)

- Media le proprietà di malta e mattone in termini tensionali e deformativi
- Deve tenere conto di differenti proprietà in trazione e compressione e dell'anisotropia
- Può essere basata sulla teoria della plasticità o del danno

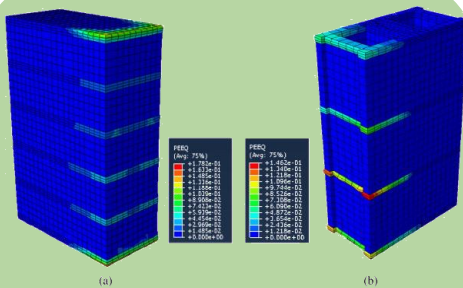


E. N. B. Santos Júlio, C. A. da Silva Rebelo, D. A. S. G. Dias-da-Costa. *Structural assessment of the tower of the University of Coimbra by modal identification*, Engineering Structures, 30(12), 2008, 3468 - 3477



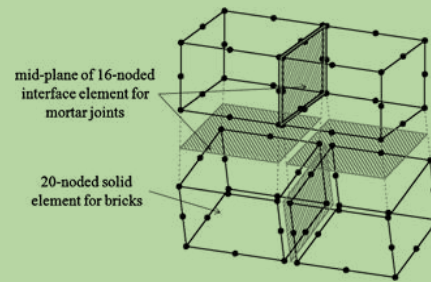
M. Betti, A. Vignoli, *Modelling and analysis of a Romanesque church under earthquake loading: Assessment of seismic resistance*, Engineering Structures, 30(2), 2008, 352 - 367

Micro-, meso- e macro-modellazione



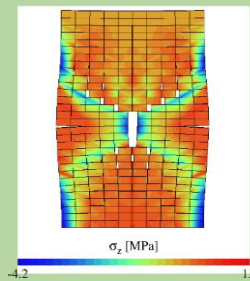
Moradabadi, E. et al. Construction and Building Materials, 77 (2015)

- Solo per analisi di piccolissime strutture
- Calibrazione dei singoli costituenti

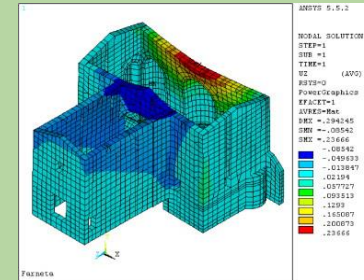


Macorini, L. and Izzuddin, B.. Int. J. Numer. Meth. Engrg. 85 (2011)

- Muri, piccole strutture
- Calibrazione dei singoli costituenti (con cautela)



Chisari, C. et al. International Journal of Solids and Structures. 146 (2018).



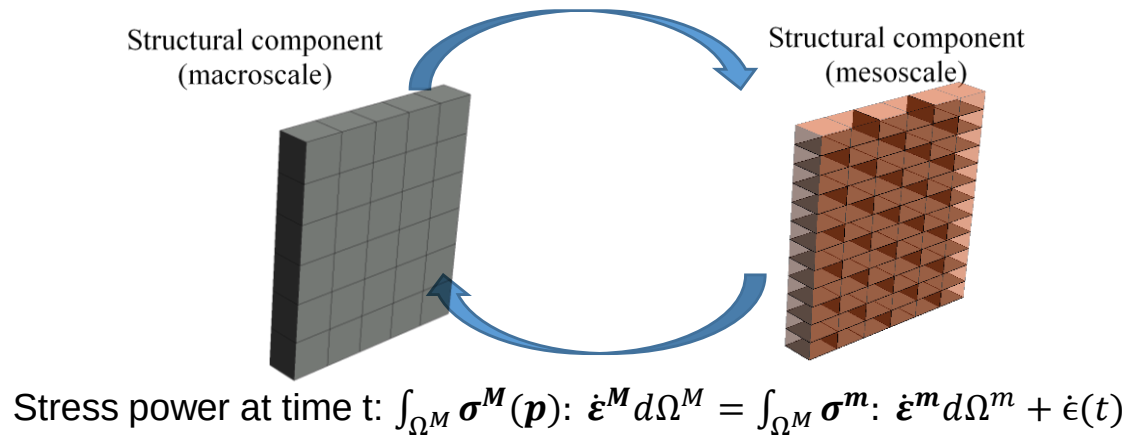
M. Betti, A. Vignoli, Engineering Structures, 30:2 (2008)

- Edifici/strutture complesse
- Calibrazione di interi componenti strutturali



Borri, A. et al. Construction and Building Materials, 25:12 (2011)

La transizione di scala



$$\tilde{p} = \arg \min_p \int_0^T [\dot{\epsilon}(t)]^2 dt$$

with p macroscale material properties

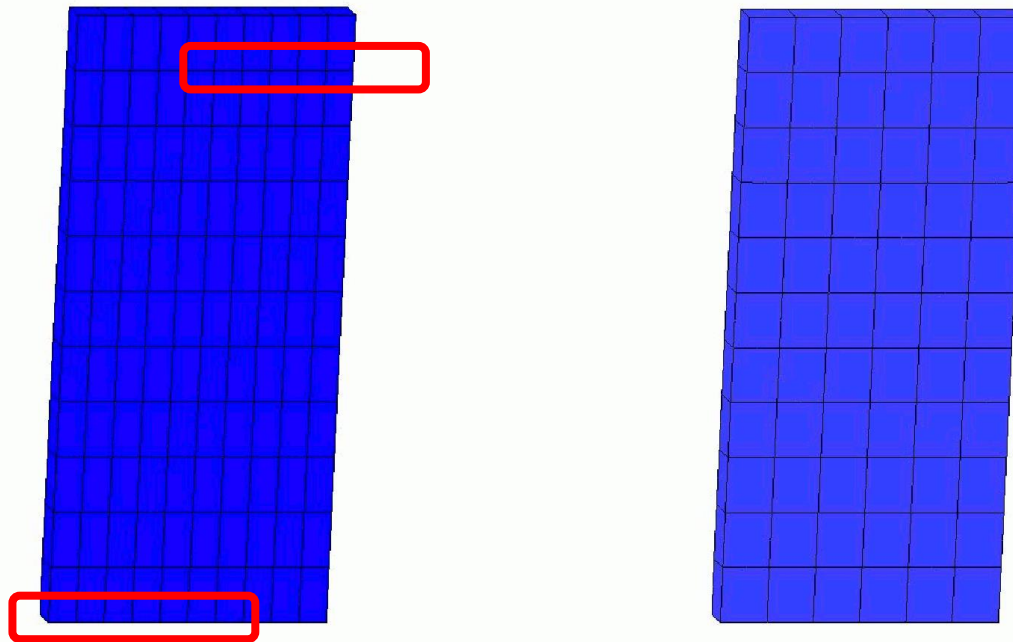


MultiCAMS

Multi-level Model Calibration for the Assessment of Historical Masonry Structures

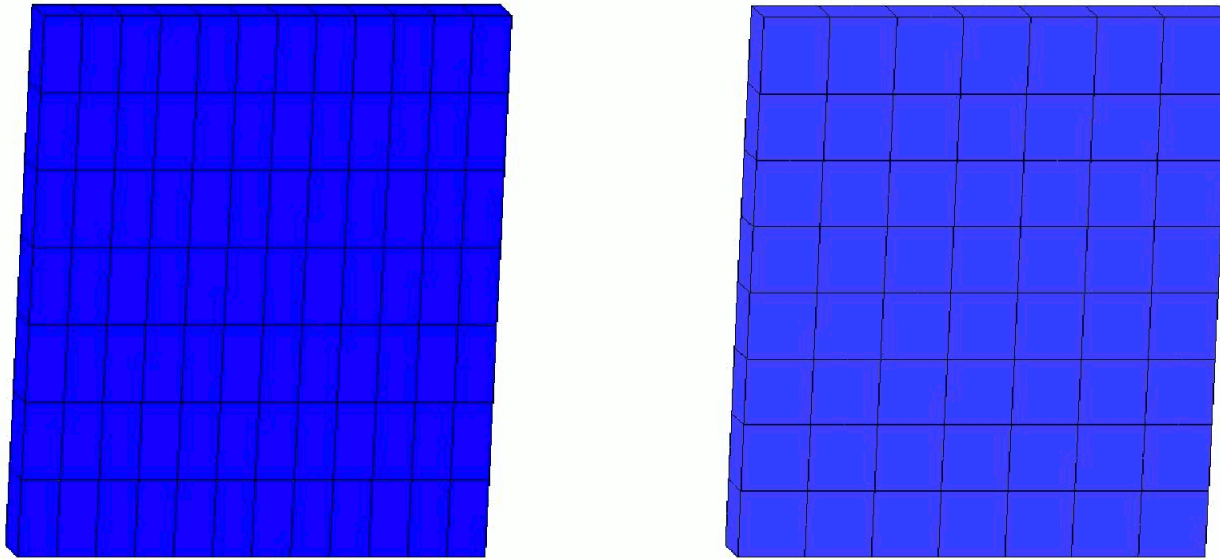
Funded by the European Commission within Horizon 2020, Marie Skłodowska-Curie Individual Fellowship

Confronto mesoscala vs. macroscala (test (a))



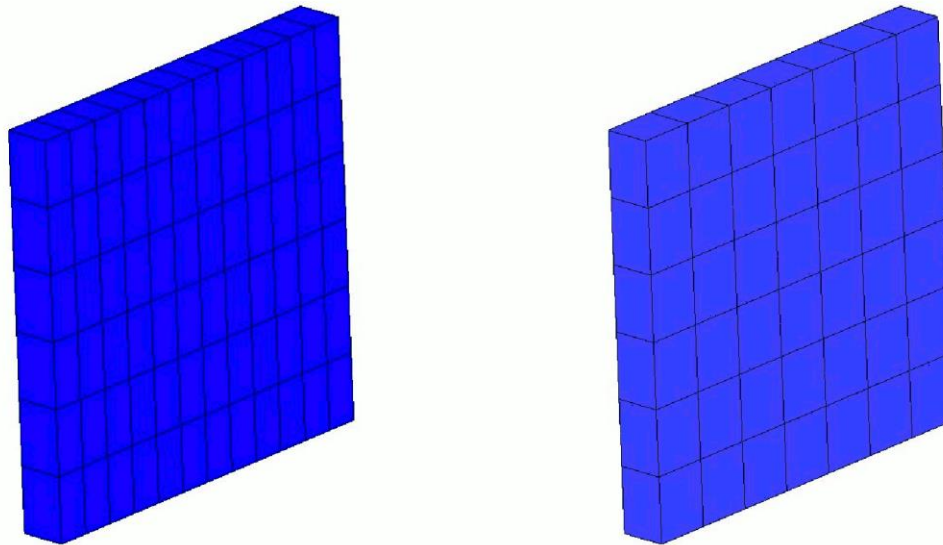
Chisari C, Macorini L, Izzuddin BA, 2020. Multiscale model calibration by inverse analysis for nonlinear simulation of masonry structures under earthquake loading. International Journal for Multiscale Computational Engineering 18(2):241–263

Confronto mesoscala vs. macroscala (test (b))



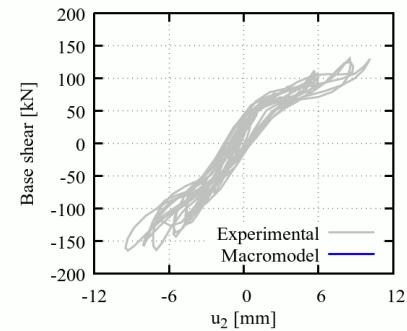
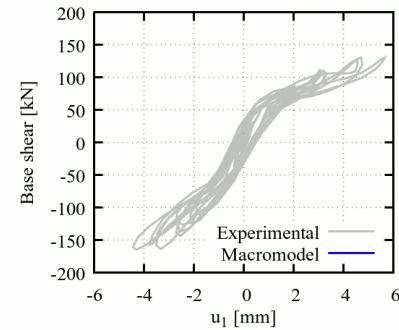
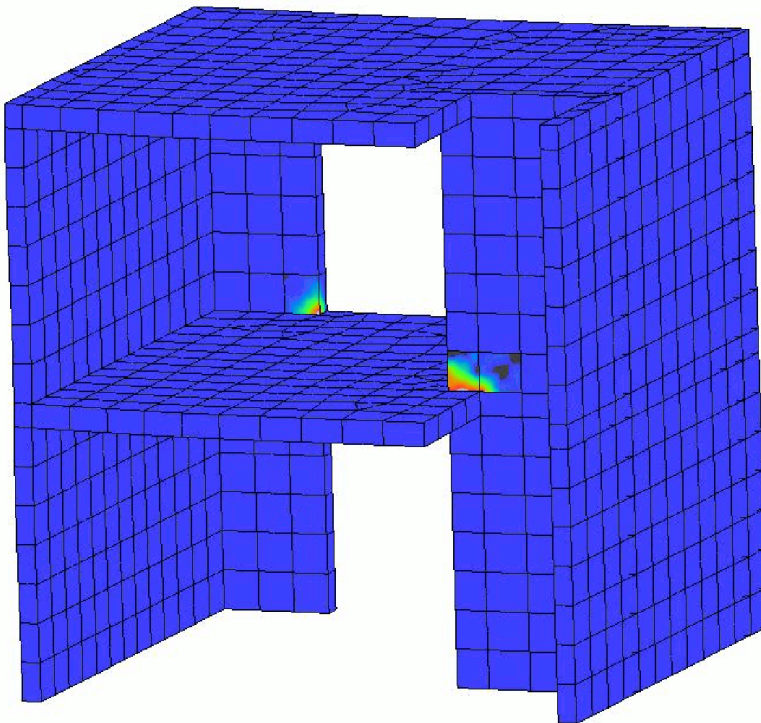
Chisari C, Macorini L, Izzuddin BA, 2020. Multiscale model calibration by inverse analysis for nonlinear simulation of masonry structures under earthquake loading. International Journal for Multiscale Computational Engineering 18(2):241–263

Confronto mesoscala vs. macroscale (test (c))

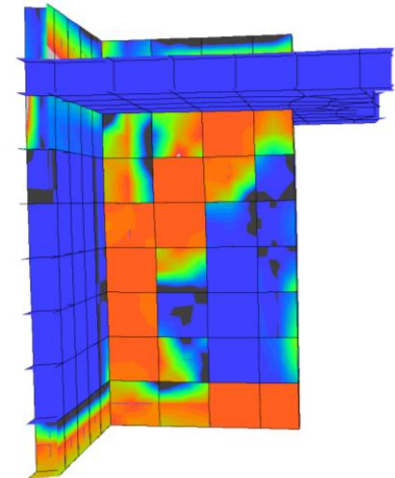
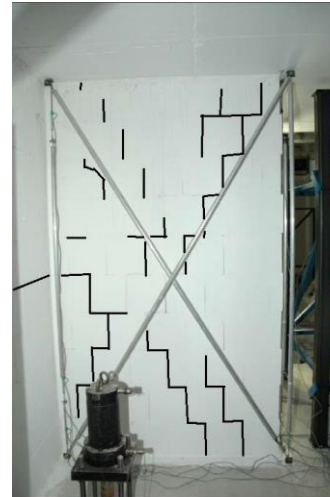
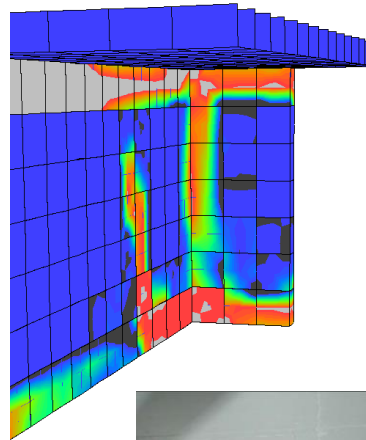


Chisari C, Macorini L, Izzuddin BA, 2020. Multiscale model calibration by inverse analysis for nonlinear simulation of masonry structures under earthquake loading. International Journal for Multiscale Computational Engineering 18(2):241–263

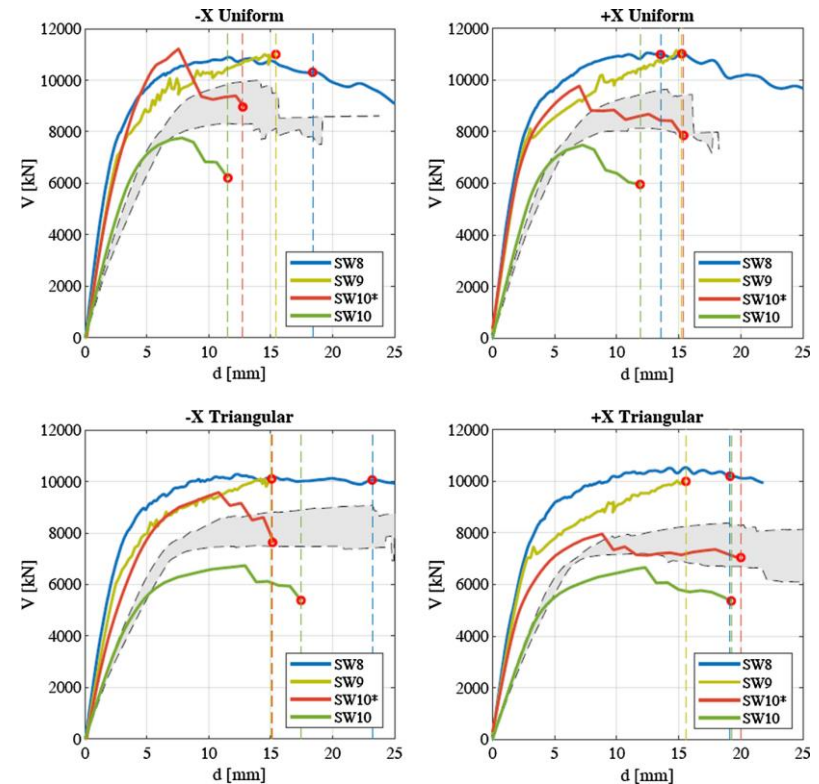
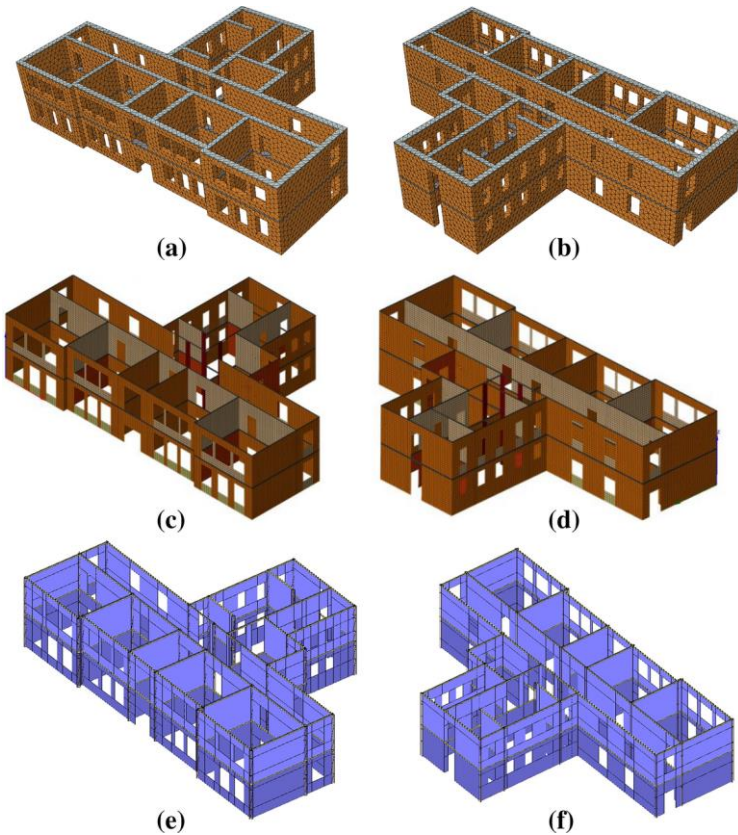
L'edificio sotto sisma



Stato fessurativo

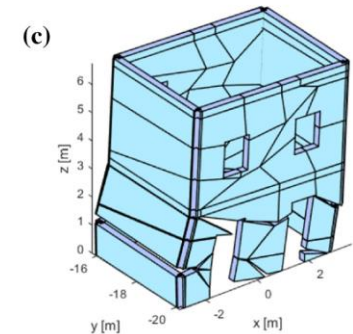
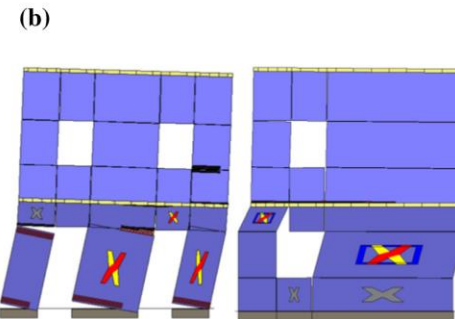
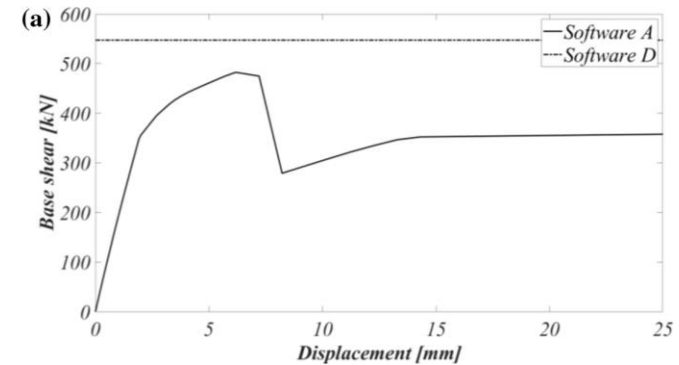
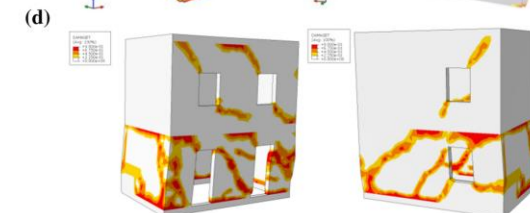
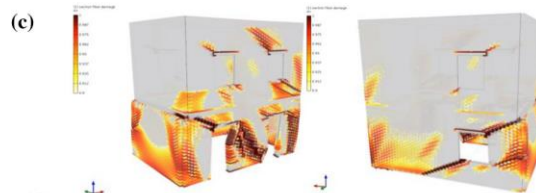
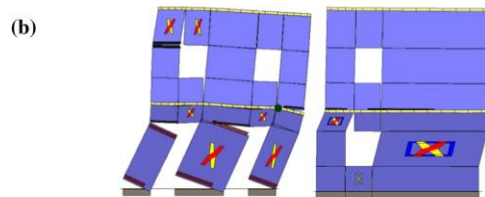
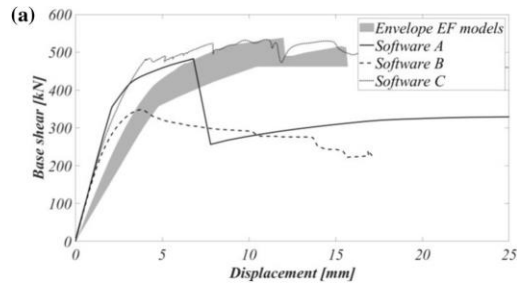


Studi comparativi



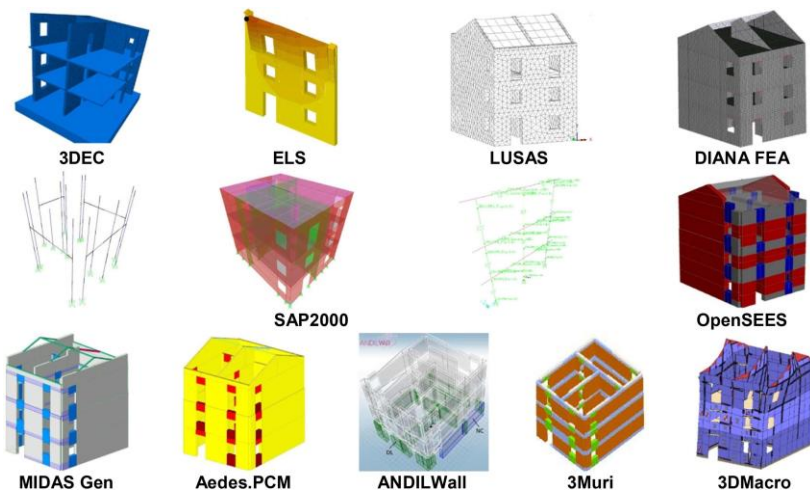
Castellazzi, G., Pantò, B., Occhipinti, G. *et al.* A comparative study on a complex URM building: part II—issues on modelling and seismic analysis through continuum and discrete-macroelement models. *Bull Earthquake Eng* 20, 2159–2185 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01147-4>

Studi comparativi

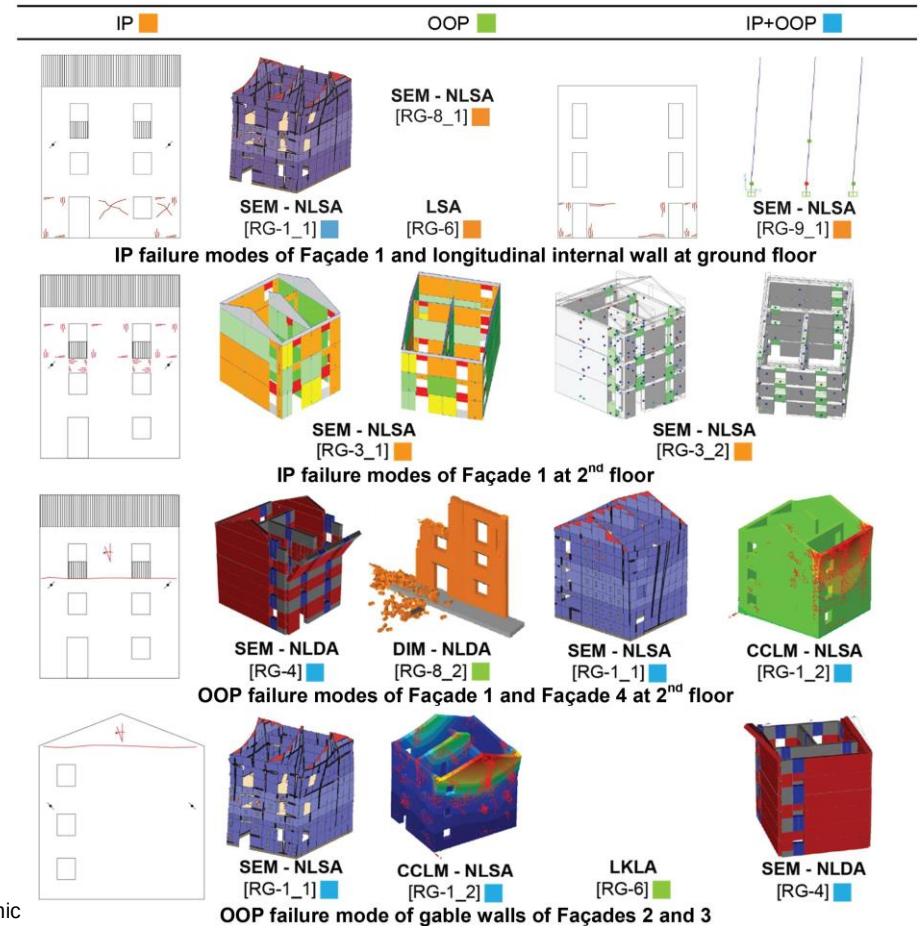


Cannizzaro, F., Castellazzi, G., Grillanda, N. *et al.* Modelling the nonlinear static response of a 2-storey URM benchmark case study: comparison among different modelling strategies using two- and three-dimensional elements. *Bull Earthquake Eng* **20**, 2085–2114 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s10518-021-01183-0>

Studi comparativi



F. Parisse, S. Cattari, R. Marques, P.B. Lourenço, G. Magenes, K. Beyer, B. Calderoni, G. Camata, E.A. Cordasco, M.A. Erberik, C. İçel, M. Karakaya, D. Malomo, C.F. Manzini, C. Marano, F. Messali, G. Occhipinti, B. Pantò, Ö. Saygılı, M. Sousamli, Benchmarking the seismic assessment of unreinforced masonry buildings from a blind prediction test, Structures, Volume 31, 2021, Pages 982-1005



I beni culturali e monumentali



Le Linee Guida (2010)

2.1 Strumenti per la valutazione della sicurezza sismica a scala territoriale

L'attuazione di politiche di prevenzione sismica richiede la conoscenza, a scala territoriale, del rischio cui sono soggetti i manufatti esistenti ed in particolare il patrimonio tutelato.

2.2 Criteri per la valutazione della sicurezza sismica e dell'efficacia dell'intervento

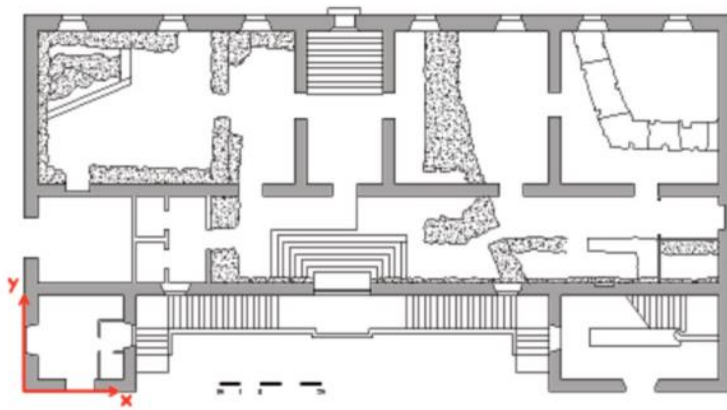
Per i beni culturali tutelati è necessario attenersi ad interventi di miglioramento, a riparazioni o ad interventi locali (punto 8.4 delle NTC).

Il livello LV1 consente la valutazione dell'azione sismica allo SLV attraverso **metodi semplificati**, basati su un numero limitato di parametri geometrici e meccanici o che utilizzano dati qualitativi (interrogazione visiva, lettura dei caratteri costruttivi, rilievo critico e stratigrafico).

- LV2 (riparazione o intervento locale) – valutazioni da adottare in presenza di interventi locali su zone limitate del manufatto, che non alterano in modo significativo il comportamento strutturale accertato, per le quali sono suggeriti metodi di analisi locale; in questo caso la valutazione dell'azione sismica allo SLV per l'intero manufatto, comunque richiesta, viene effettuata con gli strumenti del livello LV1;
- LV3 (intervento di miglioramento) – progetto di interventi diffusi nella costruzione, che per quanto possibile non dovrebbero modificare il funzionamento strutturale accertato attraverso il percorso della conoscenza (§ 4); le valutazioni devono riguardare l'intero manufatto, e possono utilizzare un **modello strutturale globale**, nei casi in cui questo possa essere ritenuto attendibile, o i metodi di analisi locale previsti per il livello LV2, purché applicati in modo generalizzato su tutti gli elementi della costruzione (l'esperienza acquisita a seguito dei passati eventi sismici ha infatti mostrato come, per gli edifici storici in muratura, il collasso sia raggiunto, nella maggior parte dei casi, per **perdita di equilibrio di porzioni limitate** della costruzione, definite nel seguito macroelementi). Il livello di valutazione LV3 può essere utilizzato anche quando, in assenza di un progetto di intervento, venga comunque richiesta un'accurata valutazione della sicurezza sismica del manufatto.

Metodi LV1

- Palazzi e ville



Esempi applicativi – Roma, Antiquarium Palatino

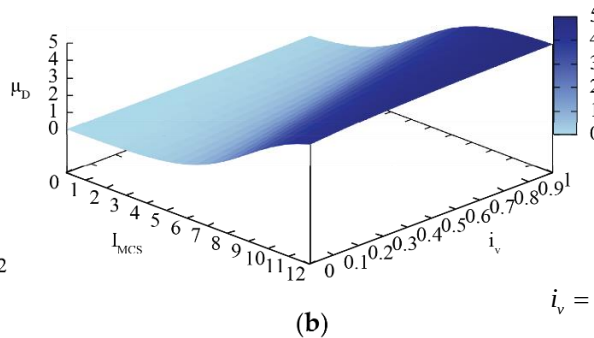
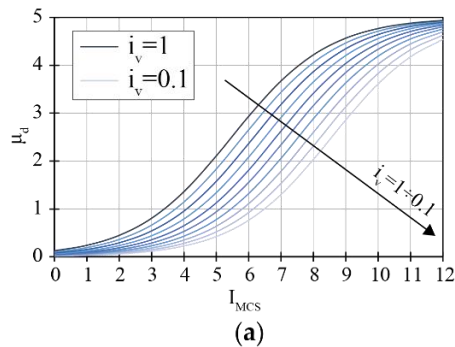
$$S_{e,SLV} = \frac{qF_{SLV}}{e^* M}$$

$$F_{SLV,xi} = \frac{\mu_{xi} \xi_{xi} \zeta_x A_{xi} \tau_{di}}{\beta_{xi} \kappa_i}$$

		Direzione x					Direzione y		
		Piano 0	Piano 1	Piano 2			Piano 0	Piano 1	Piano 2
M_i	(kg)	1973336	2537572	1694997	M_i	(kg)	1973336	2537572	1694997
e^*	(-)		0.86		e^*	(-)		0.86	
κ_i	(-)	1.00	0.83	0.50	κ_i	(-)	1.00	0.83	0.50
σ_{0i}	(N/cm ²)	43.06	40.14	19.42	σ_{0i}	(N/cm ²)	43.06	40.14	19.42
τ_{di}	(N/cm ²)	17.90	17.43	15.05	τ_{di}	(N/cm ²)	17.90	17.43	15.05
A_{xi}	(m ²)	98.24	68.46	62.82	A_{yi}	(m ²)	61.33	46.00	26.97
y_{ci}	(m)	9.45	10.53	10.75	x_{ci}	(m)	18.45	19.15	21.47
y_{gi}	(m)	10.06	10.29	10.61	x_{gi}	(m)	17.92	18.31	18.68
e_{xi}	(m)	0.60	0.24	0.14	e_{yi}	(m)	0.53	0.84	2.79
β_{xi}	(-)	1.15	1.06	1.04	β_{yi}	(-)	1.05	1.09	1.25
μ_{xi}	(-)	0.90	0.83	0.90	μ_{yi}	(-)	0.88	0.85	0.86
ξ_{xi}	(-)	1.00	0.80	0.80	ξ_{yi}	(-)	1.00	0.80	1.00
$F_{SLV,xi}$	(kN)	13728	8972	13015	$F_{SLV,yi}$	(kN)	9118	6026	5614
$S_{e,SLV}$	(g)	0.787	0.514	0.746	$S_{e,SLV}$	(g)	0.523	0.345	0.322

Metodi LV1

• Chiese e luoghi di culto

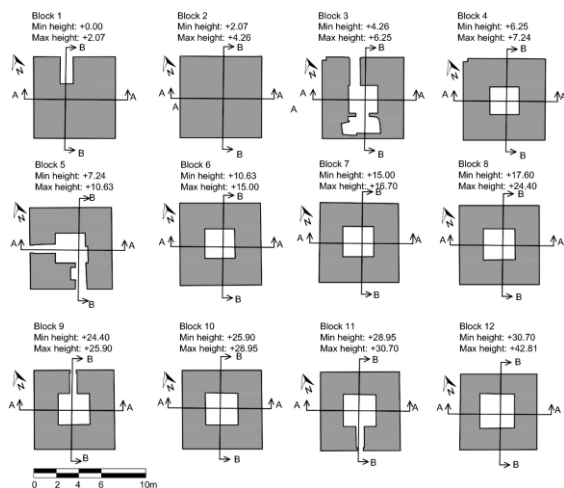


$$i_v = \frac{1}{6} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k \cdot (v_{k,i} - v_{k,p})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

Macro-Element	Damage Mechanism
Façade	M1. Façade overturning
	M2. Overturning of the top façade
	M3. In-plane mechanism of façade
Naves	M4. Narthex
	M5. Transversal response
	M6. Shear mechanisms in the lateral walls
	M7. Longitudinal response
	M8. Central nave vaults
	M9. Aisles vaults
Transept	M10. Overturning of the transept façade
	M11. Shear mechanisms in the transept wall
Triumphal arch	M12. Transept vaults
	M13. Triumphal arch
Dome	M14. Dome
	M15. Lantern
Apse	M16. Apse overturning
	M17. Shear mechanisms in the apse
	M18. Apse vaults
Roof	M19. Mechanisms in nave roof
	M20. Mechanisms in transept roof
	M21. Mechanisms in apse roof
Chapels and annexed bodies	M22. Chapel overturning
	M23. Shear mechanisms in chapels
	M24. Chapel vaults
	M25. Plain-height irregularities
	M26. Decorations
Bell tower	M27. Bell tower
	M28. Belfry

Metodi LV1

- Torri e campanili



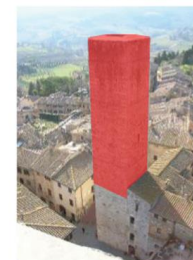
Model A
H = 42.80 m



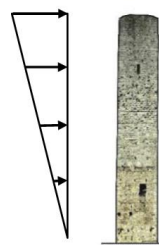
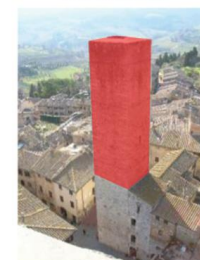
Model AB
H = 40.55 m



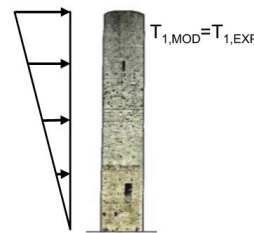
Model B
H = 27.80 m



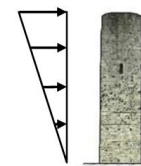
Model C
H = 26.10 m



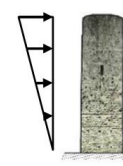
Model A, H = 42.80 m



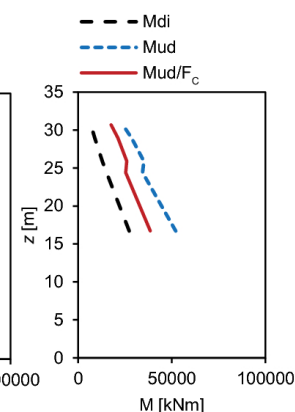
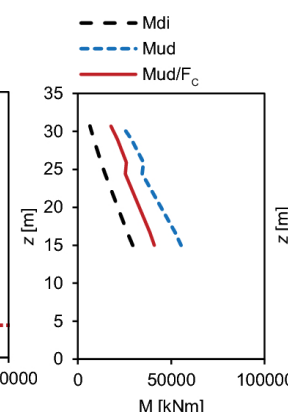
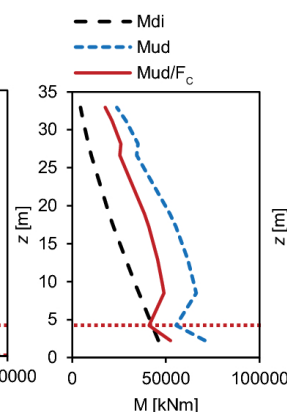
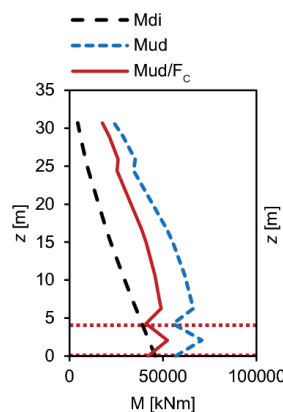
Model AB, H = 40.55 m



Model B, H = 27.80 m



Model C, H = 26.10 m



Conclusioni



Conclusioni

- La muratura è un materiale dal comportamento strutturale complesso, caratterizzato dall'interazione dei suoi componenti
- Tante strategie di modellazione disponibili per le strutture in muratura, ognuna con propri pregi, difetti e campi di applicazione
- Esistono in ambito di ricerca strategie ibride che massimizzano i vantaggi
- Ancora molti problemi aperti:
 - Robustezza e obiettività delle analisi
 - Calibrazione dei modelli meccanici
 - Test sperimentali mirati e possibilmente non invasivi
 - Metodi semplificati per utilizzo ordinario
 - Metodi semplificati alla larga scala
 - ...



Associazione Italiana Software Tecnico

www.aistonline.it

corrado.chisari@unicampania.it
