



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

***Analisi e verifica sismica
di edifici in muratura:
punto della situazione
e recenti evoluzioni***

***STATI GENERALI
DELLA MURATURA***



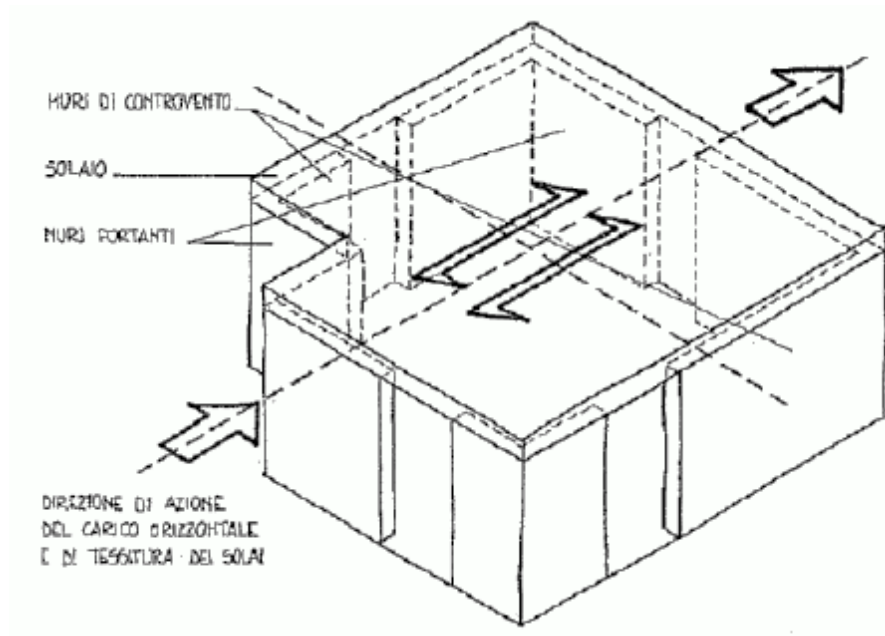
PROF. ING.
SERGIO LAGOMARSINO

**Modellazione, analisi e verifica
di edifici in muratura:
problemi aperti
e soluzioni possibili**

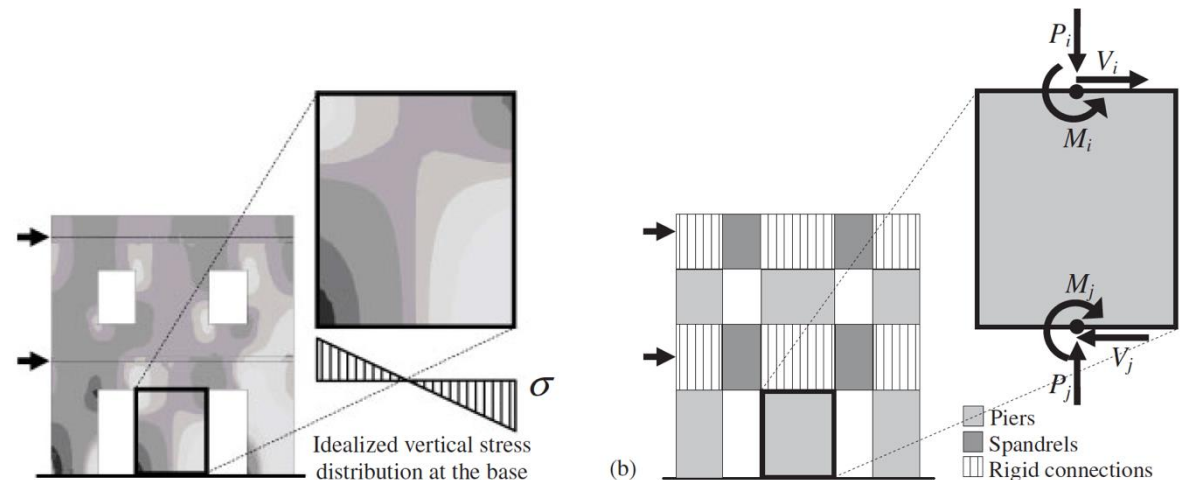
- Elevata vulnerabilità, testimoniata dai danni post-terremoto
- Complessità del comportamento strutturale:
 - Costruzioni non ingegnerizzate (regole dell'arte)
 - Trasformazioni, danni pregressi e degrado
 - Vulnerabilità aggiunta da interventi sbagliati
- Difficoltà di individuare uno schema strutturale:
 - Pareti: elementi bidimensionali, con possibilità di trascurare la risposta fuori dal piano, ma talvolta di spessore rilevante
 - Vincoli imperfetti tra le pareti (cantonali/martelli) e tra pareti e solai (monolateri con attrito)
 - Identificazione dello stato di sollecitazione nello stato di fatto: effetti legati alla viscosità e alle fasi costruttive, che influenzano la resistenza a taglio

Necessità di una modellazione accurata

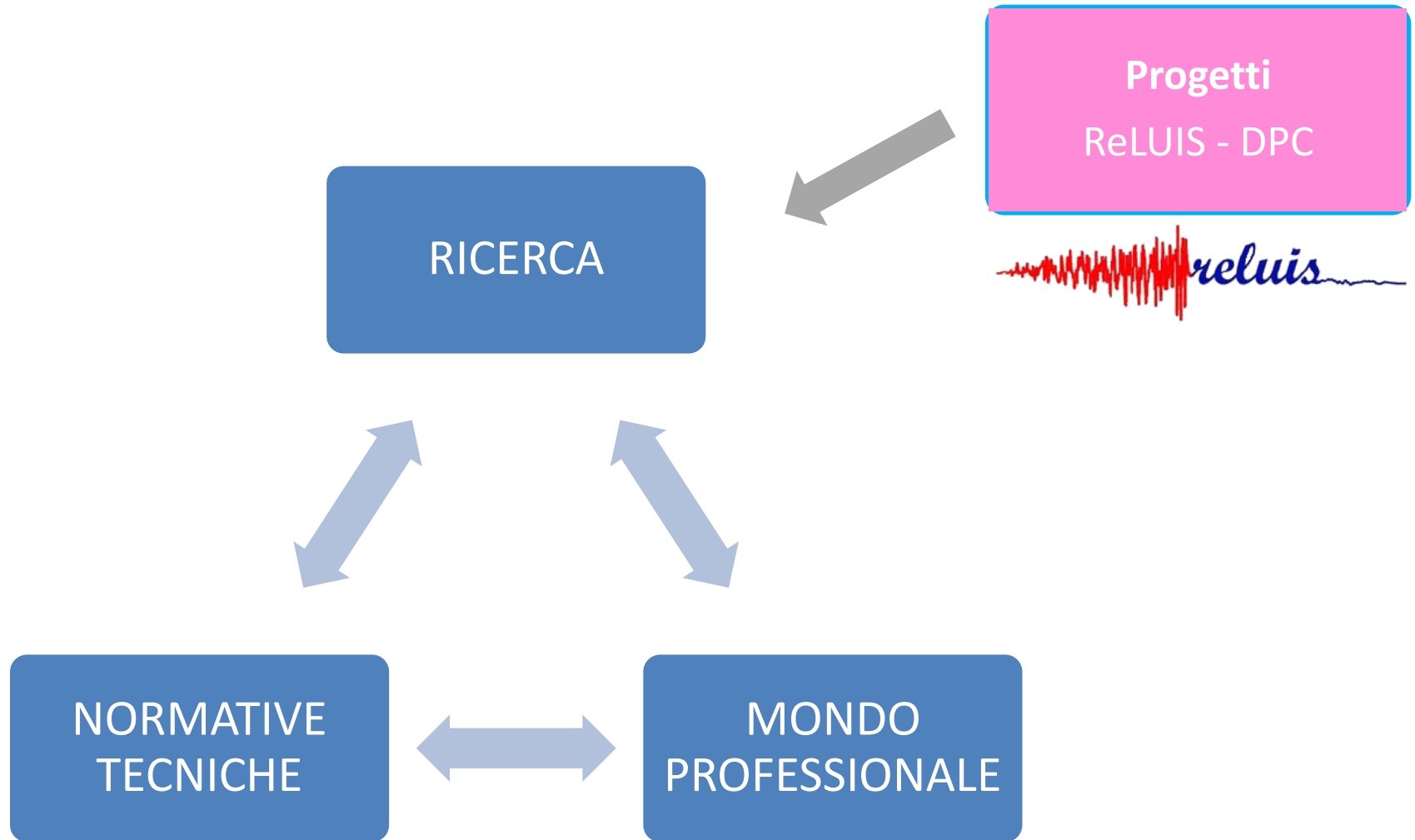
- 1980 - Terremoto in Irpinia: Adeguamento sismico verificato attraverso il metodo POR (analisi incrementale a collasso)



- 1980 - Terremoto in Irpinia: Adeguamento sismico verificato attraverso il metodo POR (analisi incrementale a collasso)
- 1986: Miglioramento sismico (importanza del giudizio qualitativo)
- 1997 - Terremoto Umbria-Marche: riconoscimento e verifica dei meccanismi locali con l'analisi limite (nonlinearità geometrica)
- 2002 - Terremoto in Molise: emanazione della OPCM 3274/2003 (analisi pushover)



- 1980 - Terremoto in Irpinia: Adeguamento sismico verificato attraverso il metodo POR (analisi incrementale a collasso)
- 1986: Miglioramento sismico (importanza del giudizio qualitativo)
- 1997 - Terremoto Umbria-Marche: riconoscimento e verifica dei meccanismi locali con l'analisi limite (nonlinearità geometrica)
- 2002 - Terremoto in Molise: emanazione della OPCM 3274/2003 (analisi pushover)
- 2009 - Terremoto de L'Aquila: entrata in vigore delle NTC 2008 (e Circolare 2009), con importanza alle indagini e alla conoscenza
- 2018: aggiornamento NTC e revisione dell'EC8-Parte 3 (in corso), modellazione fasce murarie, edifici irregolari, solai deformabili ...



Eurocodice 8 – Design of structures for earthquake resistance Part 3: Assessment and retrofitting of buildings and bridges

- Project Team 3: Andreas Kappos (leader), Christis Chrisostomous, Paolo Franchin, Tatjana Isakovic, Sergio Lagomarsino, Telemakos Panagiotakos

Mandato: aggiornare le procedure di modellazione, analisi e verifica tenendo conto dei recenti sviluppi della ricerca, promuovendo l'uso dell'analisi nonlineare.

Circolare 2019 – Istruzioni per l'applicazione delle NTC 2018

- Impianto analogo alla precedente ma molto più organico ed esaustivo. In particolare:
 - sono fornite indicazioni per un'ampia varietà di situazioni, cercando di limitare la convenzionalità e di rappresentare la maggioranza delle costruzioni reali
 - è istituita una più stretta relazione tra rilievo e conoscenza degli aspetti costruttivi e valutazioni della sicurezza sismica

Difficoltà di proporre modelli e formule di verifica per tutte le tipologie di edifici esistenti. Una norma deve porsi l'obiettivo di coprire l'80% del costruito e deve essere applicata in forma non cogente, specie su edifici «non ingegnerizzati» (i modelli sono in Circolare).

- Edificio isolato, con buoni collegamenti, maglia regolare di muri di spina, elevata percentuale di aperture regolari, solai di rigidezza significativa



- Edificio isolato, con buoni collegamenti, maglia regolare di muri di spina, elevata percentuale di aperture regolari, solai di rigidezza significativa
- Edificio isolato ma senza uno o più dei precedenti requisiti



- Edificio isolato, con buoni collegamenti, maglia regolare di muri di spina, elevata percentuale di aperture regolari, solai di rigidità significativa
- Edificio isolato ma senza uno o più dei precedenti requisiti
- Aggregated masonry buildings in historical centres (interactions)
- Edifici a tipologia specialistica: palazzi storici; conventi; teatri; chiese; torri

La Circolare delinea un percorso organico e completo per l'edificio isolato, ma i modelli proposti possono essere utilizzati anche negli altri casi.

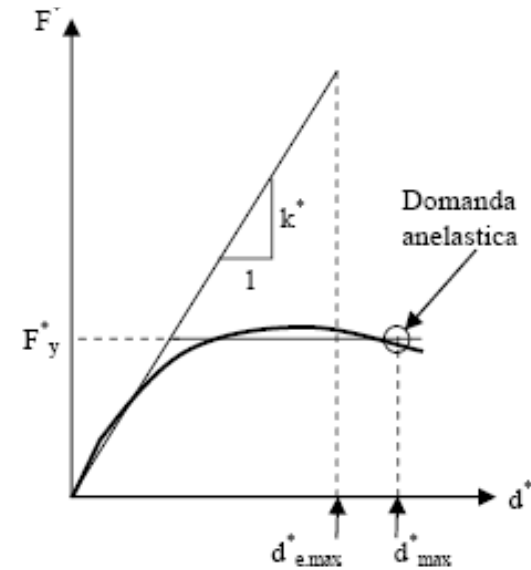
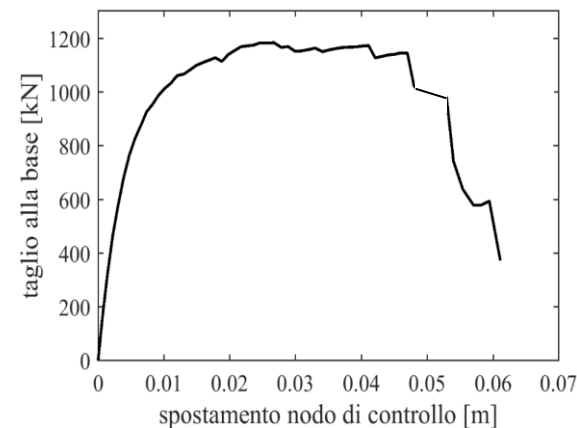
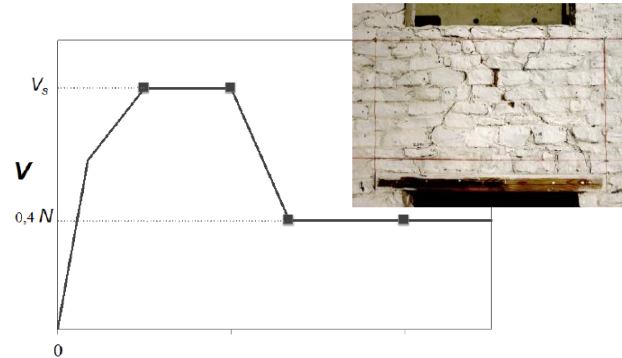
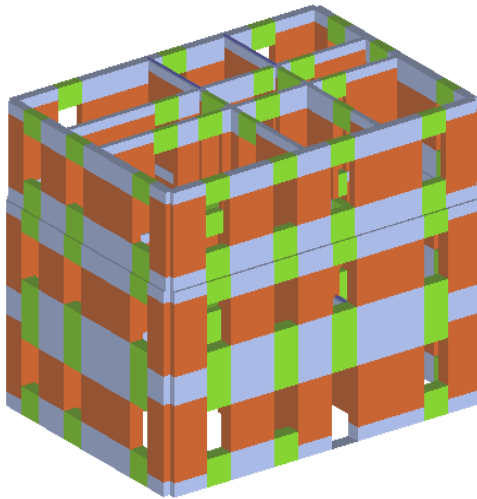


CONOSCENZA

MODELLAZIONE

ANALISI

VERIFICA



- MODELLO GLOBALE:
 - Se la costruzione ha un comportamento d'assieme (maglia di pareti murarie, di diaframmi orizzontali e di efficaci collegamenti tra gli stessi), la risposta sismica può essere descritta da un modello globale. Nell'edificio residenziale si realizza il "comportamento scatolare" e si può fare affidamento solo sulla **risposta nel piano delle pareti (più rigide e resistenti)**. In strutture di altra tipologia (storico-monumentali) è possibile e talvolta necessario fare riferimento ad un modello unico, considerando però **l'interazione tra risposta nel piano e fuori dal piano**.
- SUDDIVISIONE IN MACROELEMENTI:
 - Costruzioni in muratura come le chiese, per l'assenza di muri di spina interni (a meno di colonnati tra le navate) e orizzontamenti intermedi (a meno delle eventuali volte), possono essere studiate con **modelli di sottostrutture, distribuendo opportunamente la totalità delle azioni sismiche tra questi**. Anche nel caso di edifici, se i solai sono flessibili, ciascuna parete deve essere verificata indipendentemente. In questa suddivisione in macroelementi, alcuni di questi possono ovviamente rispondere anche fuori dal piano (è il caso di edifici con una maglia diradata di muri di spina e solai deformabili, nei quali alcune pareti sopportano le azioni fuori dal piano).

	Metodi	Statico	Dinamico	
	Lineare	Forze equivalenti	Modale (spettrale)	PROGETTAZIONE
VALUTAZIONE	Nonlineare	Pushover	Time-history analysis	VALIDAZIONE

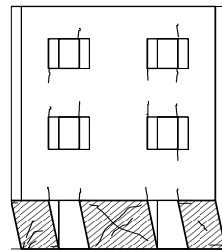
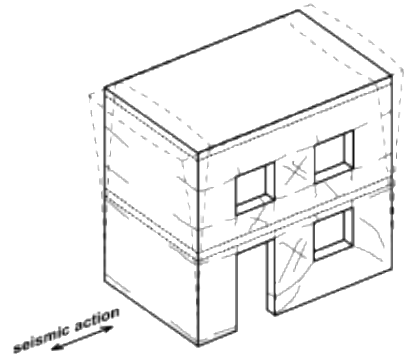
- ANALISI GLOBALE:

- Ha l'obiettivo di valutare come il complesso delle azioni sismiche nella costruzione (ovvero, considerando tutte le masse presenti) è sopportato garantendo adeguate prestazioni e trasferito in fondazione.
- Nella modellazione per macroelementi, la globalità delle azioni sismiche è distribuita tra essi e verificata (l'analisi secondo due direzioni ortogonali può portare ad una diversa suddivisione e ciascun elemento può rispondere nel piano o fuori dal piano).

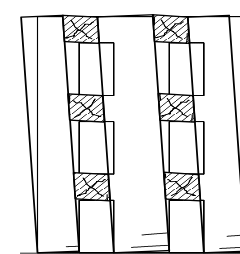
- MECCANISMI LOCALI:

- Sono i meccanismi che non sono descritti dall'analisi globale, ad esempio perché si usa un modello che considera solo la risposta nel piano delle pareti, si assumono efficaci alcuni collegamenti (da verificare separatamente) o alcuni elementi non sono inseriti nel modello globale (parapetti, vele ed altri elementi svettanti). Questi meccanismi devono essere verificati con modelli locali opportuni.

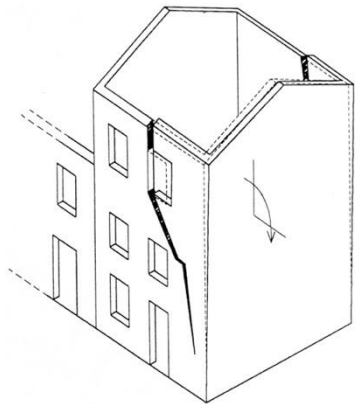
Risposta nel piano delle pareti



Strong Spandrels
Weak Piers



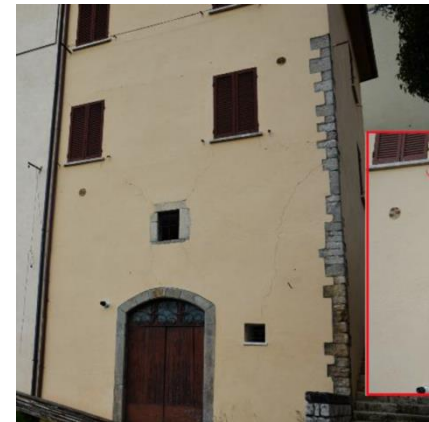
Strong Piers
Weak Spandrels



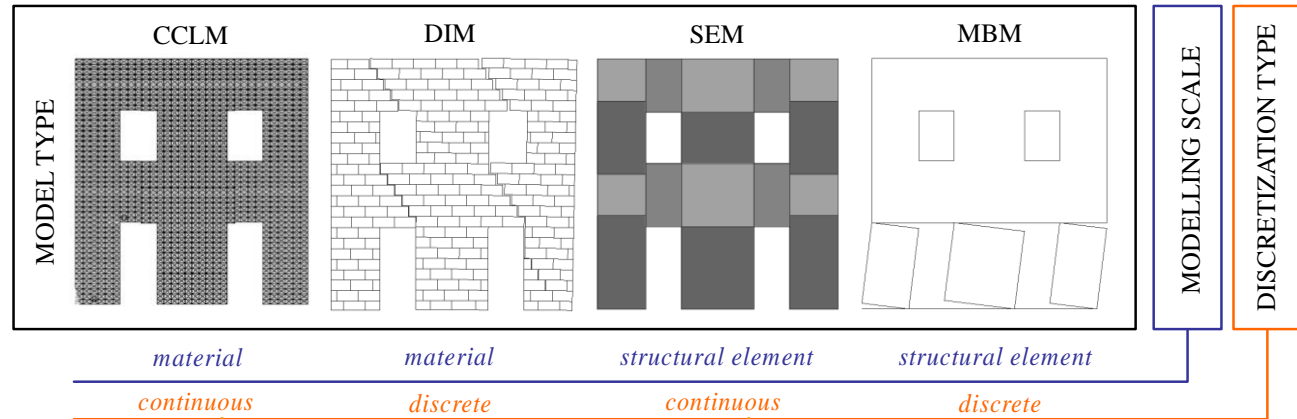
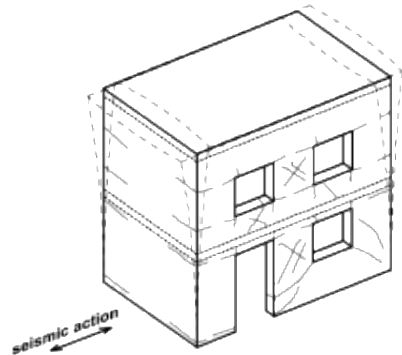
Risposta fuori dal piano

Resistenza e deformazione muratura
(nonlinearità del materiale / drift)

Perdita di equilibrio / forma e vincoli
(nonlinearità geometrica)

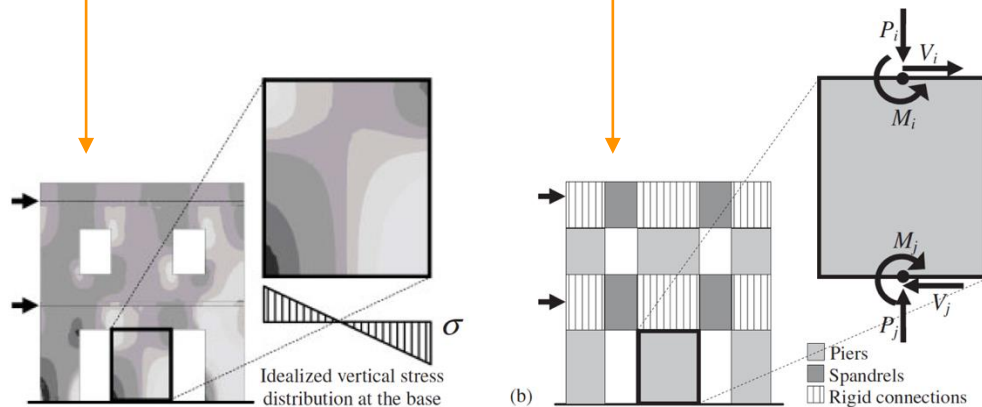


Risposta nel piano delle pareti

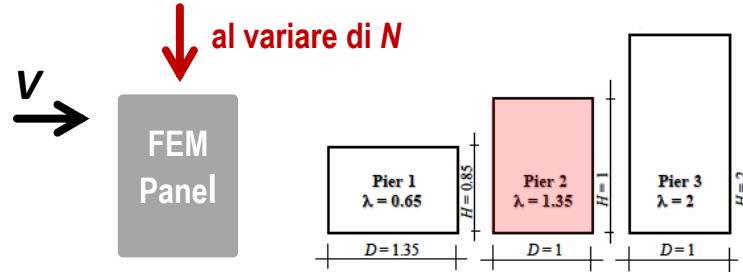


Analisi FEM:

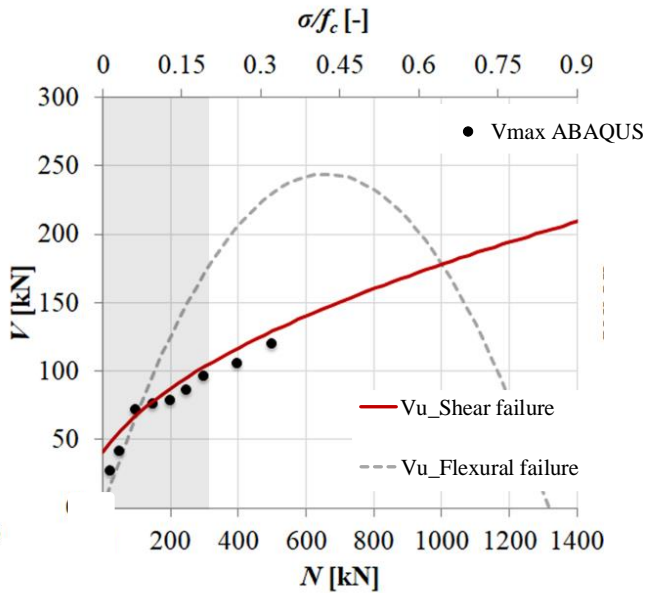
- In fase elastica: non richiede l'individuazione a-priori dei pannelli murari (integrazione delle tensioni su sezioni)
- In fase nonlineare: calibrazione legami costitutivi sulla risposta di pannelli tipo; check del drift su pannelli scelti a-posteriori



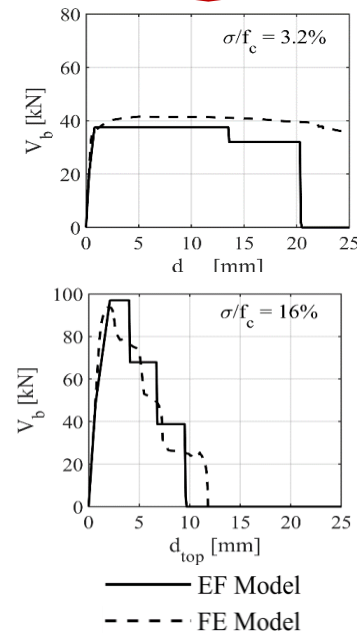
Criteria di resistenza e limiti deformativi a scala del pannello



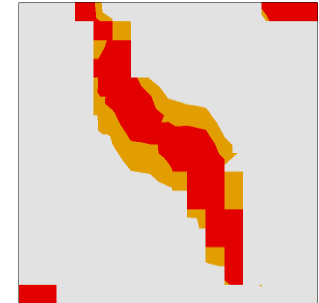
DOMINIO DI RESISTENZA



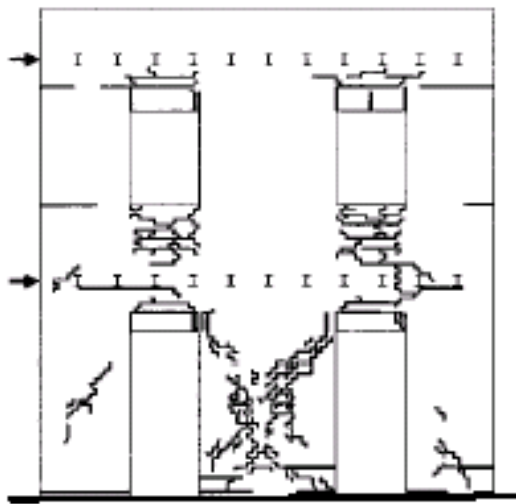
RISPOSTA POST-PICCO



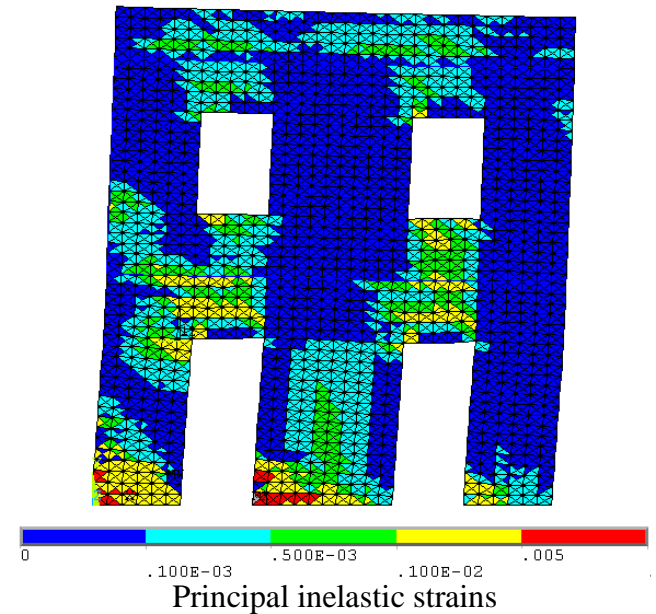
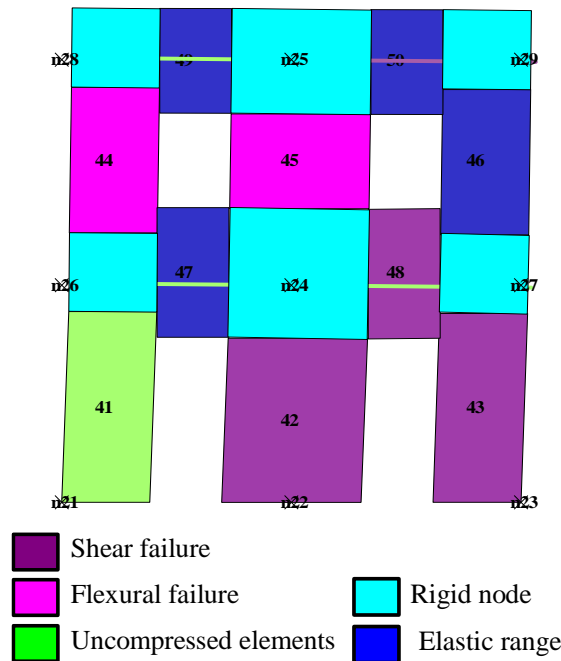
INTERPRETAZIONE DANNO

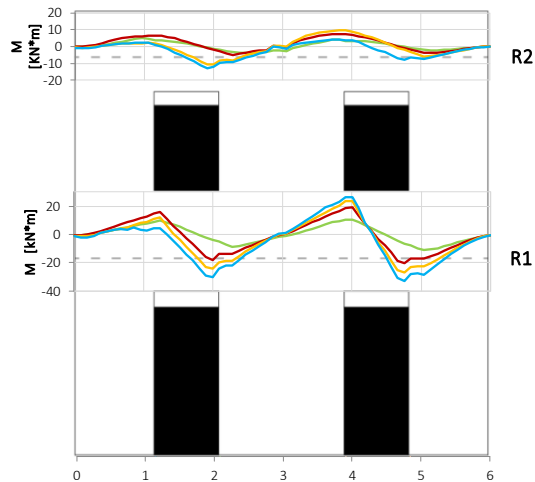
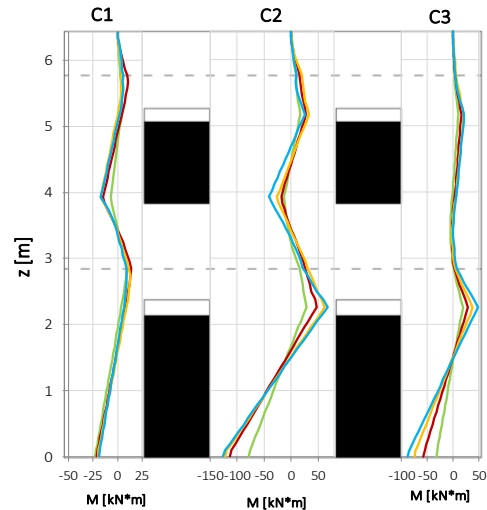


Simulazione di una prova su un prototipo in scala reale, effettuata a Pavia

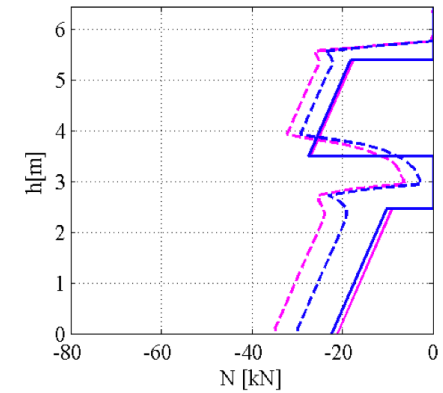
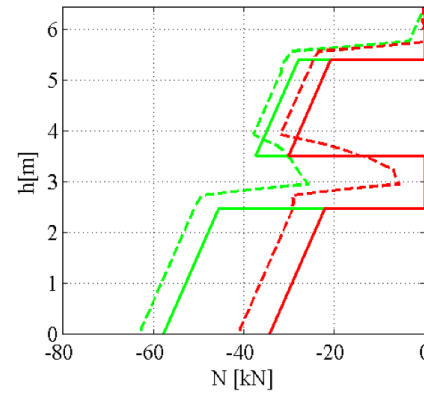


$dx = 15 \text{ mm}$



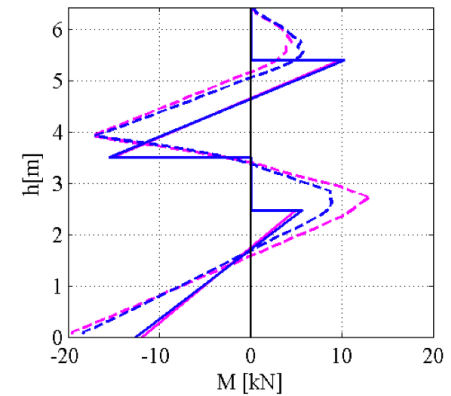
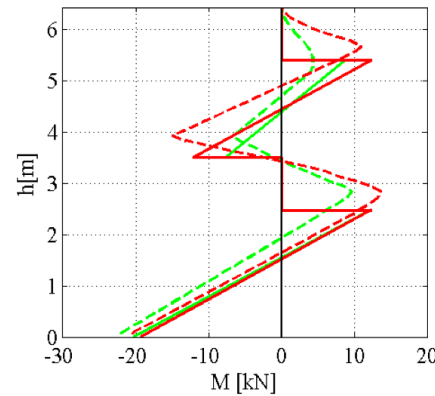


C1 - Sollecitazioni



Sforzo normale – STEP 1 e 2

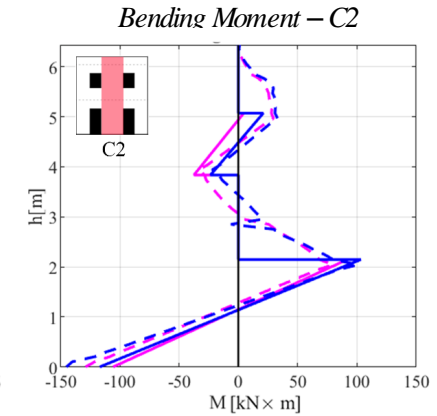
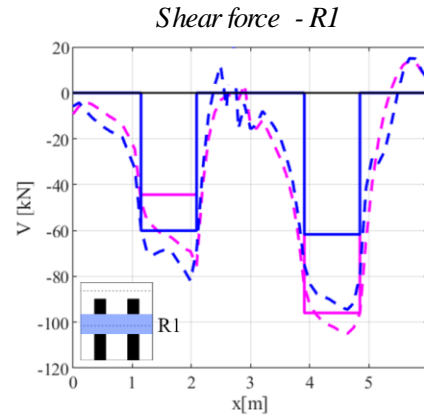
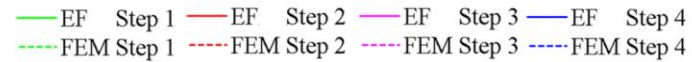
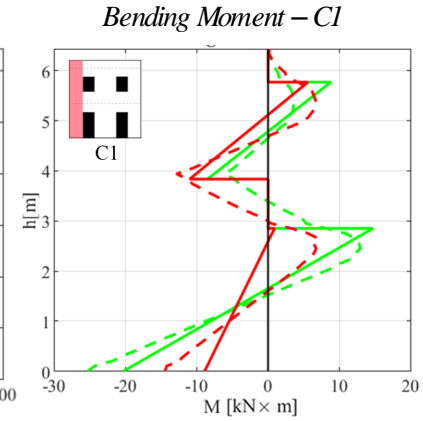
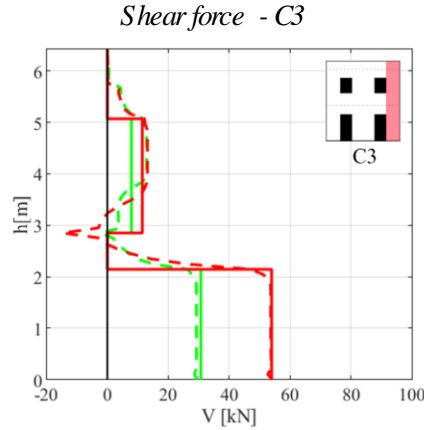
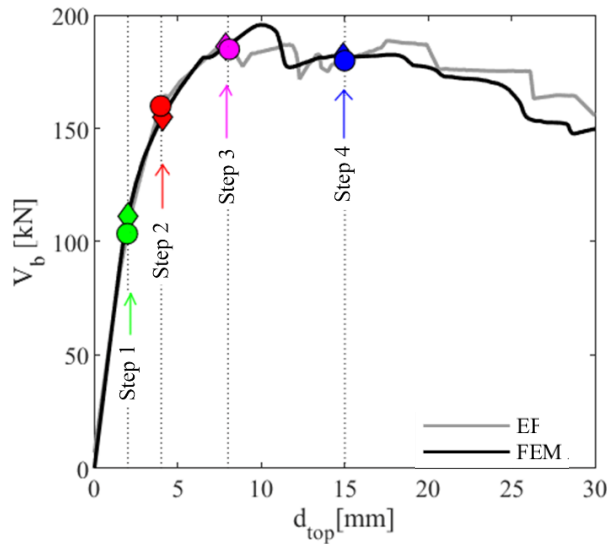
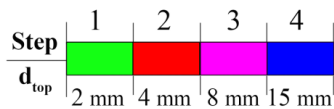
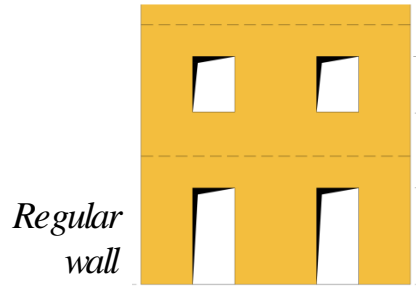
Sforzo normale – STEP 3 e 4



Momento flettente – STEP 1 e 2

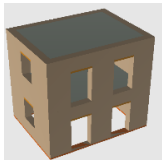
Momento flettente – STEP 3 e 4

- EFM Step 1
- EFM Step 2
- EFM Step 3
- EFM Step 4
- - FEM Step 1
- - FEM Step 2
- - FEM Step 3
- - FEM Step 4



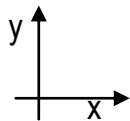
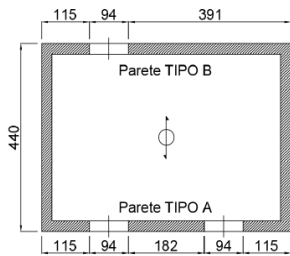
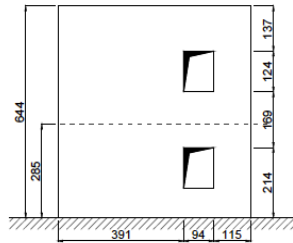
Camilletti PhD tesi, 2019

Il telaio equivalente in pareti irregolari

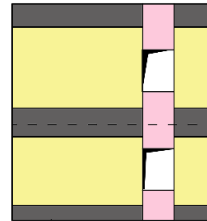
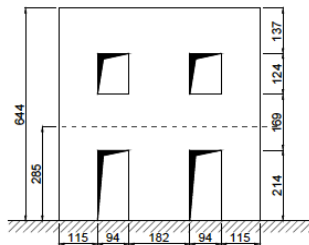


2-STOREY SIMPLE MASONRY BUILDING

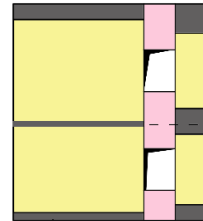
Parete TIPO B



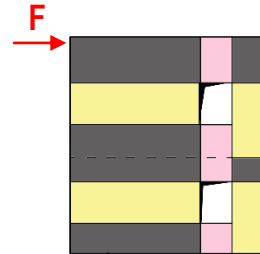
Parete TIPO A



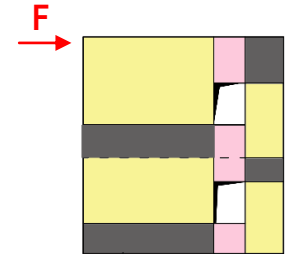
Lagomarsino et al (2013)



Dolce (1991)

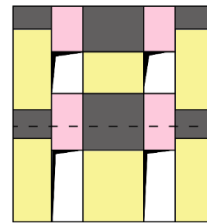


Augenti (2006)

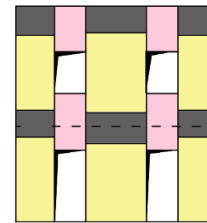


Moon et al (2006)

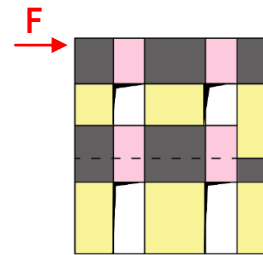
- Pier
- Spandrel
- Rigid node



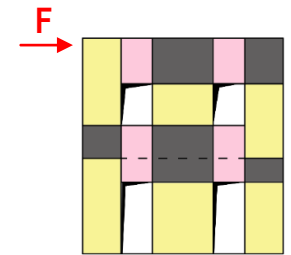
Lagomarsino et al (2013)



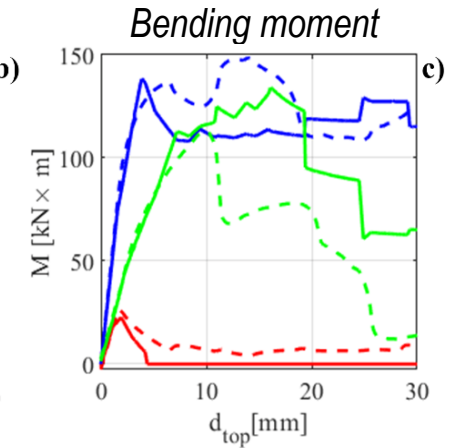
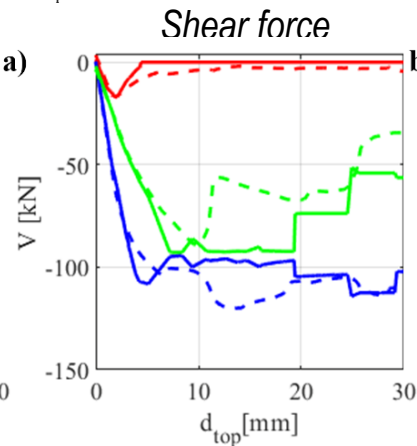
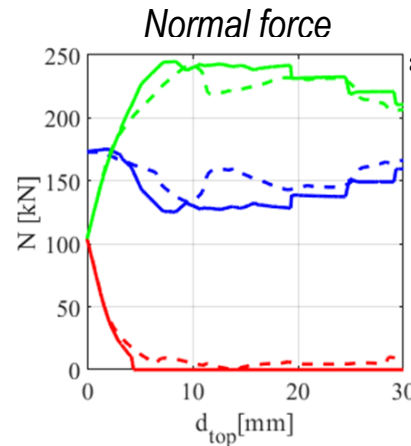
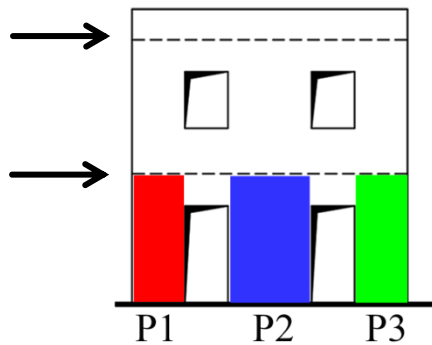
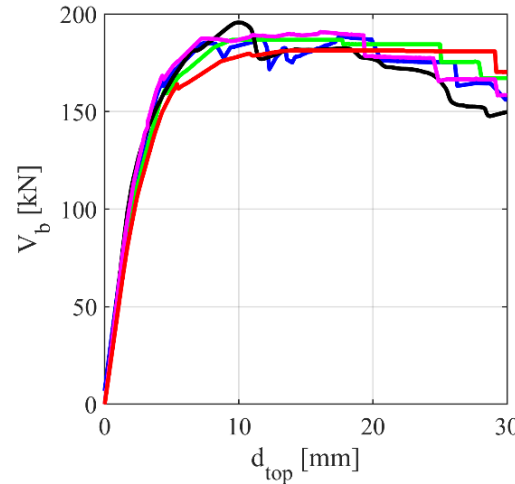
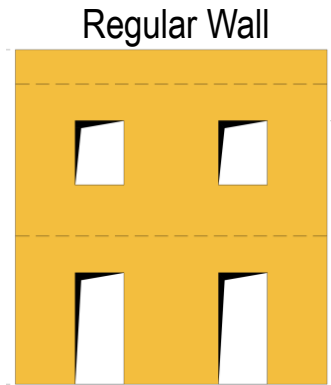
Dolce (1991)



Augenti (2006)

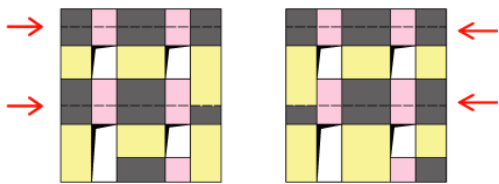
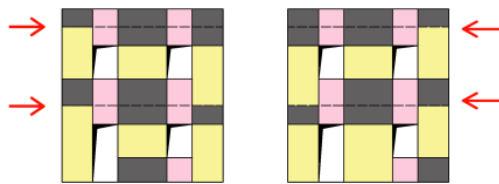
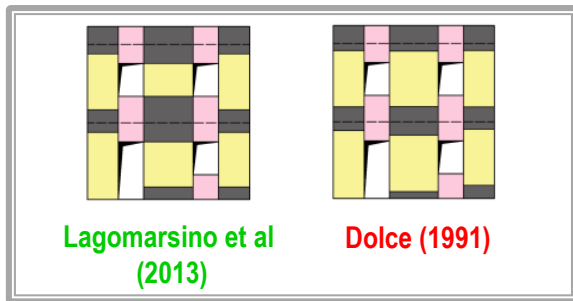
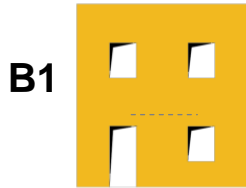


Moon et al (2006)

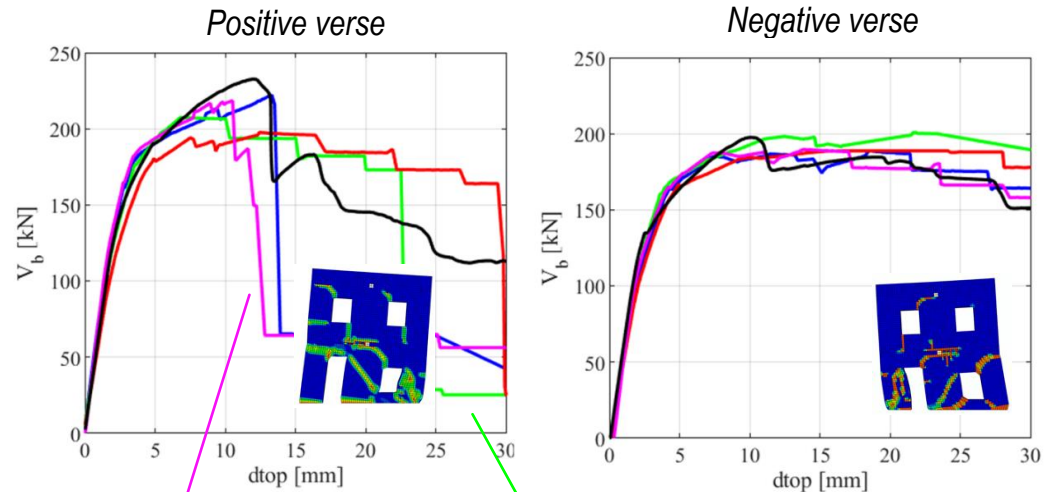
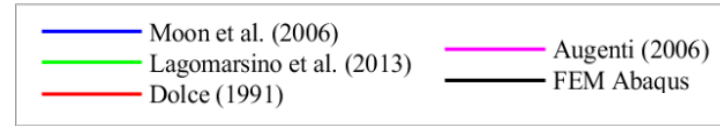


— EF Base section P1 — EF Base section P2 — EF Base section P3
- - - FEM Base section P1 - - - FEM Base section P2 - - - FEM Base section P3

Il telaio equivalente in pareti irregolari

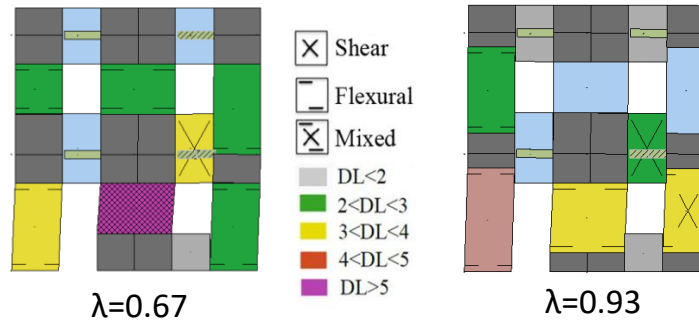


Augenti (2006)



Augenti (2006)

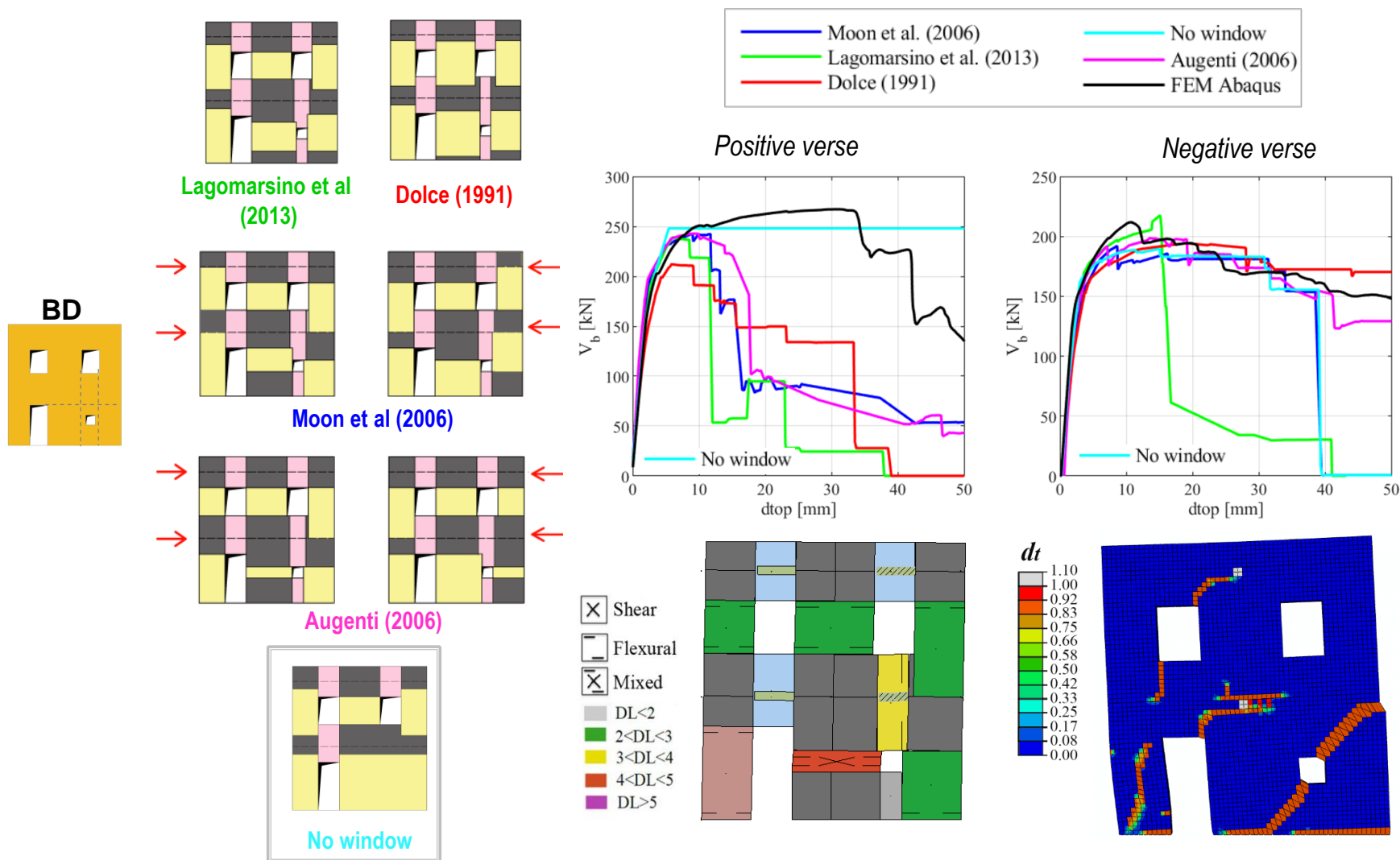
Lagomarsino et al (2013)



$\lambda=0.67$

$\lambda=0.93$

Il problema dei maschi con piccole aperture



Vantaggi:

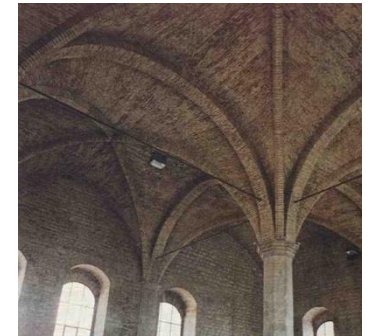
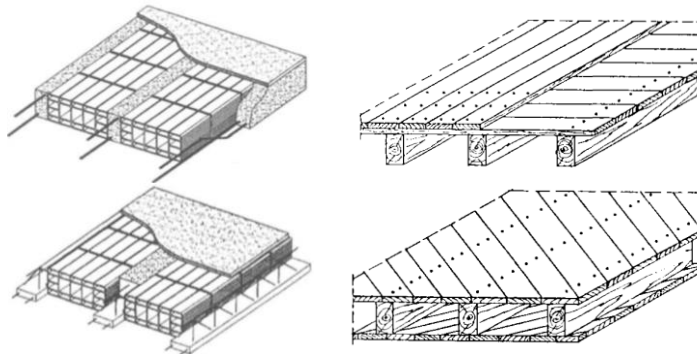
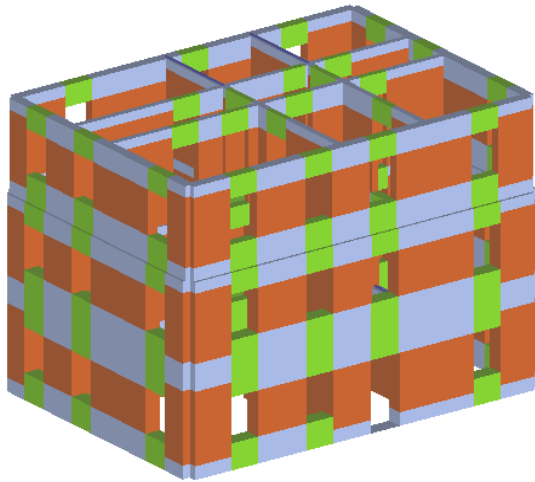
- possibilità di modellare grandi edifici con un ridotto onere computazionale
- coerenza con le prescrizioni normative in termini di criteri di resistenza e deformazione
- facile interpretazione dei meccanismi di comportamento fino al collasso

Limiti:

- difficoltà nella schematizzazione di pareti irregolari
- effetto flangia, interazione tra fasce e cordolo, ...

Importanza dei diaframmi orizzontali, classificati in Circolare 2019:

- a) infinitamente rigidi
- b) di rigidezza finita (in grado di trasferire le azioni tra le pareti)
- c) di rigidezza trascurabile (ciascuna parete porta le sue masse)



Rigidezza equivalente solai lignei: risultati disponibili in letteratura di campagne sperimentali, Valori suggeriti in documenti normativi internazionali (ASCE 41-13 2014, NZSEE 2015)

Valori base

NZSEE 2015

Table 10.8: Shear stiffness values[†] for straight sheathed vintage flexible timber floor diaphragms (Giongo et al., 2014)

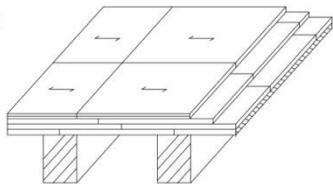
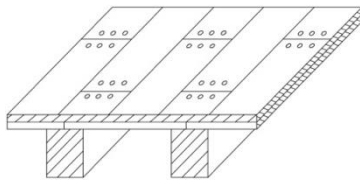
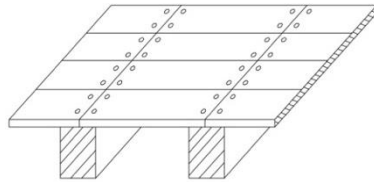
Direction of loading	Joist continuity	Condition rating	Shear stiffness [†] , G_d (kN/m)
Parallel to joists	Continuous or discontinuous joists	Good	350
		Fair	285
		Poor	225
Perpendicular to joists ^{††}	Continuous joist, or discontinuous joist with re...	Good	265
		Disco...	

Coeff. Moltiplicativi – stato consolidato

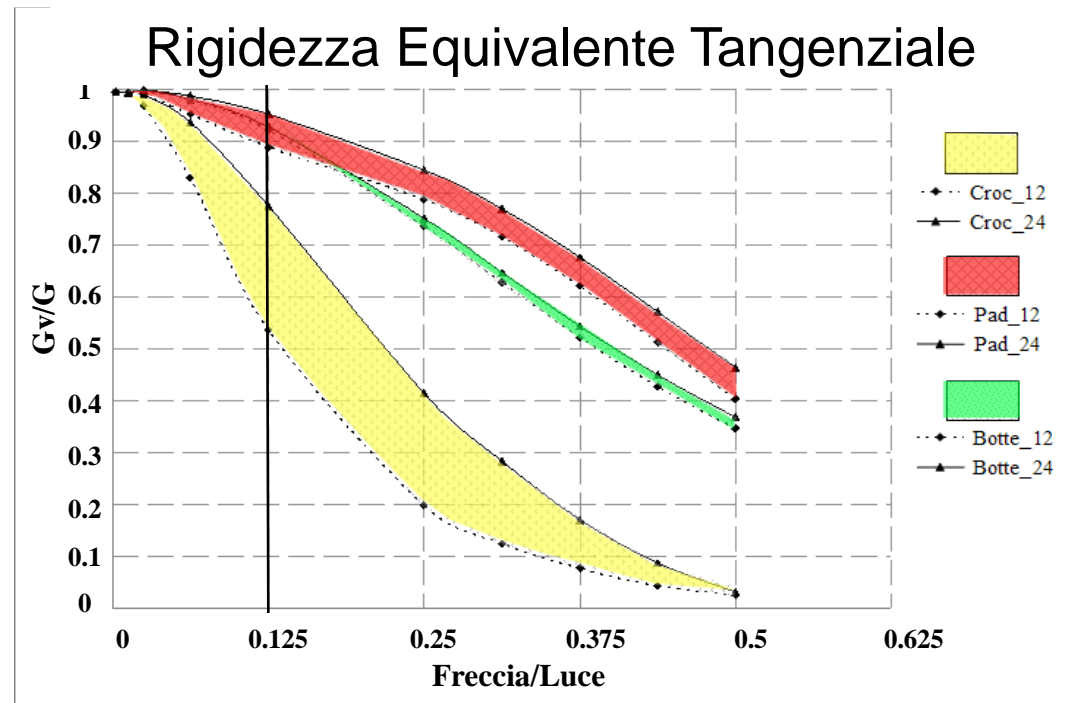
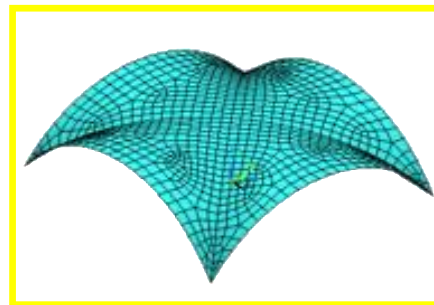
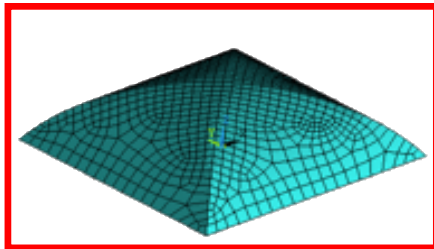
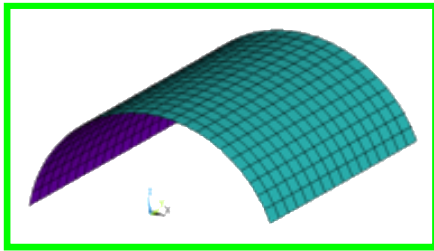
Table 10.9: Stiffness multipliers for other forms of flexible timber diaphragms (derived from ASCE, 2013)

Type of diaphragm sheathing	Multipliers to account for other sheathing types	
Single straight sheathing	x 1.0	
Double straight sheathing	Chorded	x 7.5
	Unchorded	x 3.5
Single diagonal sheathing	Chorded	x 4.0
	Unchorded	x 2.0
Double diagonal sheathing or straight sheathing above diagonal sheathing	Chorded	x 9.0
	Unchorded	x 4.5

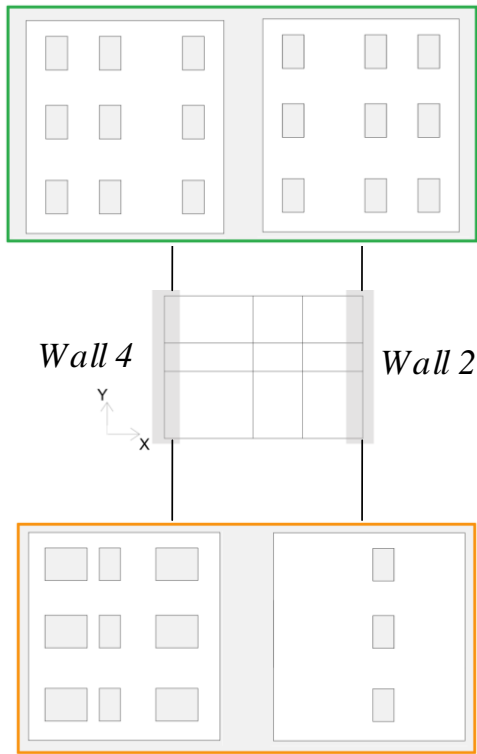
Note:
[†] Values may be amplified by 20%
^{††} Values should be interpolated at splice



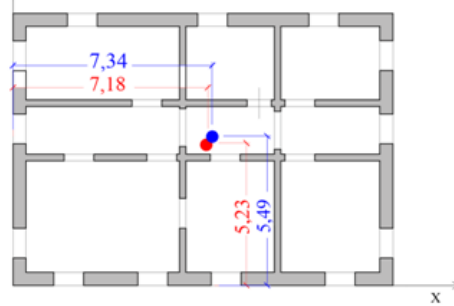
Rigidezza equivalente volte: Cattari S., Lagomarsino S., Resemini S. (2011). Il ruolo delle volte nella risposta sismica degli edifici in muratura, pag. 211- 270, in “Archi e volte in zona sismica – Meccanica delle strutture voltate” a cura di A.Borri e L.Bussi, Ed. Doppiavoce Napoli



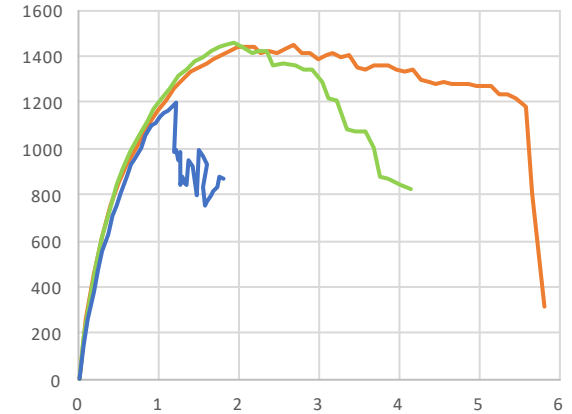
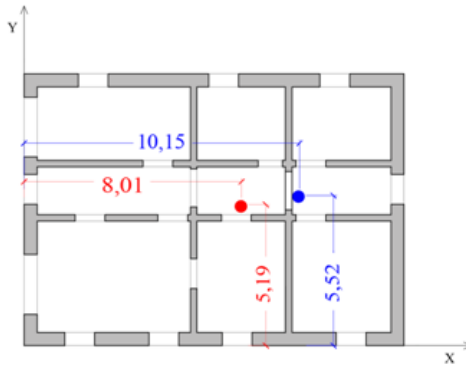
Influenza della regolarità in pianta e della rigidità dei diaframmi



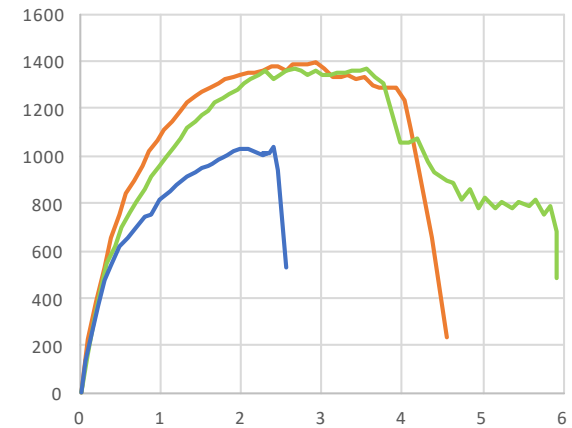
REGULAR



IRREGULAR



— RIGID — STIFF — FLEXIBLE



Marino PhD tesi, 2018 & Marino et al. Engineering structures 2020

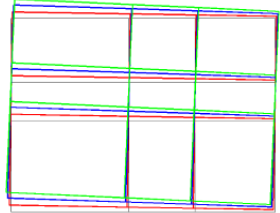
Influenza della rigidità dei diaframmi sulla risposta modale di un edificio irregolari

IRREGULAR CONFIGURATION

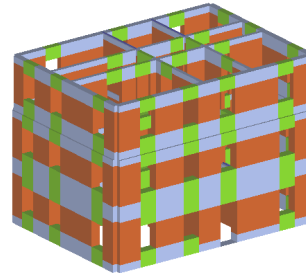
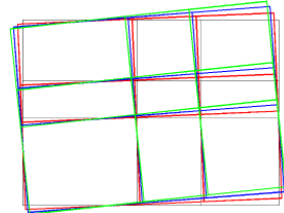
RIGID

T1 = 0.34s, My = 71.4%

T1 = 0.21s, My = 11.1%



+



SOLAI	% My	N° modi
Infinitamente rigido	82.5	2
Rigidità finita	82.6	4
Rigid trascurabile	82.2	5

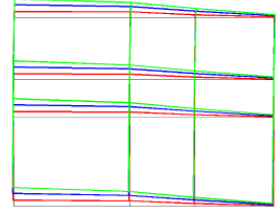
INTERMEDIATE

T1 = 0.36s, My = 66.2%

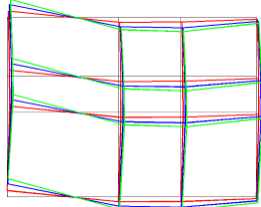
T3 = 0.27s, My = 4.4%

T4 = 0.21s, My = 8.8%

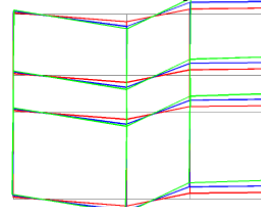
T6 = 0.17s, My = 3.2%



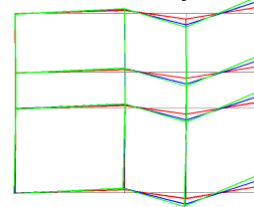
+



+



+



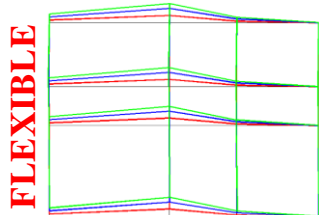
T1 = 0.38s, My = 50.6%

T2 = 0.36s, My = 3.7%

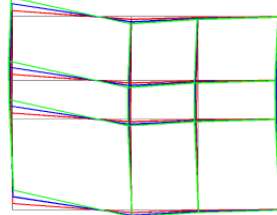
T4 = 0.30s, My = 11.7%

T6 = 0.22s, My = 9.0%

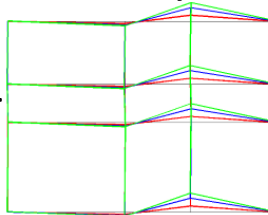
T7 = 0.20s, My = 7.2%



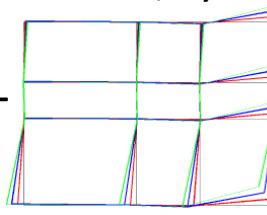
+



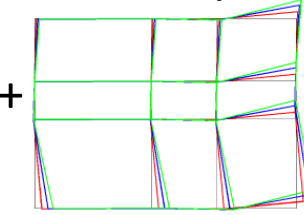
+



+



+



- Nel caso di edifici in muratura modellati a telaio equivalente, l'analisi nonlineare incrementale esegue già la verifica a livello di singolo pannello, sia nei riguardi della resistenza che della deformazione limite. La Circolare 2019 prevede una bilineare (con resistenza residua per le fasce).
- Gli effetti sulla risposta globale sono leggibili sulla curva pushover, che manifesta un progressivo degrado di rigidezza e resistenza.
- La **verifica** può quindi essere eseguita **a livello globale**, individuando lo stato limite sulla curva pushover e controllando che questo non sia raggiunto con la domanda di spostamento calcolata per l'azione sismica di riferimento.

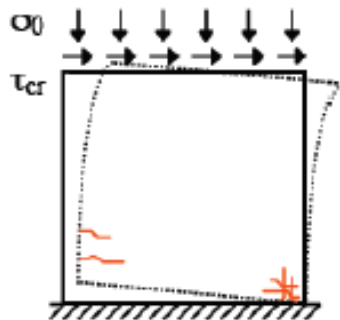
- LEGAMI COSTITUTIVI DEGLI ELEMENTI MURARI (in termini di taglio V e drift θ): dipendono da rigidità elastica, resistenza e soglie deformative a diversi stati limite
 - una classificazione è proposta

3 criteri di resistenza: 2 tipologie di muratura: 2 tipi di elemento:

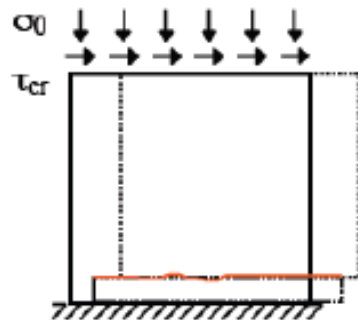
- Presso-flessione
- Scorrimento
- Taglio diagonale

- Regolare (corsi di malta orizzontali e giunti sfalsati)
- Irregolare (risposta isotropa)

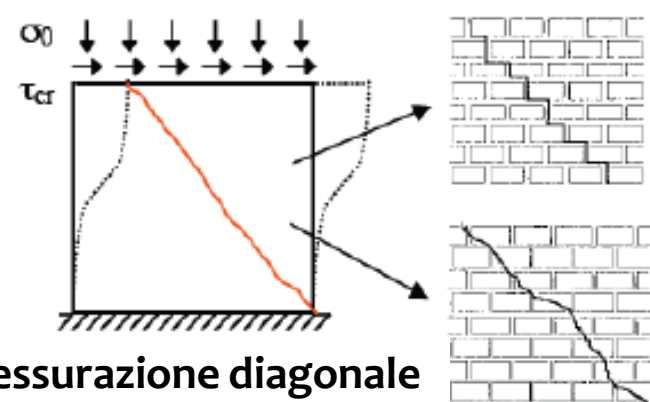
- Maschi
- Fasce murarie



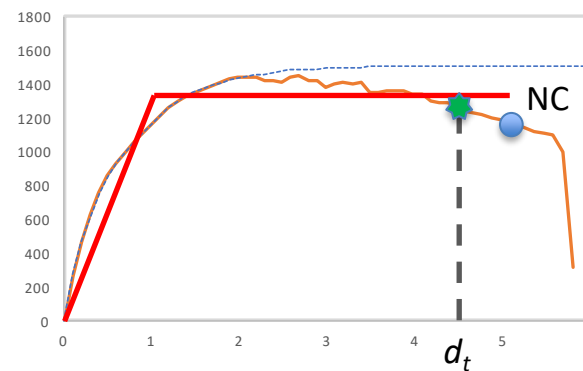
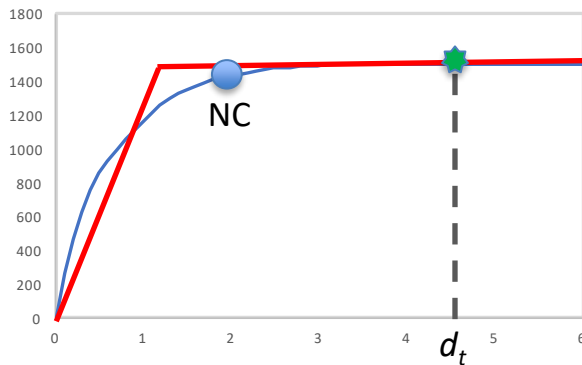
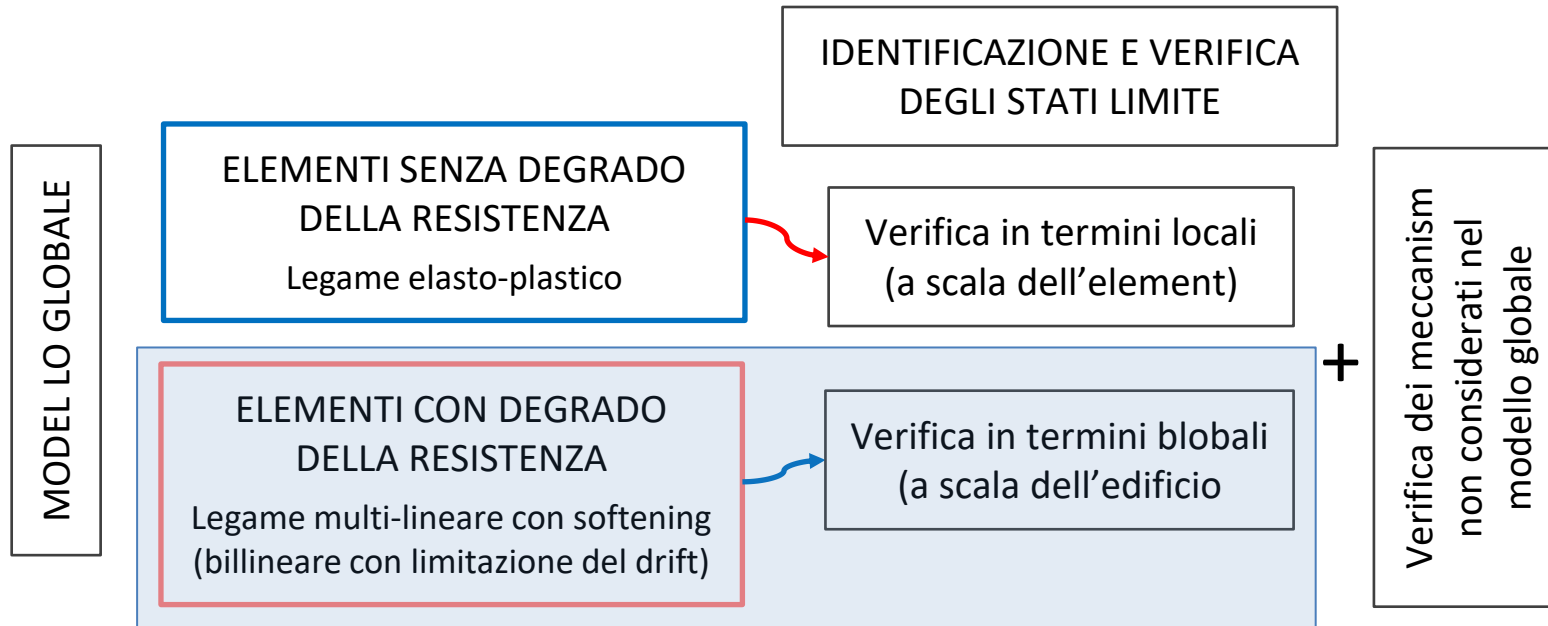
presso-flessione



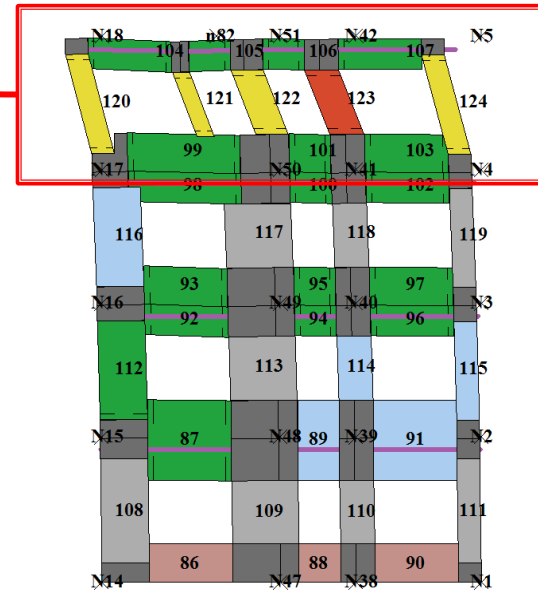
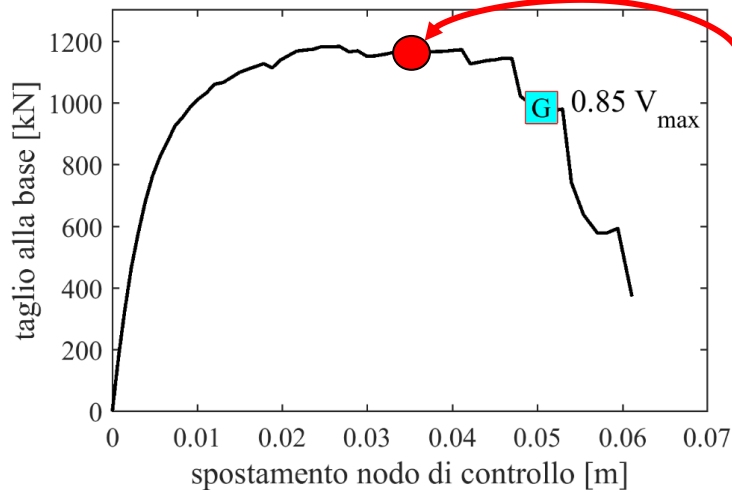
scorrimento



fessurazione diagonale



- Nel caso di edifici in muratura modellati a telaio equivalente, l'analisi nonlineare incrementale esegue già la verifica a livello di singolo pannello, sia nei riguardi della resistenza che della deformazione limite. La Circolare 2019 prevede una bilineare (con resistenza residua per le fasce).
 - Gli effetti sulla risposta globale sono leggibili sulla curva pushover, che manifesta un progressivo degrado di rigidezza e resistenza.
 - La **verifica** può quindi essere eseguita **a livello globale**, individuando lo stato limite sulla curva pushover e controllando che questo non sia raggiunto con la domanda di spostamento calcolata per l'azione sismica di riferimento.
 - Nel caso di **solai di rigidezza finita** è necessario considerare criticità ulteriori:
 - nell'analisi si assume che i maschi siano sempre in grado di portare i carichi verticali (nell'Eurocodice 8 – Parte 3 è prevista una verifica locale, assumendo un **drift ultimo a carichi verticali**, pari a 1.5 volte quello ultimo a taglio);
 - controllo dei **meccanismi di parete**, ovvero i limiti deformativi corrispondenti a quello specifico stato limite non devono essere stati raggiunti in tutti i maschi murari di un qualunque piano dell'edificio, di una qualunque parete.
- ⇒ questi controlli possono arretrare lo spostamento corrispondente allo stato limite



Controllo alla sola scala globale (G)



Problema: in caso di edifici complessi con solai flessibili

Tutti i maschi ad un livello hanno raggiunto almeno il DL3, s'innesca un meccanismo, e quindi SLV è raggiunto alla scala di parete

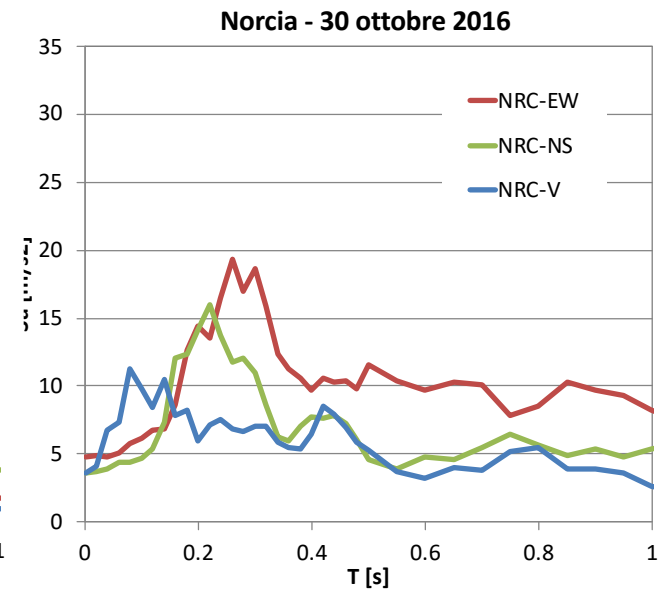
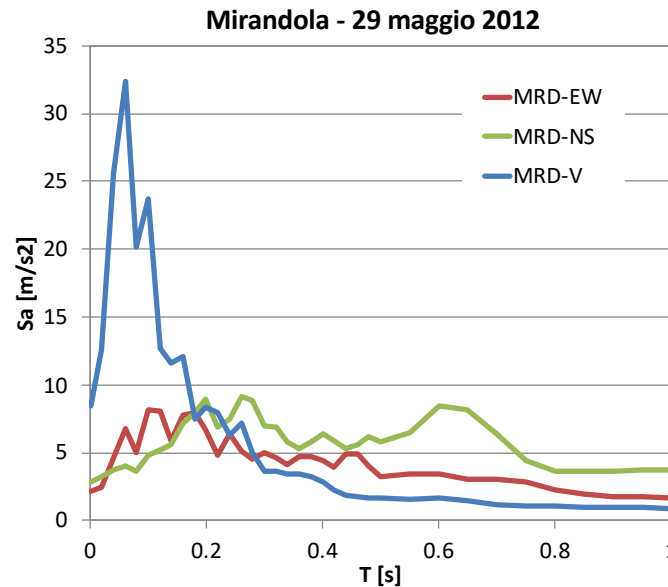
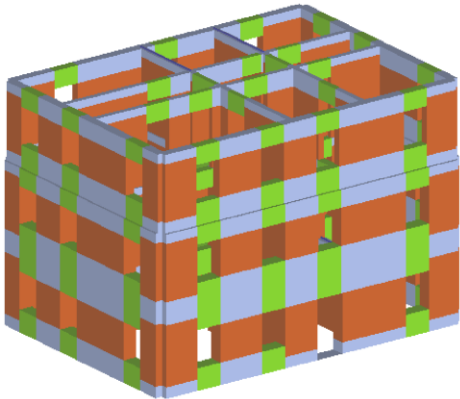
- Argomento sul quale c'è molta attenzione, in particolare in ambito professionale, perchè da alcuni ritenuto cruciale nella valutazione della sicurezza sismica dell'esistente. L'unico dato ad oggi certo è che alcune recenti registrazioni in area epicentrale hanno mostrato valori della PGA_v confrontabili o anche maggiori dei picchi della componente orizzontale.
- Le NTC2018 e la Circolare 2019 non prescrivono nulla di più o di diverso rispetto alle versioni precedenti (2008/2009). Interpretazioni diverse sono pretestuose.
- Riguardo al fenomeno fisico, distinguerei due fattori:
 - la variazione della capacità sismica degli elementi murari (maschi) per effetto della variazione della componente verticale (correlazione tra le componenti del moto)
 - Il possibile deterioramento delle proprietà meccaniche della muratura per effetto delle oscillazioni del carico verticale (fatica) – qui è forse più rilevante il problema dell'accumulo del danno da scosse di replica e dalla storia sismica
- La ricerca sull'argomento è ancora limitata e non esiste una letteratura scientifica consolidata. Introdurre questo aspetto in normativa richiederebbe:
 - saper caratterizzare l'input in modo attendibile (in quali condizioni è significativa?)
 - disporre di metodi di analisi e verifica affidabili (ci sono edifici più sensibili di altri?)

Caso studio: edificio di 3 piani, pianta regolare/irregolare, solai di rigidità finita.

Modellazione a telaio equivalente con legame costitutivo con risposta ciclica isteretica.

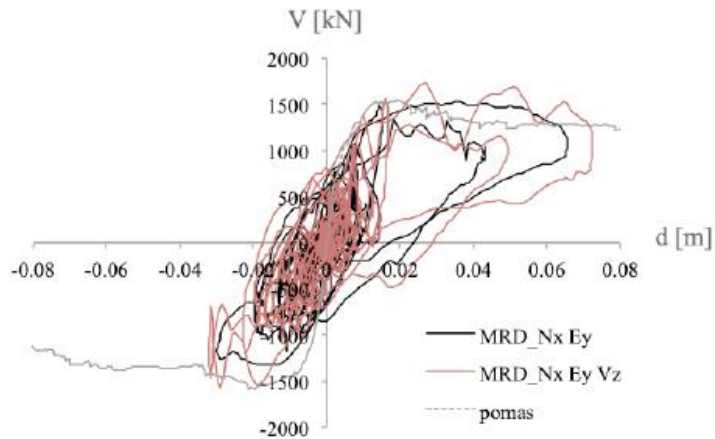
Analisi dinamiche nonlineari :

- solo una componente (E-W o N-S), alternativamente nelle due direzioni dell'edificio
- entrambe le componenti orizzontali
- tutte e tre le componenti

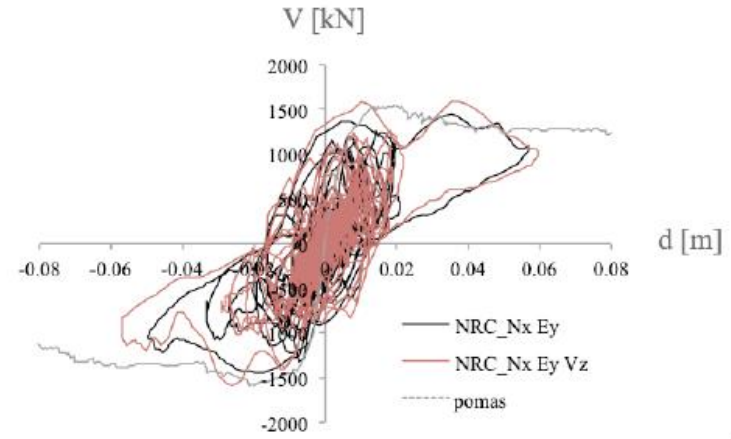


L'effetto della componente verticale

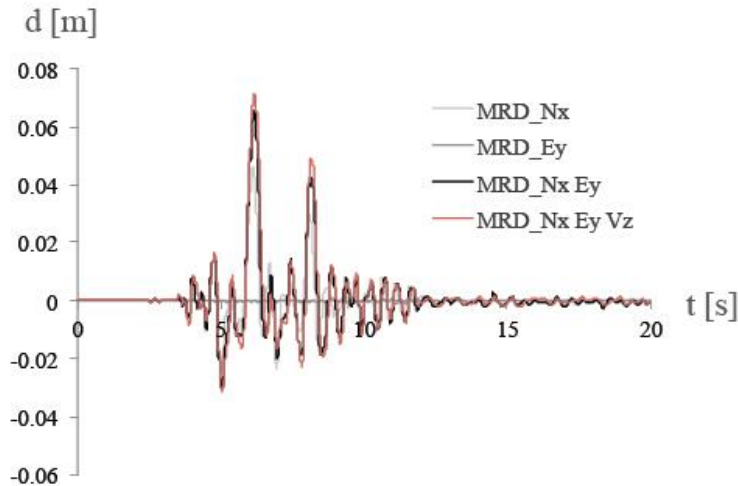
- Differente risposta senza e con la componente verticale



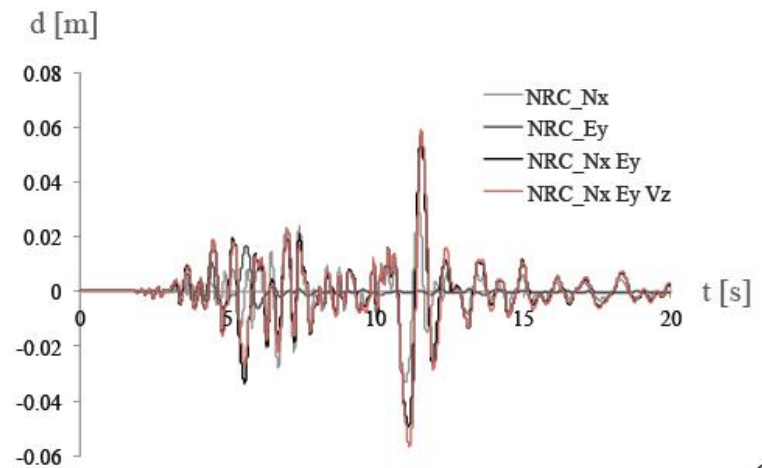
a.



b.



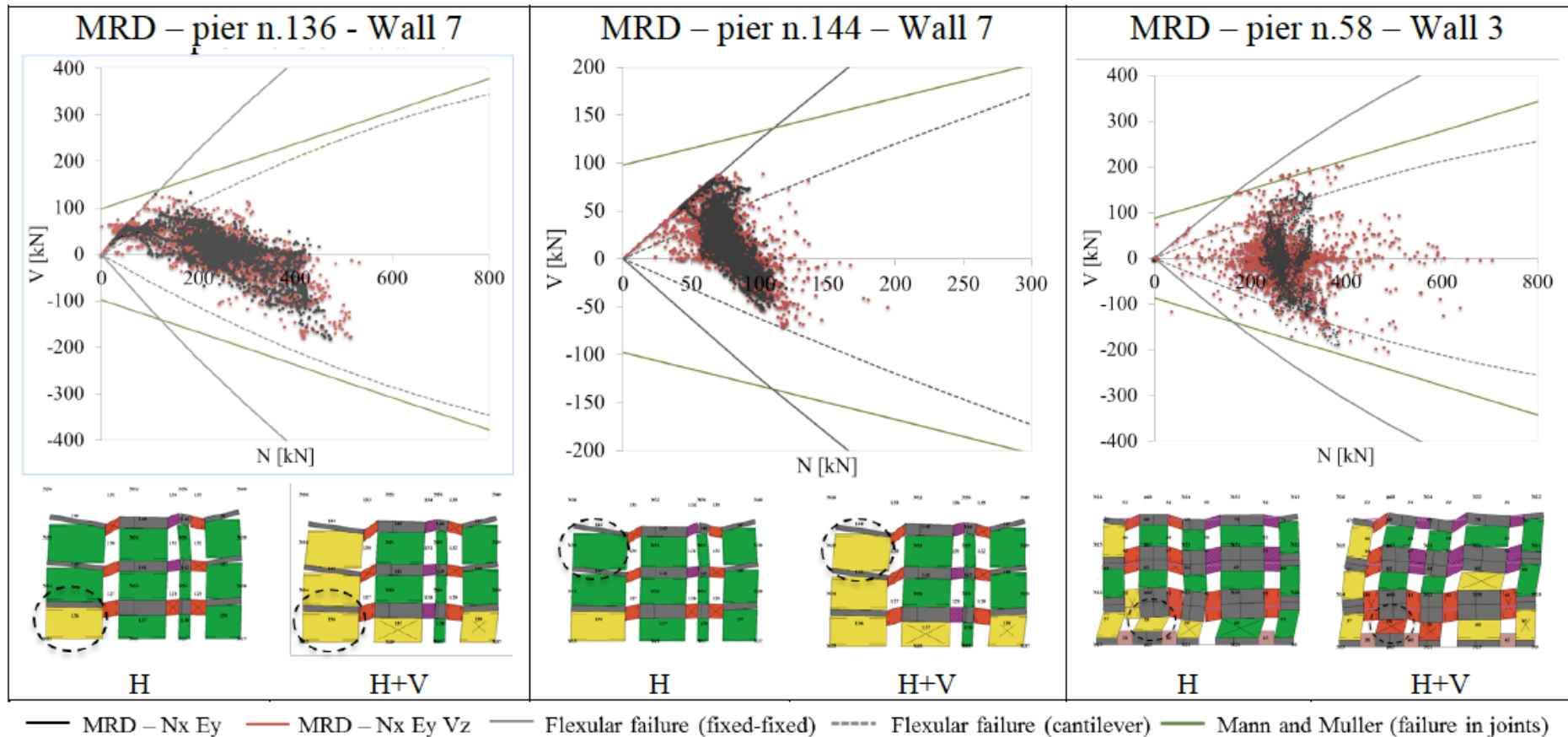
c.



d.

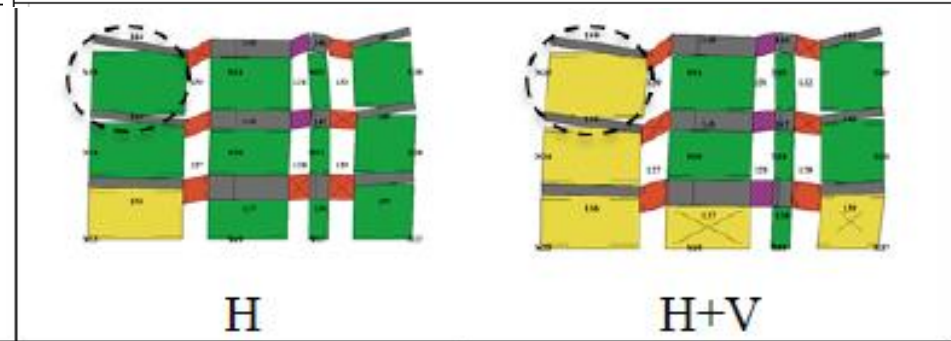
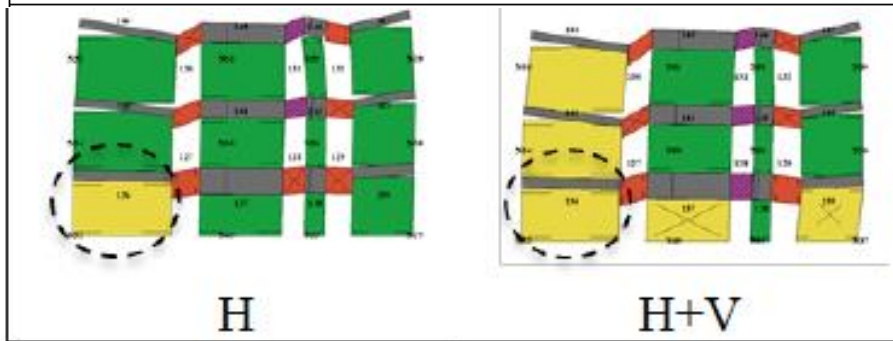
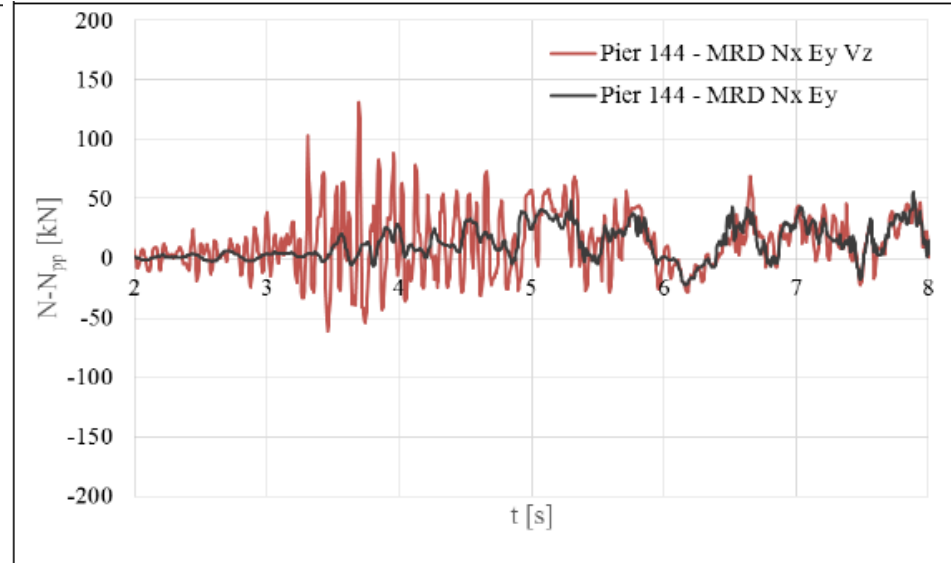
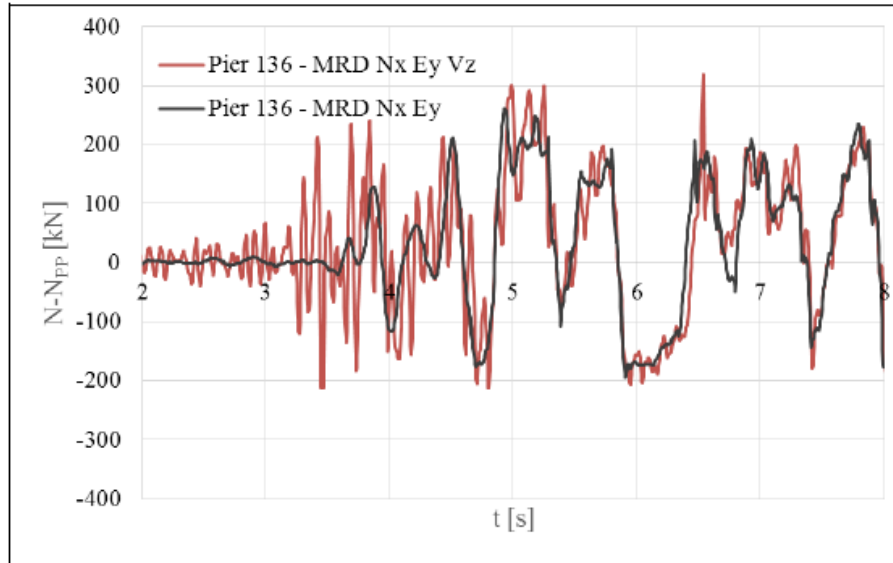
L'effetto della componente verticale

- Effetto della componente verticale sulla variazione dello sforzo normale, confrontata con i domini di resistenza nel piano V-N, e sul quadro del danno



L'effetto della componente verticale

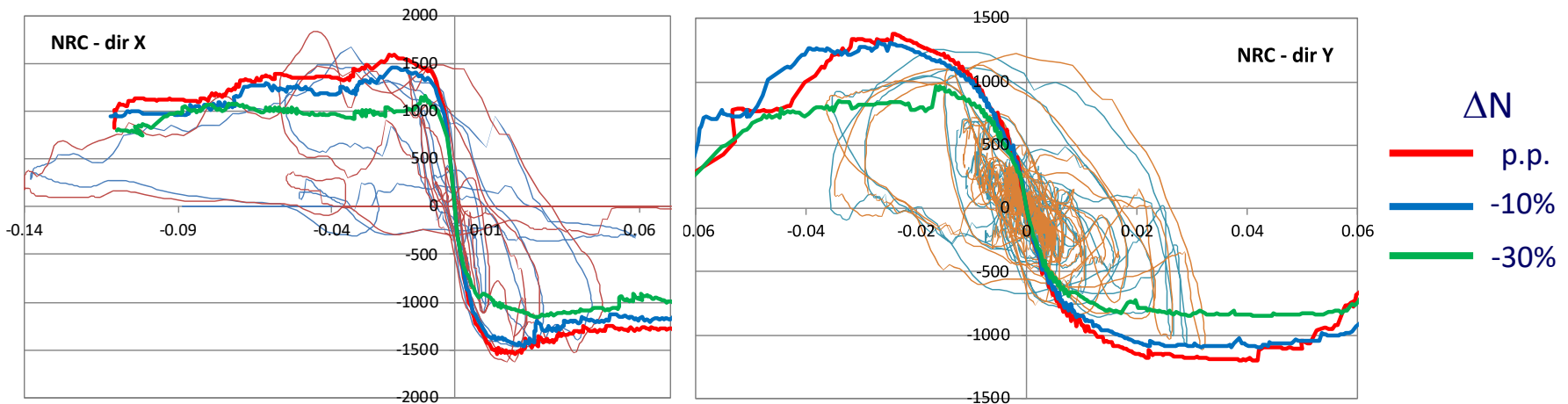
- Effetto della componente verticale sulla variazione dello sforzo normale: storie temporali



- Casualità del massimo spostamento al variare delle componenti considerate:

		spostamento massimo X			spostamento massimo Y		
		Nx	Nx Ey	Nx Ey Vz	Ey	Nx Ey	Nx Ey Vz
Mirandola	irregolare	4.6	6.6 41%	7.2 10%	1.8	2.0 13%	2.5 21%
	regolare	4.2	6.4 53%	6.7 6%	1.9	2.6 33%	2.6 1%
Norcia	irregolare	3.4	5.7 71%	6.0 4%	13.7	12.9 -6%	14.5 12%
	regolare	3.2	3.4 9%	3.7 9%	13.0	15.4 19%	10.8 -30%

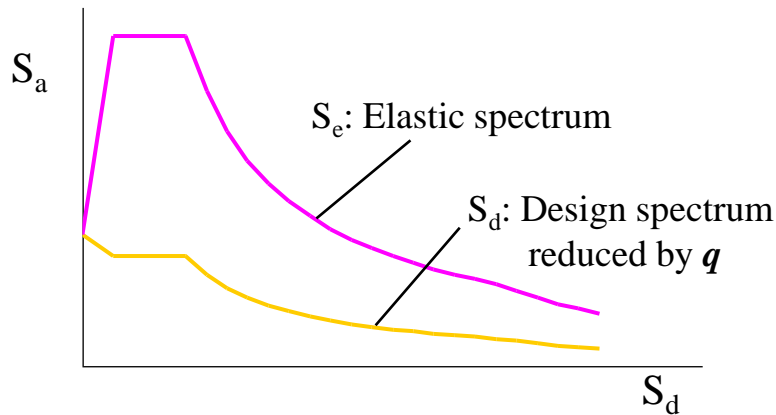
- Difficoltà di considerare l'effetto della componente verticale attraverso analisi pushover:



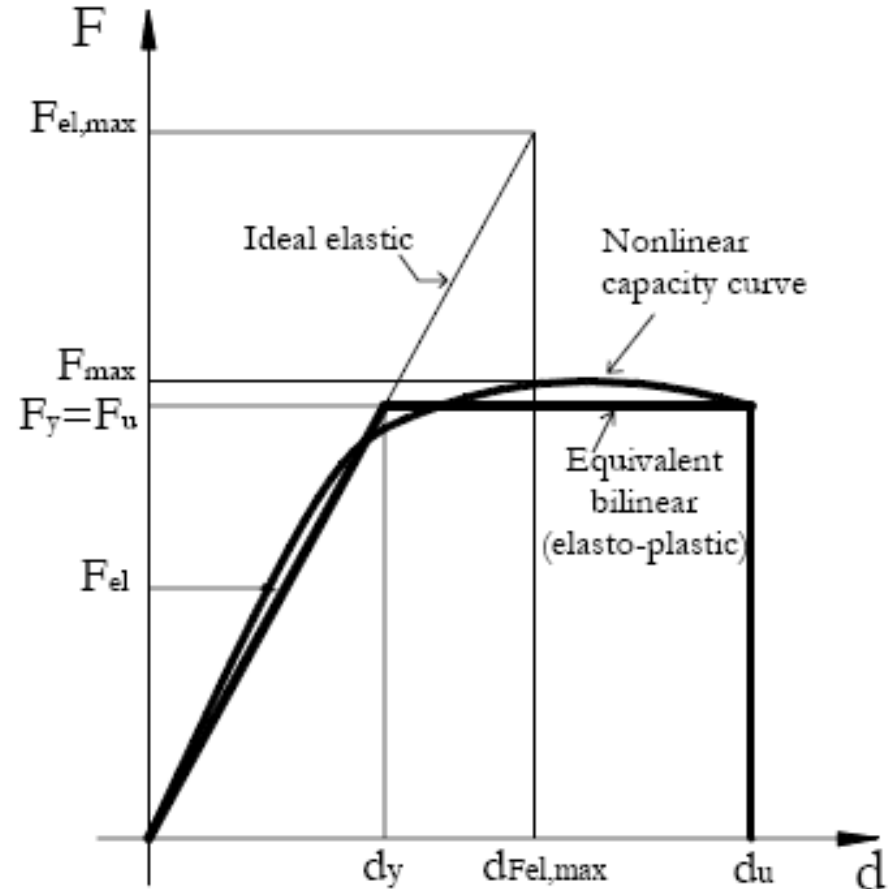
- Verifica in termini di resistenza. La risposta del singolo maschio in campo elastico è fortemente influenzata da una serie di scelte di modellazione:
 - **Telaio Vs Mensole**: considerando il contributo delle fasce, nascono sollecitazioni anomale e poco realistiche (fasi costruttive)
 - **Effetto flangia**: considerando la perfetta connessione tra maschi ortogonali (cantonali e martelli) alcuni elementi vanno irrealisticamente in trazione
 - **Maschi non caricati**: a meno di non considerare uno scarico dei solai bidirezionale, alcuni maschi risultano poco caricati (e all'ultimo piano addirittura scarichi), quindi con resistenza nulla a taglio e pressoflessione
- Il coefficiente di sovraresistenza è spesso insufficiente ed il fattore di struttura è arbitrario in un edificio tradizionale, non ingegnerizzato.
- L'Eurocodice 8 - Parte 3 prevede una verifica in termini di deformazione, usando i valori ottenuti dall'analisi statica lineare con spettro di risposta non ridotto dal fattore q , amplificati per considerare la maggiore domanda di spostamento nelle strutture rigide.
- Si ottengono in tutti i casi valori di ζ_E molto bassi rispetto a quelli derivanti dalla ASNL, dove criticità locali non incidono significativamente sulla risposta globale.

Analisi Statica Lineare

- Applicazione di forze statiche equivalenti, ridotte dal fattore q , e calcolo delle sollecitazioni in ciascun elemento
- Eventuale redistribuzione con regole
- Verifica di resistenza di ciascun elemento

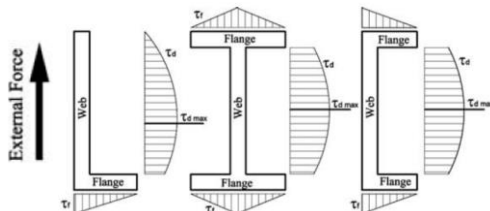
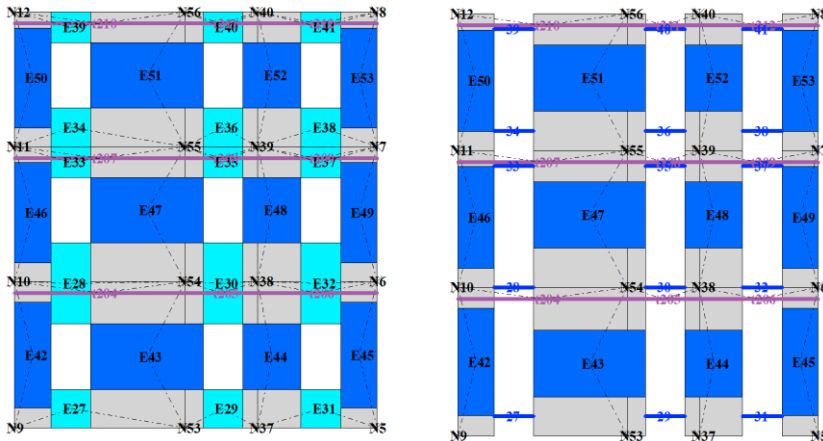
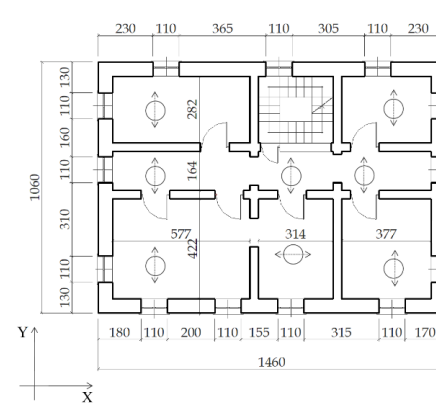


$$q = \frac{F_{el,max}}{F_{el}} = \frac{F_{el,max}}{F_y} \cdot \frac{F_y}{F_{el}} = q_0 \cdot \frac{F_y}{F_{el}} = q_0 \cdot OSR$$



Confronto tra ASL e ASNL: il caso studio

- Edificio di 3 piani
- Struttura portante verticale in muratura ordinaria
- Catene metalliche ad ogni piano
- Solai rigidi
- Tetto in struttura lignea
- Pianta rettangolare con dimensioni 14,6 x 10,6 m

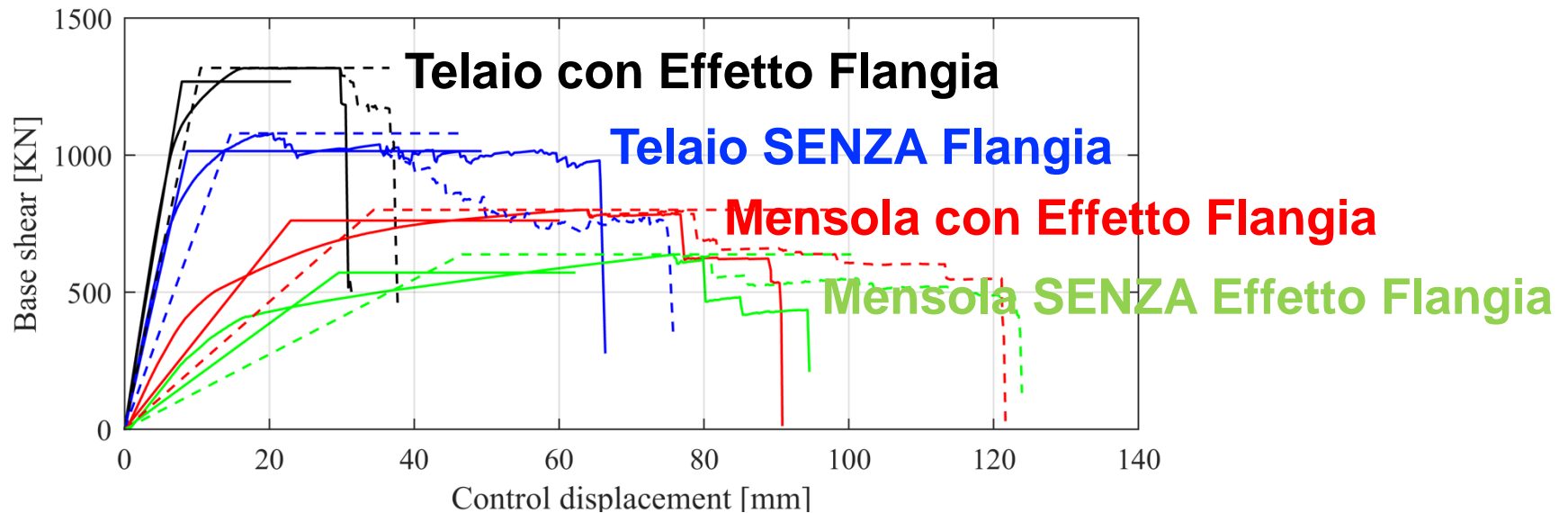


	Contributo flange	No ammorsamenti
Fasce	0 modello base	1 telaio no flange
No fasce	2 – mensoloni con flange	3 – mensoloni senza flange

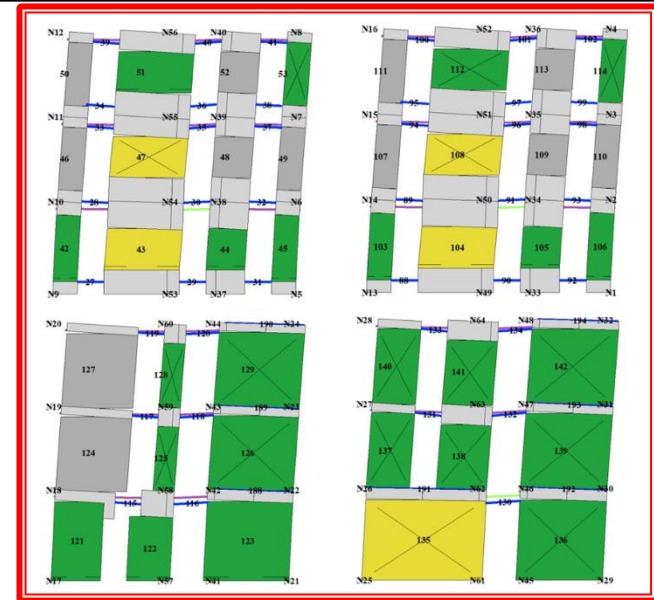
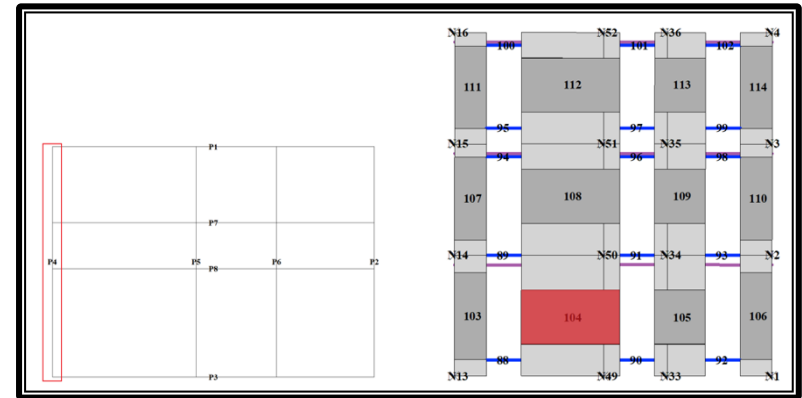
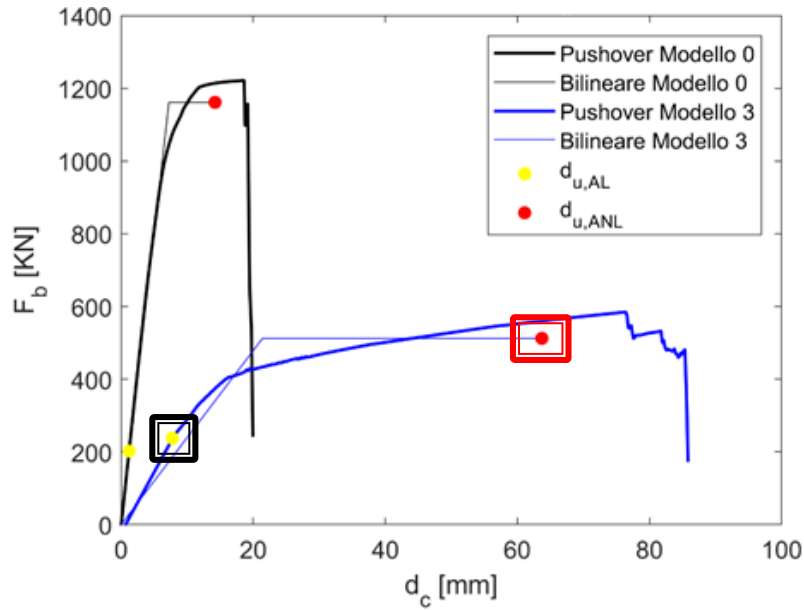
Curve Pushover e bilineari equivalenti – muratura irregolare e distribuzione di forze triangolare inversa

	Model 0	Model 1	Model 2	Model 3
T_1 [s]	0.296	0.331	0.498	0.641

- Model 0 NTC18 — Model 3 NTC18 - - - Model 2 EC8draft
- Model 1 NTC18 - - - Model 0 EC8draft - - - Model 3 EC8draft
- Model 2 NTC18 - - - Model 1 EC8draft



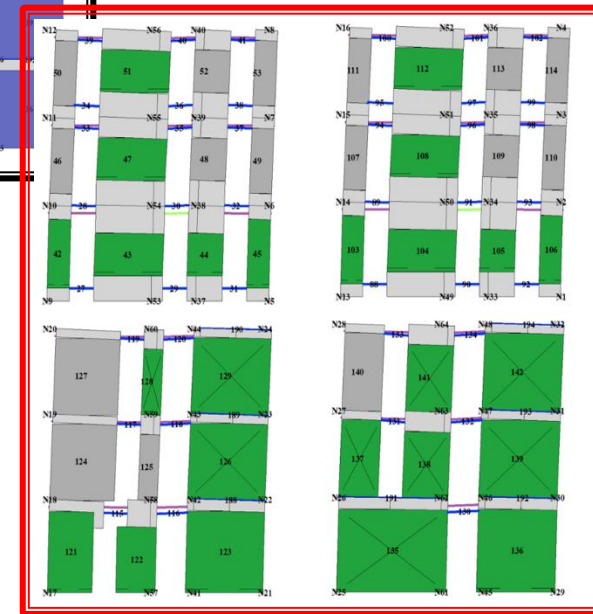
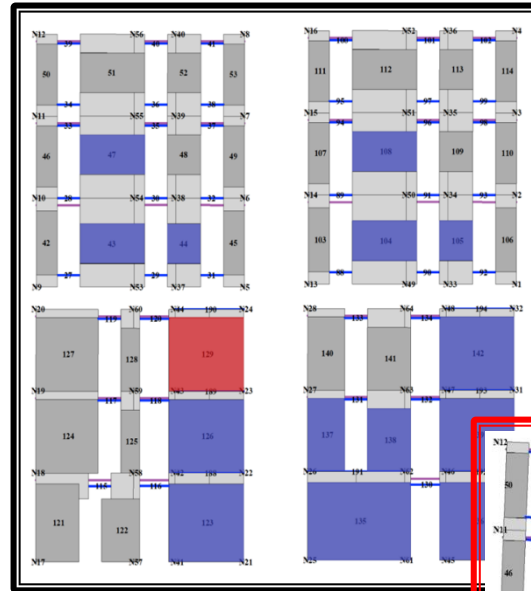
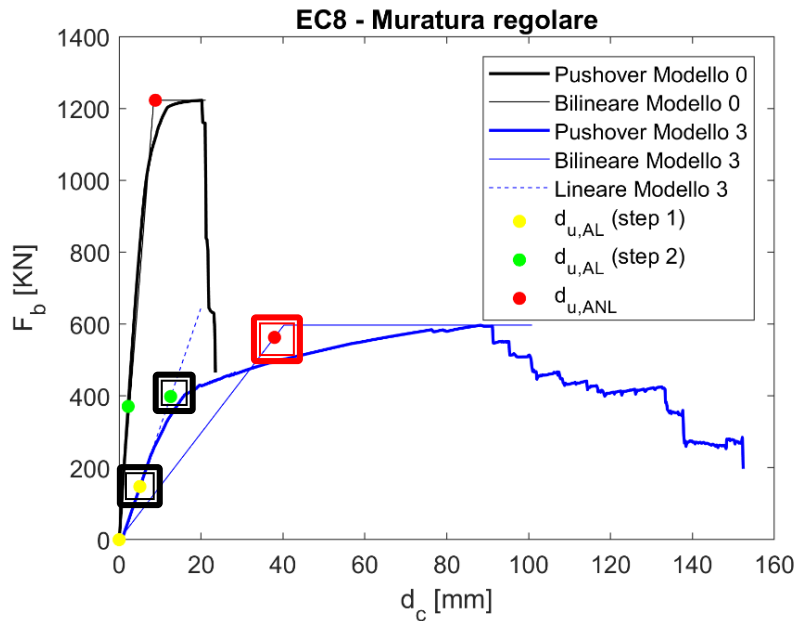
NTC 18: confronto danno Modello 3



Modello 3

- Analisi lineare = 7.8 mm
- Analisi non lineare = 63.7 mm

EC8-3: confronto danno Modello 3



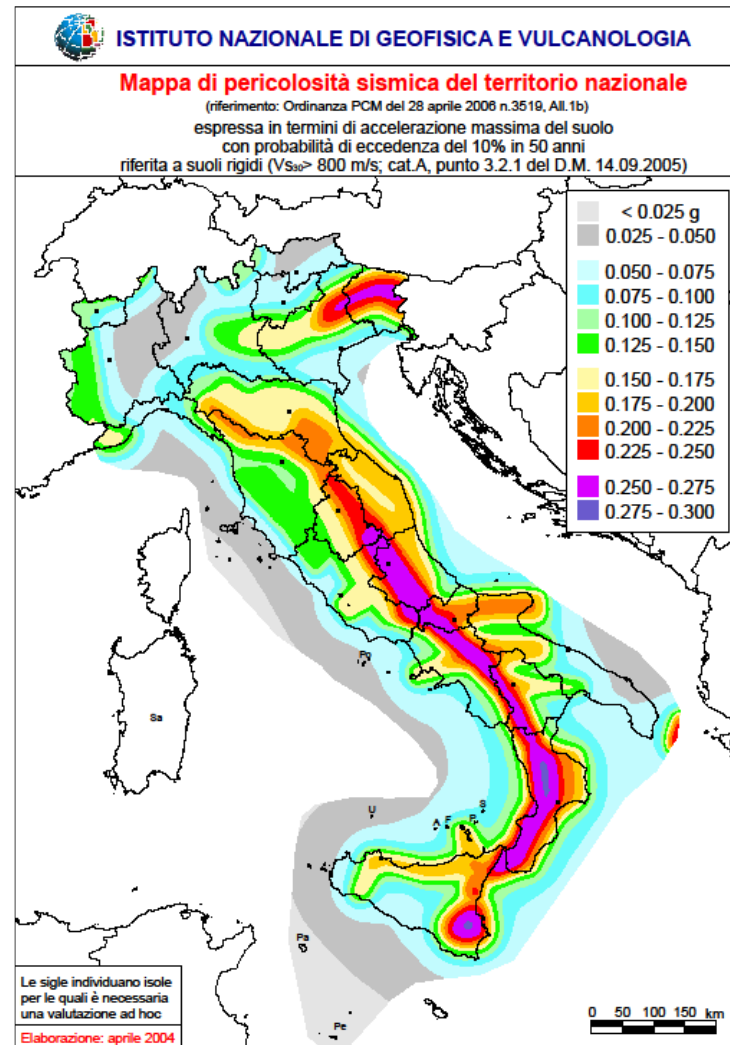
Modello 3

Step 1: $d_{u,AL} = 5,1 \text{ mm}$ ■

Step 2: $d_{u,AL} = 12,6 \text{ mm}$ ■

$d_{u,ANL} = 37,9 \text{ mm}$

			$a_{g,L}$ [g]	$a_{g,NL}$ [g]
Modello 0	Muratura regolare	NTC 18	0,048	0,162
		EC8	0,026	0,102
	Muratura irregolare	NTC 18	0,016	0,249
		EC8	0,026	0,131
Modello 1	Muratura regolare	NTC 18	0,019	0,200
		EC8	0,018	0,101
	Muratura irregolare	NTC 18	0	0,252
		EC8	0,018	0,120
Modello 2	Muratura regolare	NTC 18	0,026	0,182
		EC8	0,023	0,106
	Muratura irregolare	NTC 18	0,036	0,275
		EC8	0,023	0,134
Modello 3	Muratura regolare	NTC 18	0,090	0,253
		EC8	0,045	0,119
	Muratura irregolare	NTC 18	0,090	0,223
		EC8	0,045	0,120

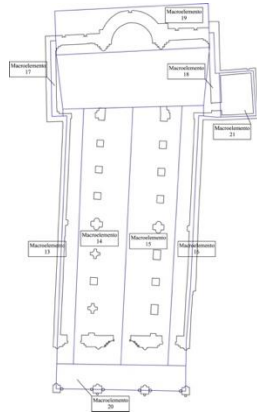
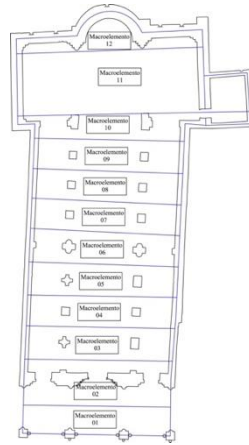
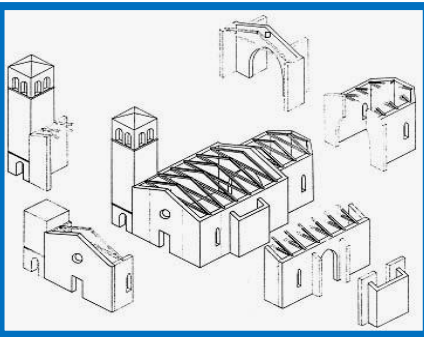


- **TIPOLOGIE RICORRENTI DEL COSTRUITO MONUMENTALE:**
 - Chiese
 - Torri e campanili
 - Castelli e fortezze

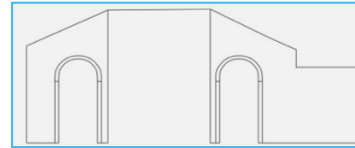
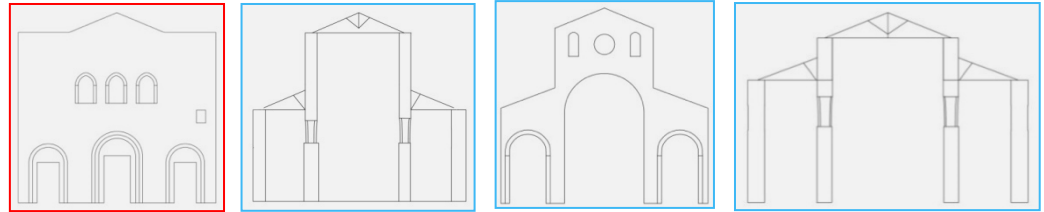
- **MODELLAZIONE GLOBALE 3D**
 - Difficoltà di identificare gli elementi strutturali (maschi e fasce) ⇒ FEM
 - Minore presenza di diaframmi orizzontali intermedi e muri di spina interni
 - Snellezza delle pareti ed interazione tra risposta nel piano e fuori dal piano

- **SUDDIVISIONE IN MACROELEMENTI**
 - La struttura è divisa in parti delle quali è possibile studiare autonomamente il comportamento
 - In ciascun macroelemento sono applicate le azioni inerziali dovute alle masse sismiche per area di influenza e quelle trasferite da elementi di collegamento (soffitto di copertura, ecc.)
 - La valutazione della risposta sismica di ciascun macroelemento è eseguita con il modello più appropriato (analisi nel piano, analisi limite dell'equilibrio)

Chiesa di San Clemente a Casauria

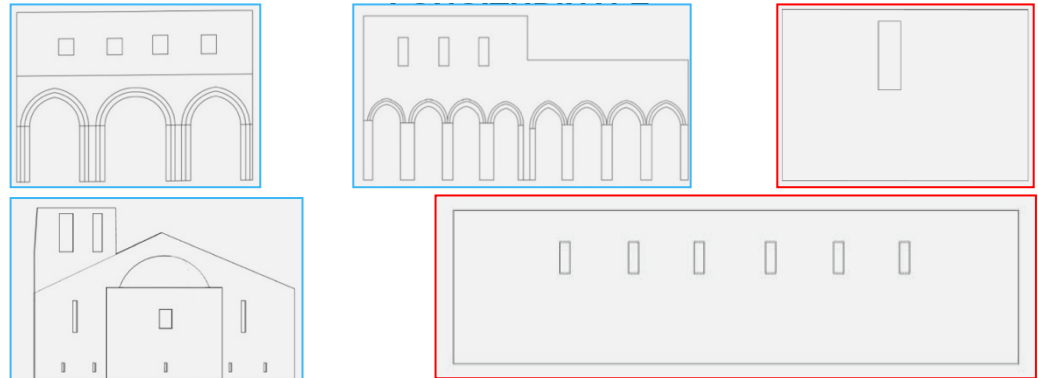


MACROELEMENTI COINVOLTI NELLA RISPOSTA TRASVERSALE



ANALISI CINEMATICA NONLINEARE
ANALISI STATICA NONLINEARE

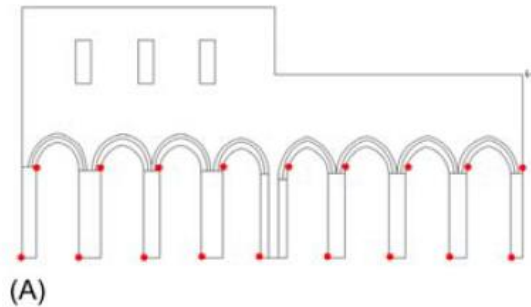
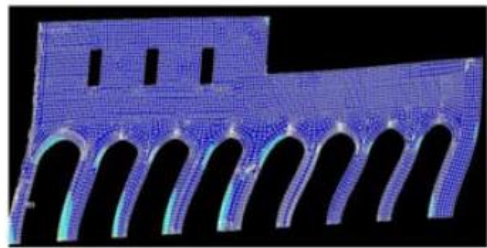
MACROELEMENTI COINVOLTI NELLA RISPOSTA



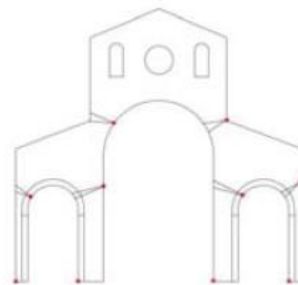
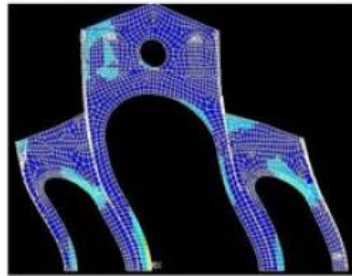
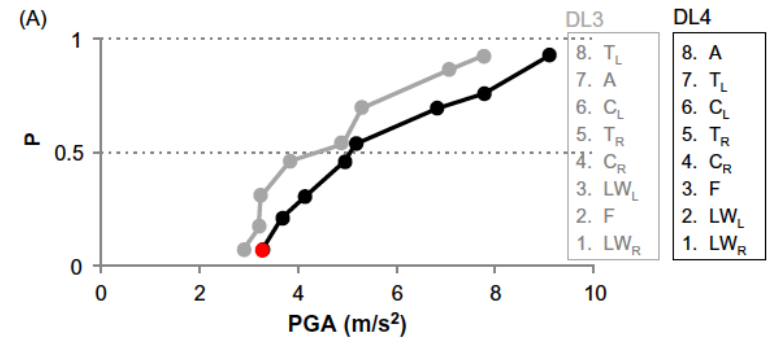
Lagomarsino S., Ottonelli D., Cattari S. (2019) Chapter 2 in Numerical Modelling of Masonry and Historical Structures (Ed. Ghiassi and Milani), Elsevier

Uso di analisi FEM lineari per identificare il meccanismo da studiare con l'analisi limite (approccio cinematico)

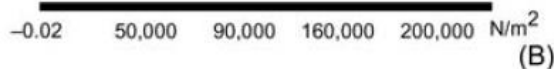
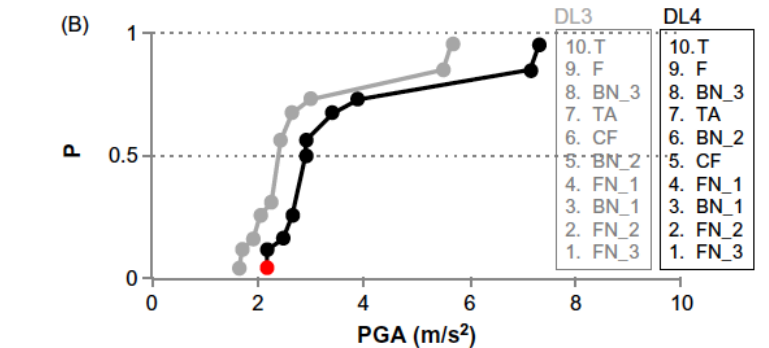
Curve di fragilità che riassumono le prestazioni valutate su ciascun macroelemento



(A)



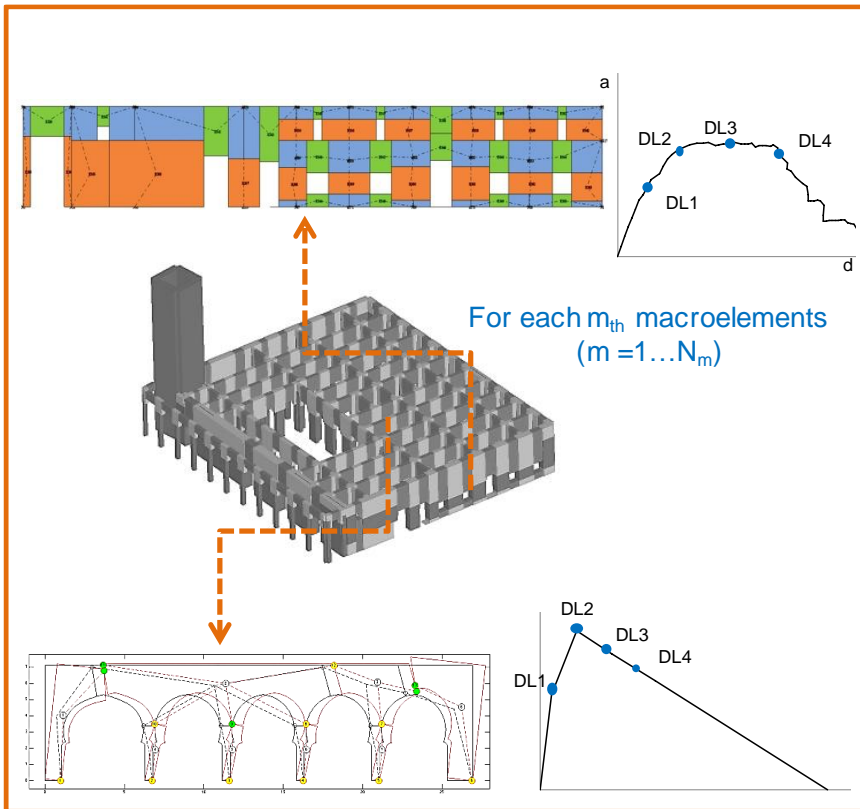
(B)



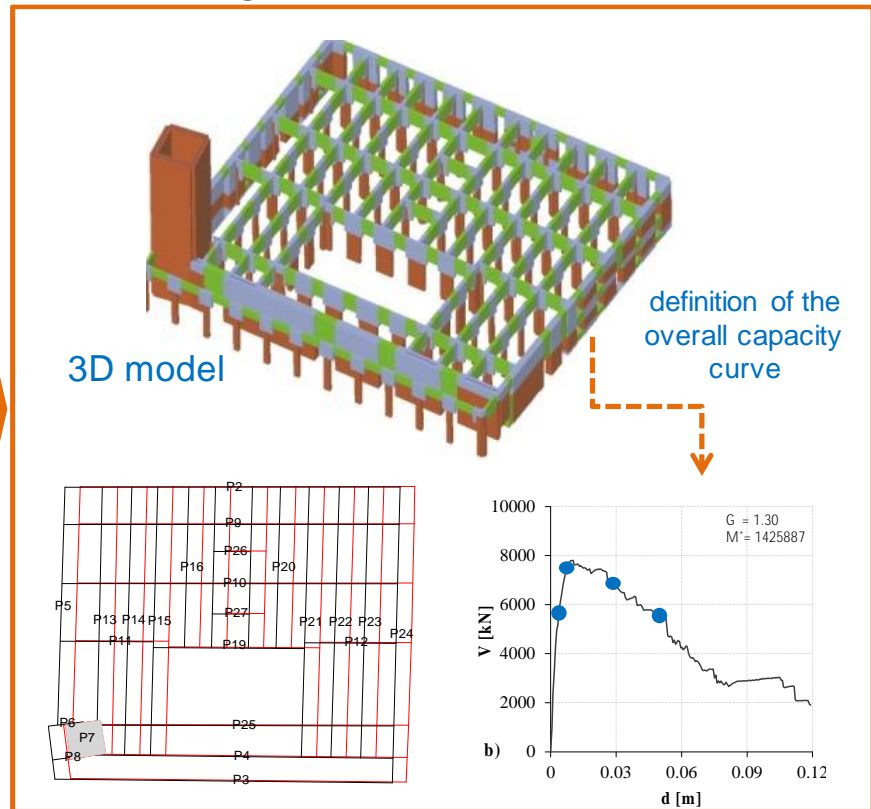


La Grande Moschea in Algeri

Stato di fatto (solai flessibili)
Approccio per macroelementi



Stato consolidato (solai rigidi)
Approccio globale



Peculiarità e criticità:

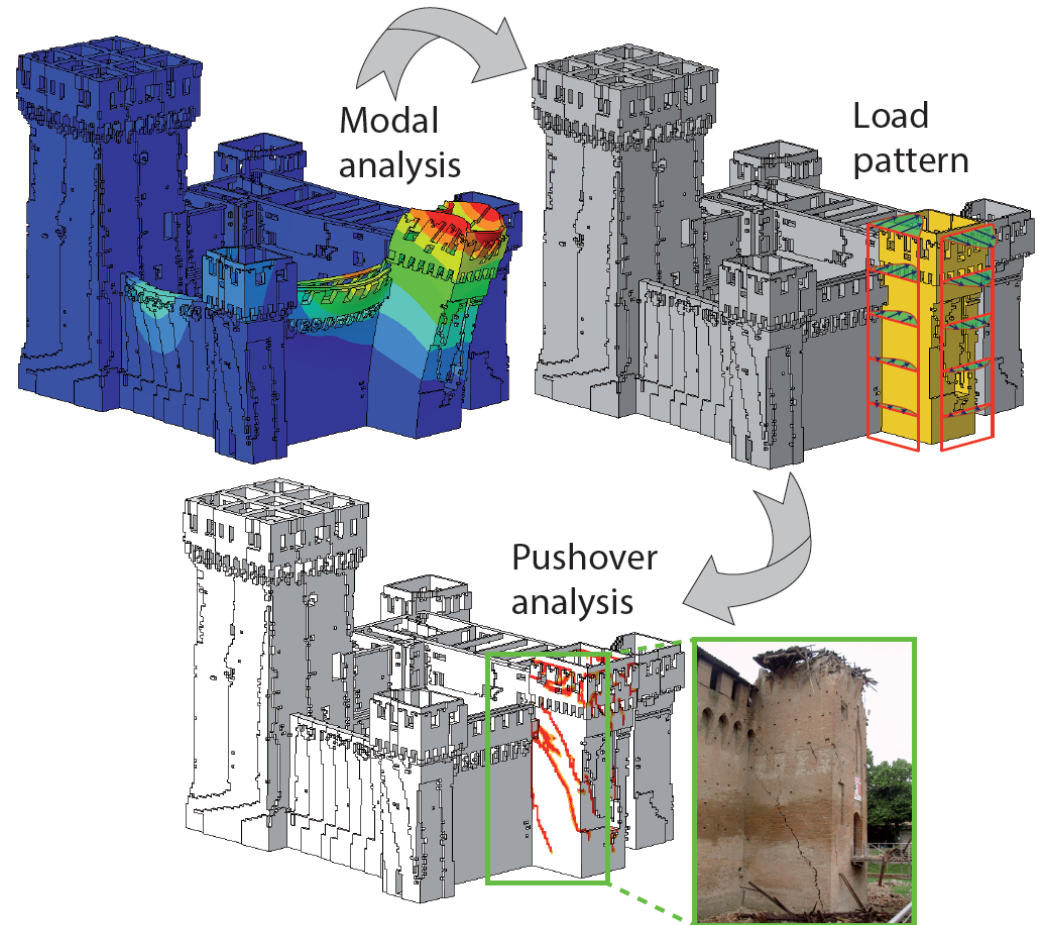
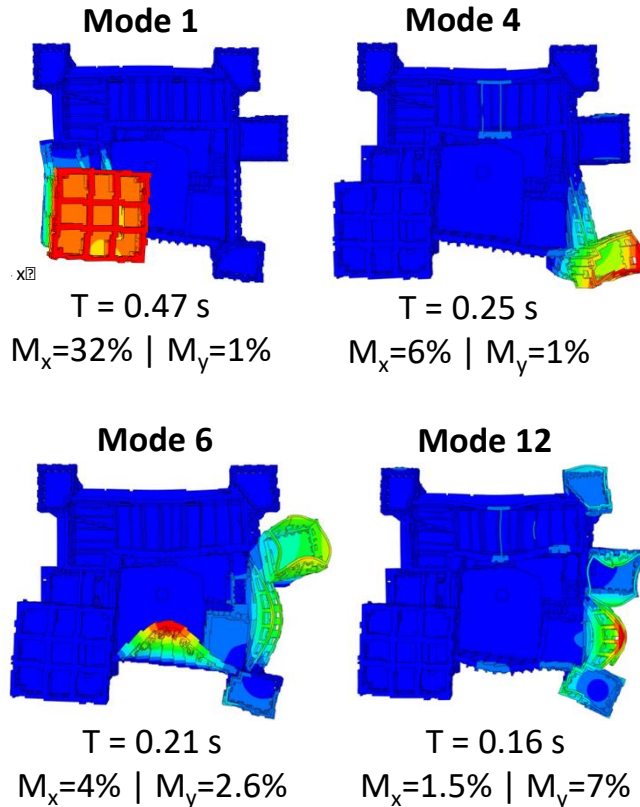
- La suddivisione in macroelementi è talvolta arbitraria e poco attendibile
- La configurazione non consente di riferirsi allo spostamento di un unico nodo di controllo (assenza di diaframmi e/o presenza di corpi distinti ma interagenti)
- Analisi pushover con modello FEM evidenzia spesso un collasso locale

LA ROCCA DI SAN FELICE SUL PANARO

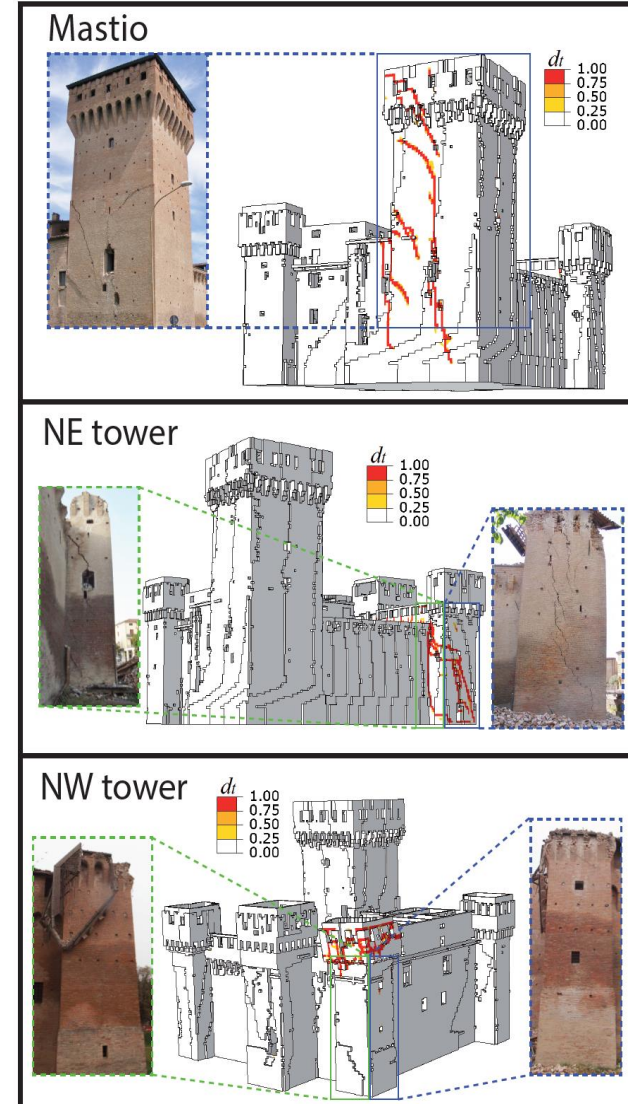
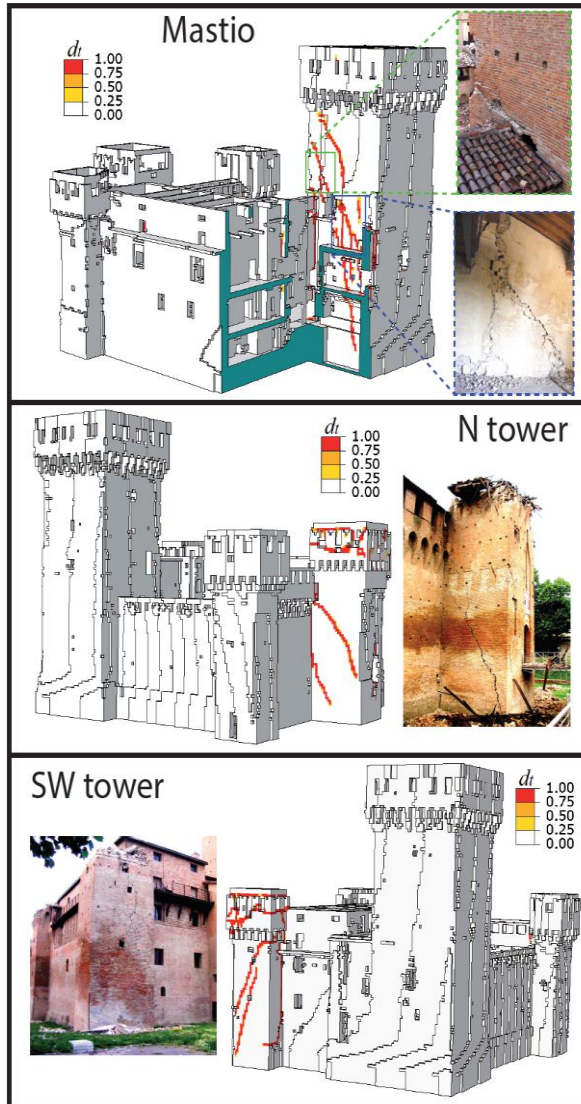
danneggiata dalle due scosse del 20 e 29 maggio 2012



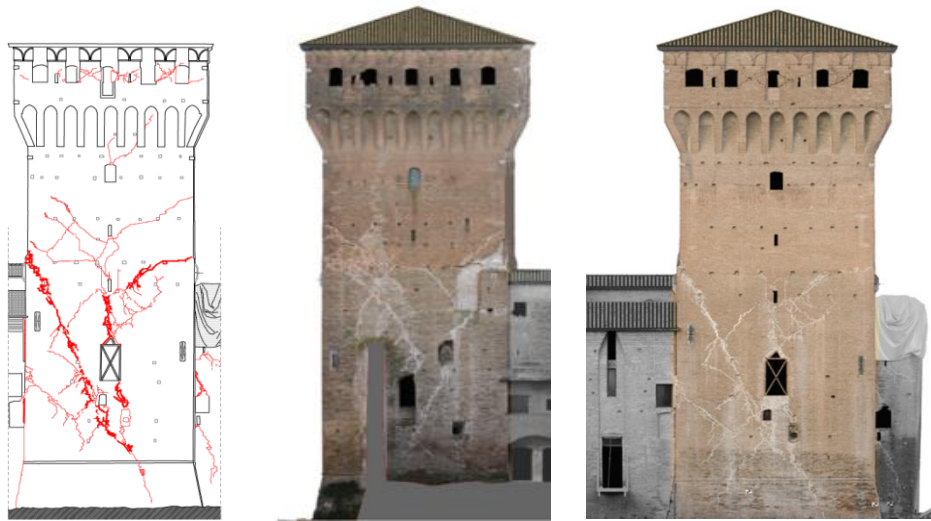
Analisi modale



Degli Abbati et al. 2019, Computers and Structures 213, 51–71



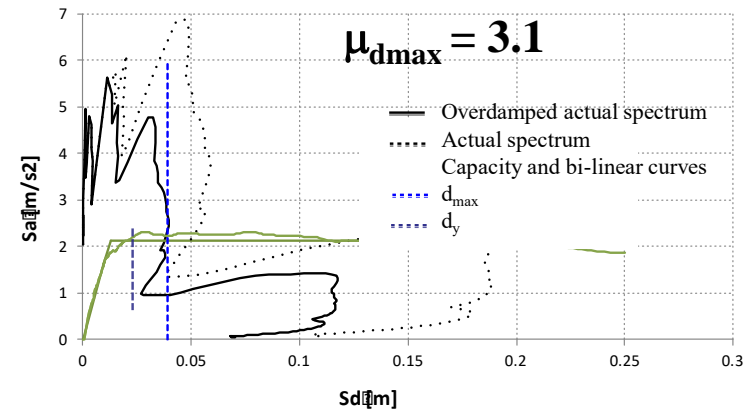
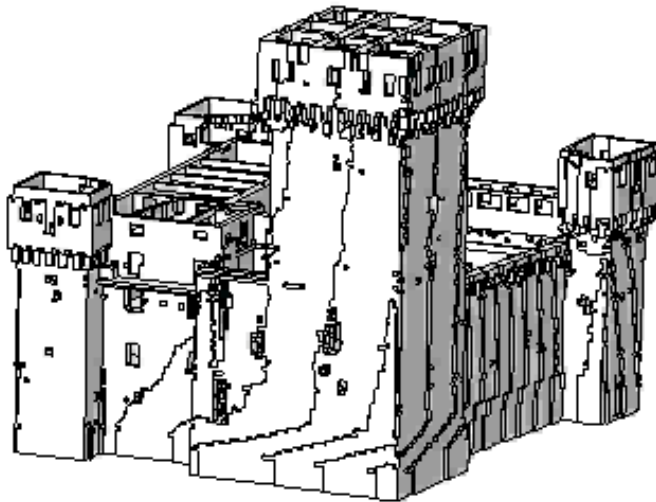
Danno osservato



$$\Gamma = 1.6$$

$$\Gamma M^* = 1.838.986$$

Danno simulato



Degli Abbati et al. 2019, Computers and Structures 213, 51–71

- La nuova Circolare NTC propone metodi di analisi e verifica sismica in continuità con quelli della Circolare del 2009 e allineati con la ricerca scientifica:
 - percorso applicabile ad una casistica più ampia di costruzioni e tipologie
 - una maggiore flessibilità e possibili alternative da scegliere caso per caso
 - un più efficace percorso di conoscenza (analisi preliminare, ottimizzazione del piano delle indagini, uso dei risultati della diagnostica,)
- L'analisi della risposta sismica degli edifici esistenti in muratura è un problema complesso ma che oggi possiamo affrontare con strumenti affidabili e applicabili in ambito professionale.
- Il progetto di miglioramento e adeguamento sismico deve fare tesoro anche delle informazioni qualitative ricavabili dalle analisi nonlineari, che consentono di comprendere il reale comportamento e definire la strategia di intervento.

1. garantire il collegamento tra le pareti



2. edificio scatolare: maggiore danno nel piano



3. favorire la rottura a pressoflessione



Rottura a taglio diagonale

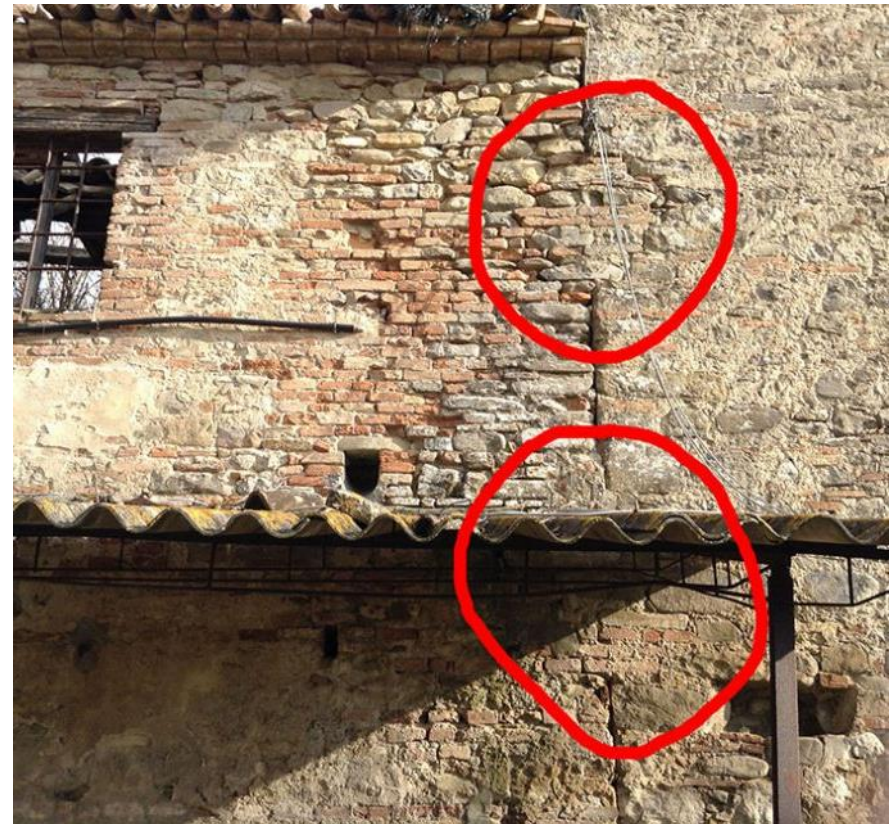


Rottura a pressoflessione

Il meccanismo di pressoflessione ha maggiore duttilità (drift) e facilità di riparazione.

Possibili soluzioni:

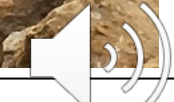
- Consolidare a taglio i pannelli murari
- Evitare di ricucire le soluzioni di continuità



4. evitare gli errori del passato



5. evitare l'accanimento terapeutico





SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

GRAZIE PER L'ATTENZIONE.

***STATI GENERALI
DELLA MURATURA***