



# Università degli Studi di Salerno

*Facoltà di Ingegneria*

---

## **DESIGN-ORIENTED ANALYSIS METHODS FOR MASONRY STRUCTURES IN SEISMIC AREAS: THEORETICAL FORMULATION AND VALIDATION ON EXPERIMENTAL RESULTS**

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile

Relatore: Dott. Ing. Enzo Martinelli

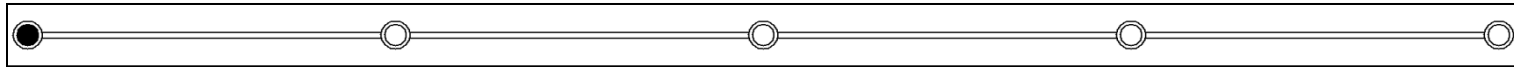
Correlatore: Dott. Ing. Matija Gams

Studente: Gerardo Carpentieri

Matricola: 06201 00179

Anno Accademico: 2010/2011





## ZAG – Slovenian National Building and Civil Engineering Institute

Lo ZAG (Istituto Nazionale Sloveno di Ingegneria Civile e delle Costruzioni) è un'organizzazione indipendente, imparziale e senza fini di lucro che svolge analisi ed attestazioni di conformità dei prodotti di costruzione.

Indirizzo web: <http://www.zag.si>



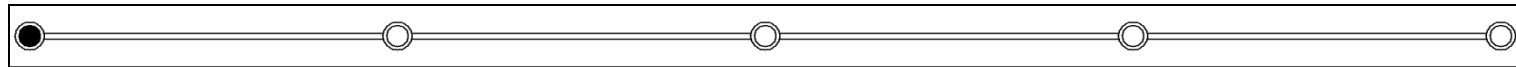
*ZAG - Zavod za gradbeništvo Slovenije  
Dimiceva Ulica, 12  
SI – 1000 , Ljubljana (Slovenia).*



*Modelli di edifici con struttura portante in muratura testati su tavola vibrante.*

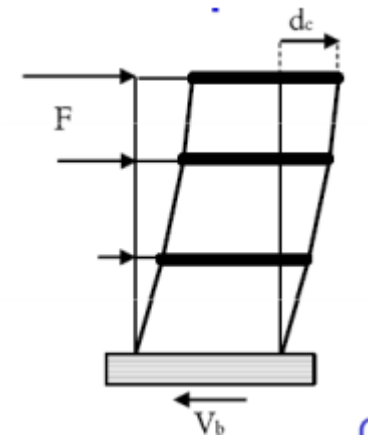
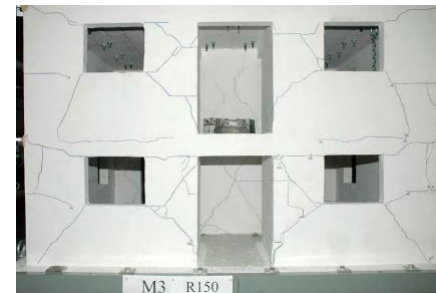
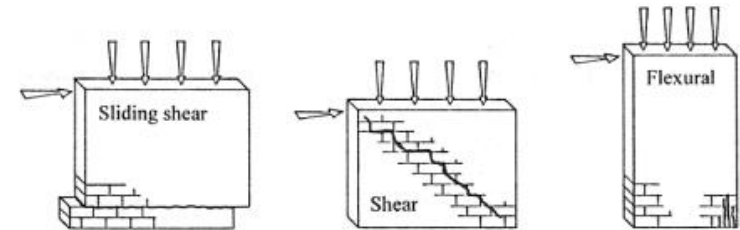


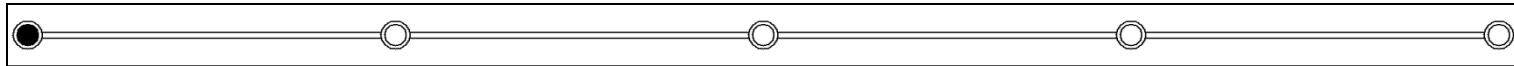
*Pannello in muratura di mattoni forati durante il test a taglio ciclico .*



## Sommario

1. Introduzione e descrizione delle strutture in muratura
  - danni tipici ed interventi
  - materiali
2. Modelli di capacità
  - tipologie di crisi: parete, maschio, fascia
3. Risultati sperimentali
  - test su singoli pannelli murari
  - test su intere strutture in muratura
4. Modellazioni delle strutture in muratura
  - metodi ordinari FEM
  - uso di elementi link
  - approccio a plasticità concentrate
  - implementazione delle prescrizioni normative vigenti
5. Validazione
  - confronti e risultati ottenuti
  - validazione del modello MatLab®





## Motivazioni

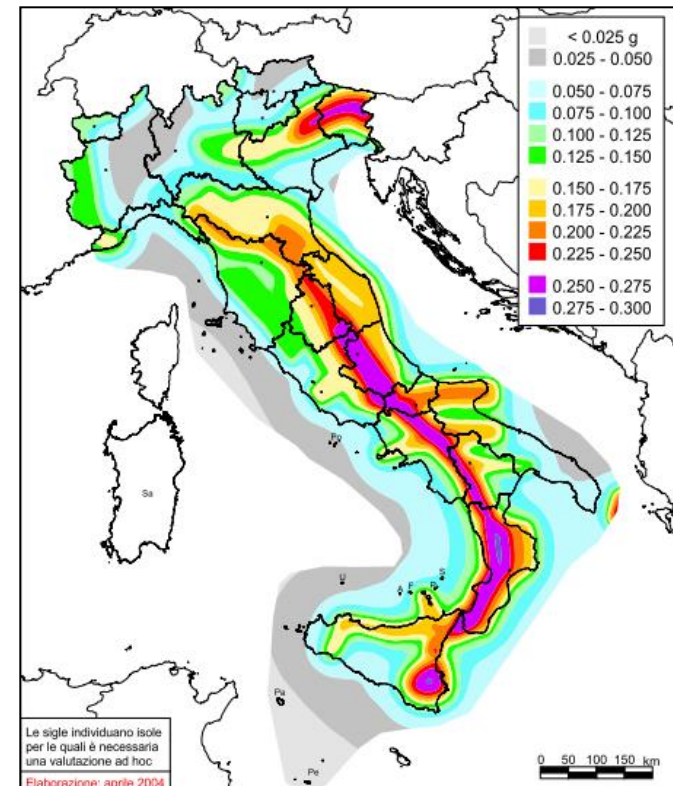
Le strutture esistenti in Italia ed in Europa sono principalmente in muratura.

Tipo di materiale	Edifici ad uso abitativo	[%]
Muratura portante	6903982	61,5
Cemento armato	2768205	24,7
Altro	1554408	13,8
Totale	11226595	100,0

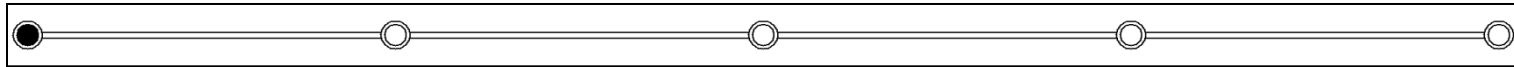
*Edifici ad uso abitativo per tipo di materiale usato per la struttura portante in Italia [Censimento ISTAT 2001].*

L'Italia è un territorio caratterizzato da una medio-alta pericolosità sismica ed è frequentemente interessato da terremoti che causano danni alle murature.

Occorre un metodo di calcolo per le strutture in muratura che consenta di effettuare un progetto orientato (design-oriented) in base alle prescrizioni della normativa vigente [NTC 2008 e Circ. 617].



*Mappa di pericolosità sismica del territorio della Nazione Italiana [O.P.C.M. 28/04/2006 n° 3519].*



## Danni tipici alle strutture in muratura



*Collasso della Prefettura de L'Aquila dopo il terremoto del 2009, M 5,9.*

Le costruzioni in muratura possono collassare quando ci sono problemi come crisi fuori piano delle pareti, non regolarità, assenza di rinforzi.



*Danni importanti e parziale collasso della Chiesa dell'Immacolata Concezione a Paganica.*



*Fessure diagonali con dislocazioni di alcuni cm in una struttura in muratura in Via XX Settembre a L'Aquila.  
[Verderame et al., 2009]*

Il miglior comportamento delle strutture in muratura è raggiunto per azioni nel piano delle pareti. Questa situazione, spesso, porta alla formazione di diverse tipologie di fessure.

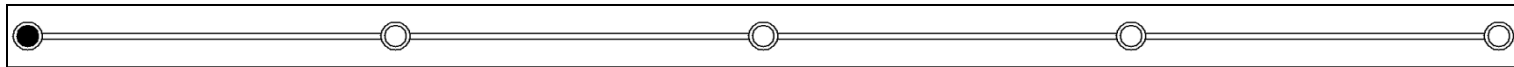
Introduzione

Modelli di capacità

Risultati sperimentali

Modellazioni

Validazione



## Quadro normativo vigente

### Italia



D.M. 14/01/2008 – “Approvazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”

Circ. 02/02/2009 n° 617 – “Istruzioni per l’applicazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”

### Europa



Eurocodice 6 – “Progetto di strutture in muratura”, EN 1996: 2006

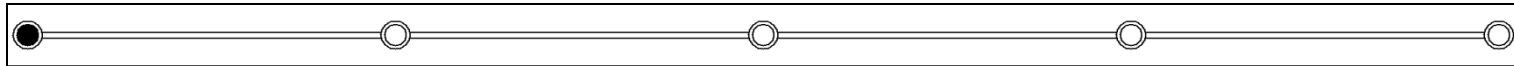
Eurocodice 8 – “Progettazione delle strutture per la resistenza sismica”, EN 1998: 2004

### Stati Uniti



FEMA 356 – “Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings”

ATC 40 – “Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings”



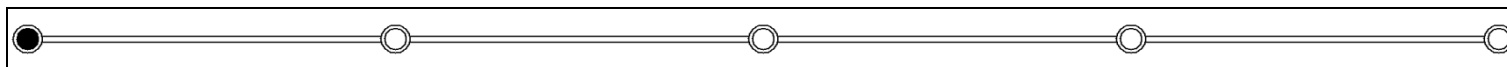
## Proprietà dei materiali

Il materiale muratura è composto da: elementi (naturali o artificiali), malta.

Resistenza di progetto a compressione:	$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M}$	Resistenza a taglio di progetto:	$f_{vd} = \frac{f_{vk}}{\gamma_M}$
Resistenza a taglio caratteristica:	$f_{vk} = f_{vk0} + \mu \cdot \sigma_n$	Valori del fattore $\gamma_M$ :	$\gamma_M = 2,0 \div 3,0$
Modulo di elasticità:	$E = 1000 \cdot f_k$	Modulo a taglio:	$G = 0,4 \cdot E$

### *Classi di malte a composizione prescritta [NTC 2008].*

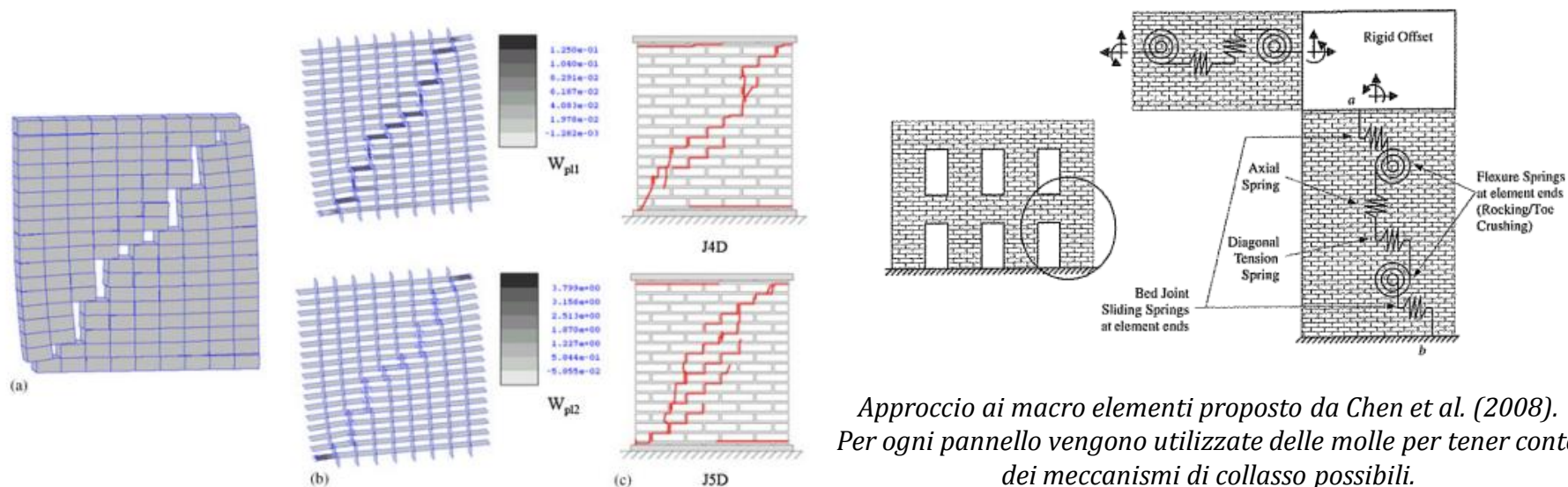
Classe	Tipo di malta	Composizione				
		Cemento	Calce aerea	Calce idraulica	Sabbia	Pozzolana
M 2,5	Idraulica	-	-	1	3	-
M 2,5	Pozzolana	-	1	-	-	3
M 2,5	Bastarda	1	-	2	9	-
M 5	Bastarda	1	-	1	5	-
M 8	Cemento	2	-	1	8	-
M 12	Cemento	1	-	-	3	-



## Modellazioni a disposizione del progettista

Le strutture in muratura vengono spesso modellate utilizzando programmi di calcolo agli Elementi Finiti.

Il reale comportamento non lineare dei pannelli murari porta spesso a dover considerare dei modelli eccessivamente complessi per il progettista.

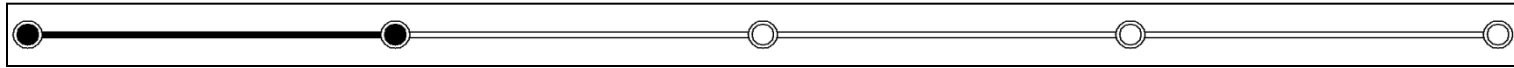


*Approccio di tipo discreto agli Elementi Finiti  
[Macorini & Izzuddin, 2010].*

*Approccio ai macro elementi proposto da Chen et al. (2008).  
Per ogni pannello vengono utilizzate delle molle per tener conto  
dei meccanismi di collasso possibili.*

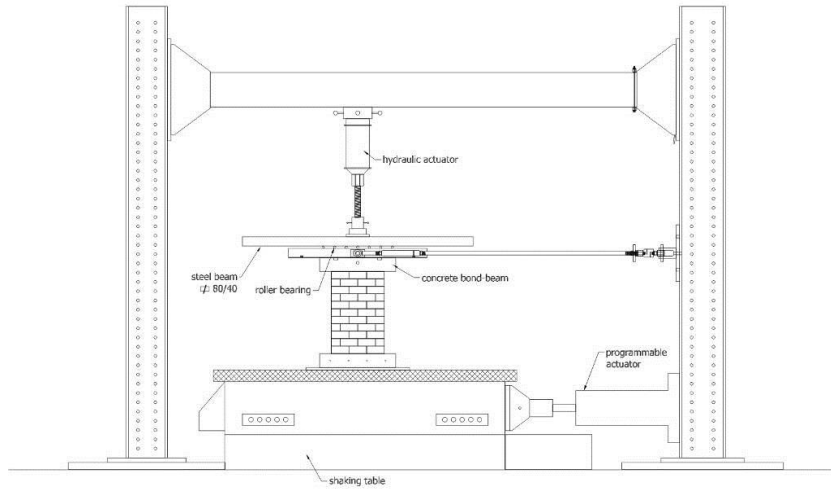
Si rende necessario indagare sulla possibilità di ottenere una modellazione semplificata non lineare e di tipo design-oriented, ovvero che tenga conto delle prescrizioni delle norme attualmente vigenti.



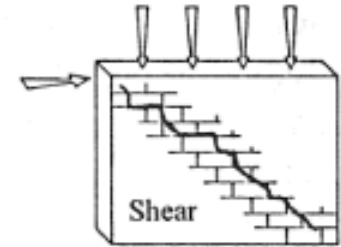


## Modelli di rottura: resistenza a taglio per fessurazione diagonale

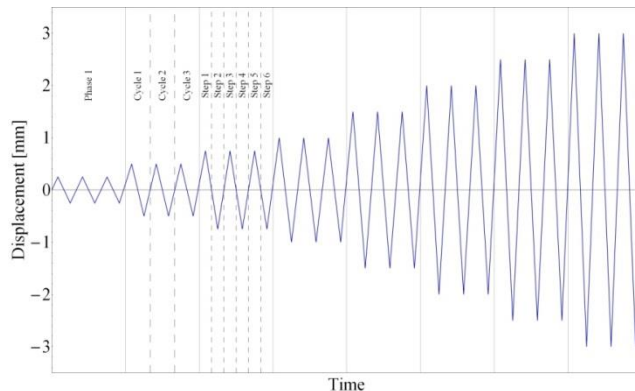
*Procedura di prova.*



*Esempio di collasso con fessure diagonali.*



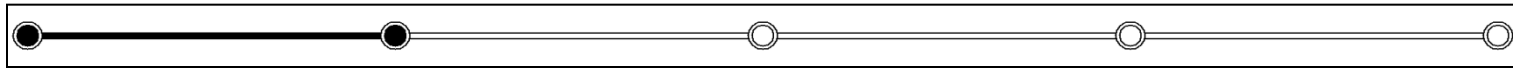
*Storia di spostamenti durante la prova.*



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

Rapporto di snellezza: 
$$b = \frac{h}{L}$$

Tensione normale media: 
$$\sigma = \frac{N}{L \cdot t}$$

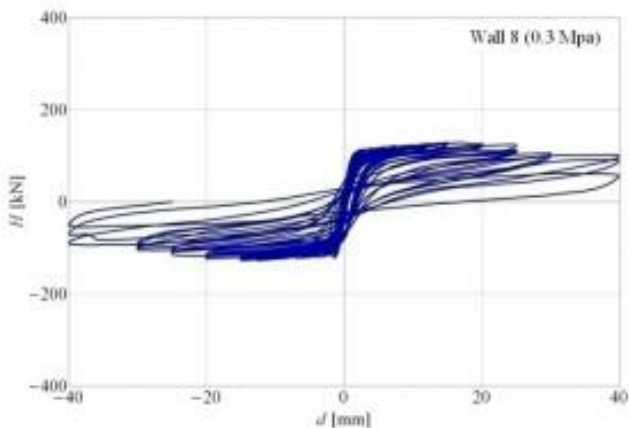


## Modelli di rottura: resistenza a taglio-scorrimento

*Provino pronto per la prova.*



*Registrazione dei dati sperimentali.*



Resistenza a taglio:

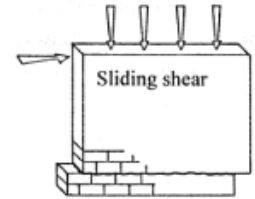
$$f_{vd} = f_{vd0} + \mu \cdot \sigma'$$

Taglio ultimo per scorrimento:  $V_{ss} = D' \cdot t \cdot f_{vd}$

Tensione di compressione normale:  $\sigma' = \frac{N}{t \cdot D'}$

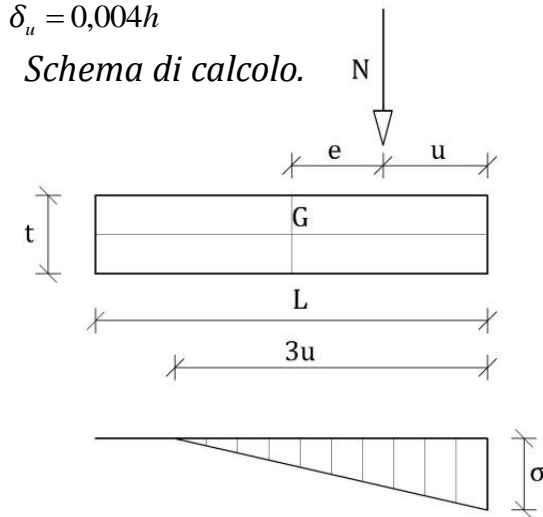
$D' = L$  se:  $e < L / 6$

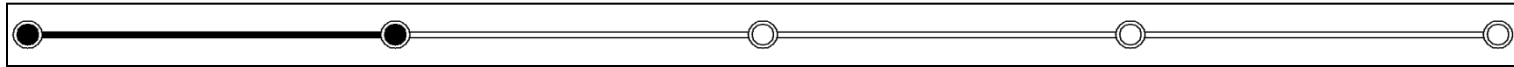
$D' = 3u = 3 \cdot \left( \frac{L}{2} - e \right)$  se:  $e > L / 6$



Spostamento a taglio limite:  $\delta_u = 0,004h$

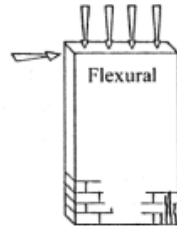
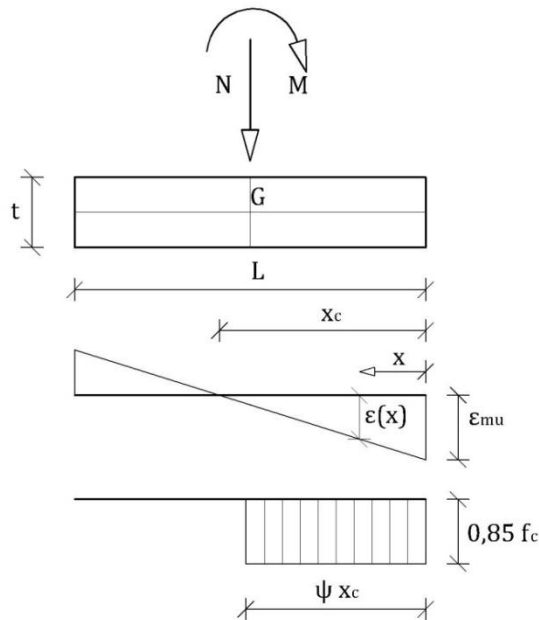
*Provino con crisi dei letti di malta.*





## Modelli di rottura: resistenza a flessione

Schema di calcolo.



Momento ultimo:

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

Taglio ultimo a flessione:

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

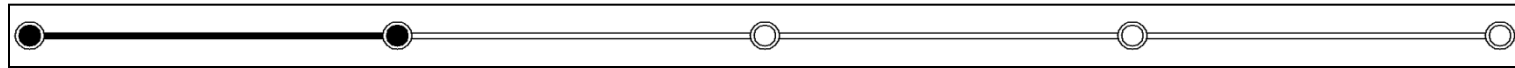
Spostamento limite a flessione:

$$\delta_u = 0,008h$$

*Tipiche crisi a flessione in pannelli in muratura testati a taglio.*

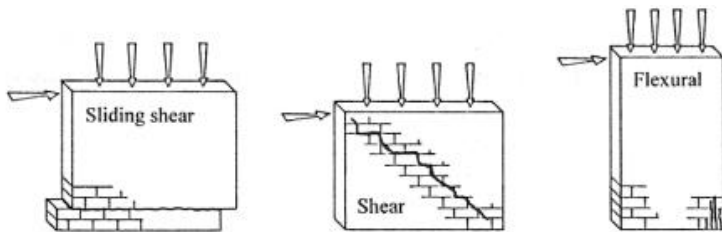
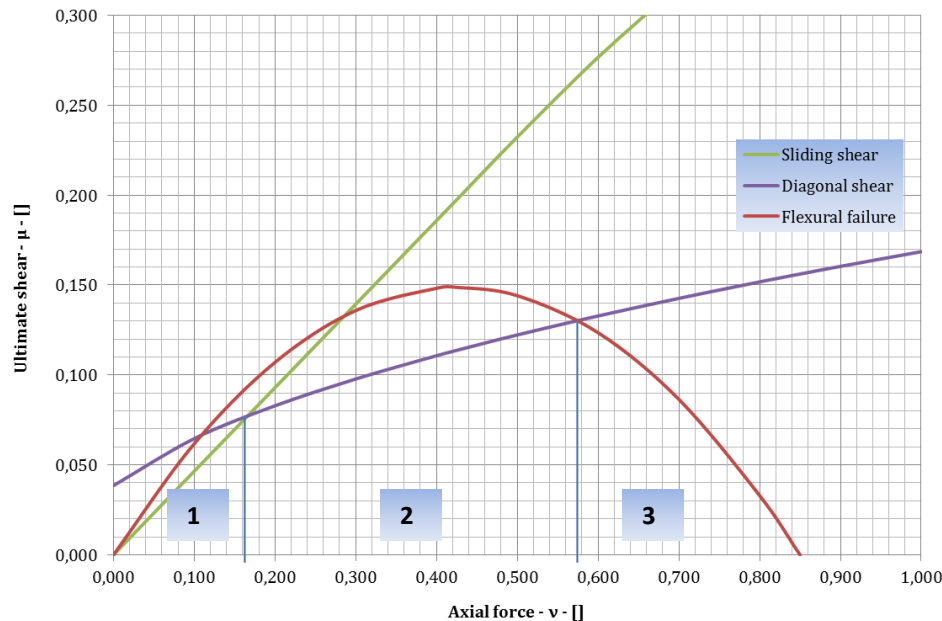
La crisi a flessione accade quando il pannello è soggetto ad alti valori del carico verticale. Questa crisi produce un collasso delle estremità della parete con formazione di fessure pseudo-verticali.





## Modelli di rottura: confronti

*Domini di resistenza delle diverse modalità di collasso.*



Le diverse modalità di collasso dipendono da:

1) proprietà geometriche e meccaniche:

$$t, L, h, f_m, f_{v0};$$

2) entità degli sforzi normali:

$$N = [0, \dots, t L f_m];$$

3) condizioni vincolari e snellezza:

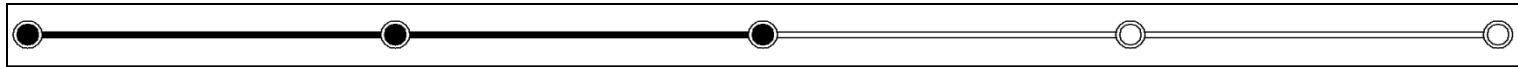
$$\lambda = \frac{h}{L}.$$

Legenda

1) crisi per scorrimento;

2) crisi per fessurazione diagonale,

3) crisi per flessione.

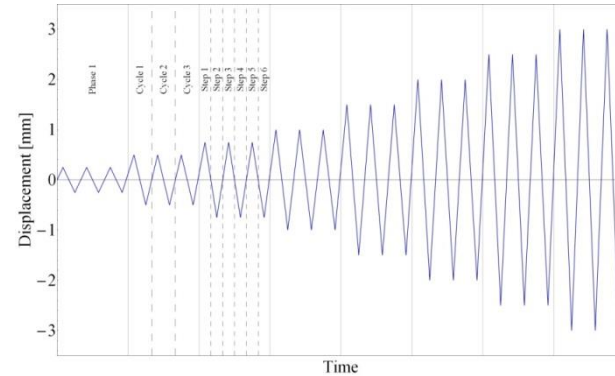
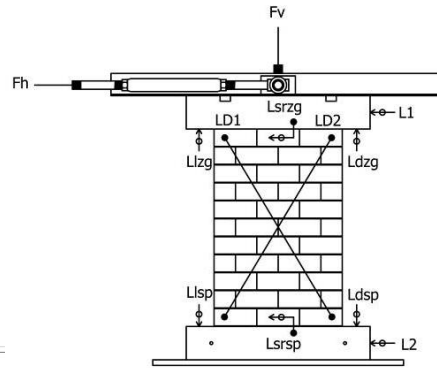
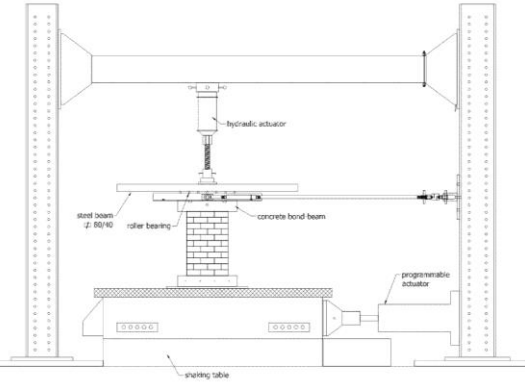


## Test a taglio ciclico di pareti in muratura

Prova eseguita presso: **ZAG** LUBIANA

Dimensioni e strumenti per i modelli per le prove a taglio.

Quadro degli spostamenti imposti.

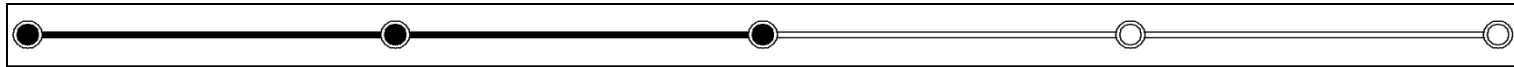


Collasso a flessione (sulla sinistra) ed a taglio (sulla destra).

Meccanismi di crisi e resistenza delle pareti.



Wall	Remark	Failure mode	$F_{h,max}$ [kN]
X-1	Tie columns as M1	shear	5,18
X-2	Plain masonry	flexural	3,19
X-3	Plain masonry	flexural	3,15
X-4	Plain masonry	flexural	3,26
X-5	Plain masonry	flexural	3,34
X-6	Tie columns as M1	shear	5,00
X-7	Tie columns as M3	flexural	5,79
X-8	Tie columns as M3	shear	6,47
X-9	Tie columns as M3	shear	6,61



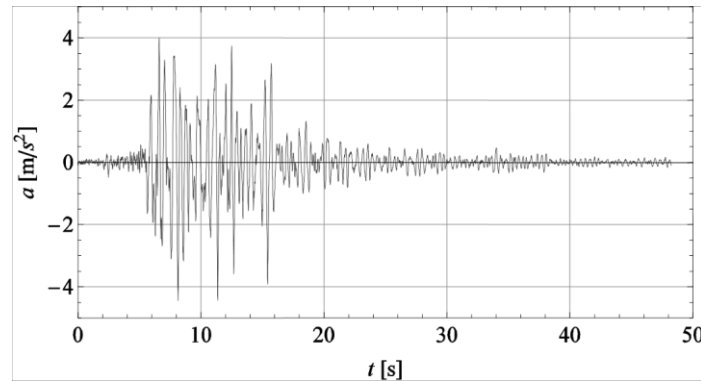
## Test su tavola vibrante

Nomi dei provini M1 (3 piani), M2(3 piani), M3(4 piani).



Vista assonometrica del modello M3 ( $h = 2,65$  m) e strumentazioni installate.

I provini sono realizzati in scala 1:4 e vengono caricati per simulare l'esercizio della struttura.



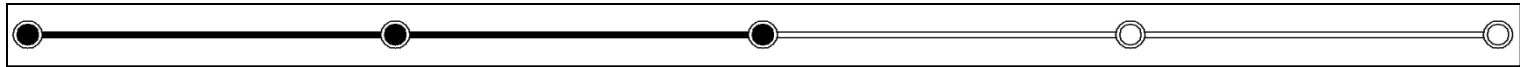
Componente N-S dalla storia di accelerazioni del sisma del Montenegro ( $M_w=6,9$ ), 15 Aprile 1979 (PGA = 0,43 g).



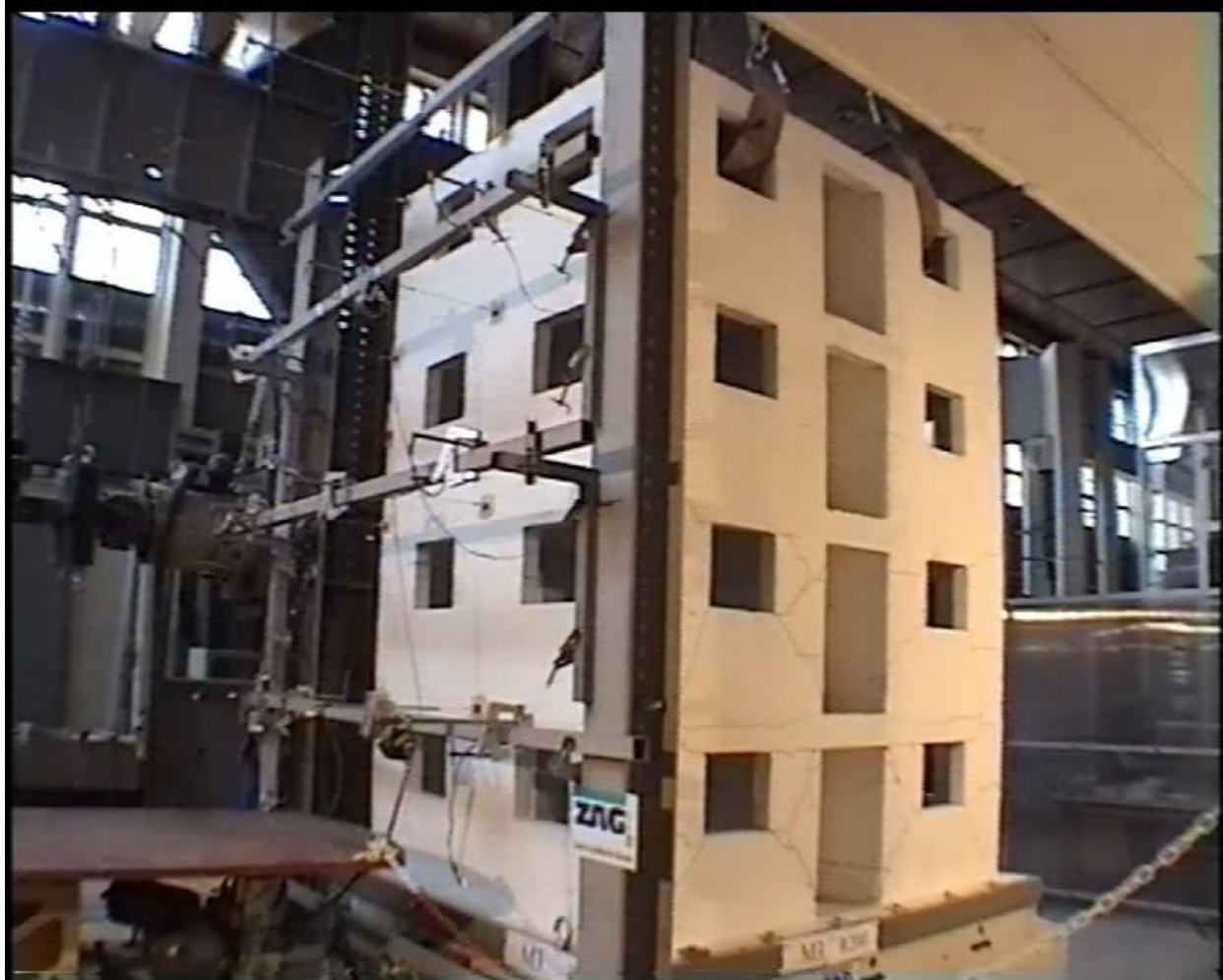
Dimensioni del modello in piano (2,19x1,71 m).

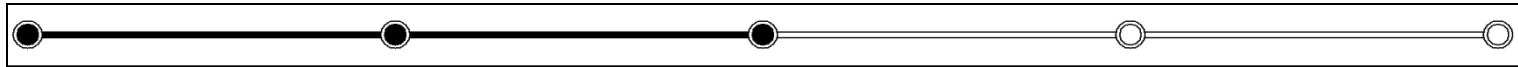
Distribuzione delle masse per ogni piano.

	1st storey [kg]	2nd storey [kg]	3rd storey [kg]	4th storey [kg]
walls	175	175	175	79
floor	406	406	406	406
weight	560	560	560	680
total	1141	1141	1141	1165
grand total	4588 kg			



**Video prova: modello M3, livello di intensità R200 (2 volte PGA)**





## Tavola vibrante: esecuzione del test



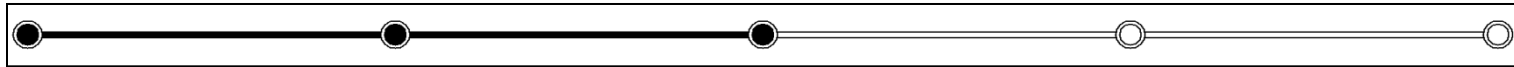
R100 => PGA = 0,43 g

1) Fessure nelle pareti verticali del modello M3, osservate dopo i test R100 e R150.

2&3) Seri danni alle pareti del piano terra e forti danni alle pareti del primo piano vicino al collasso del modello M3 dopo i test R200 e R250.

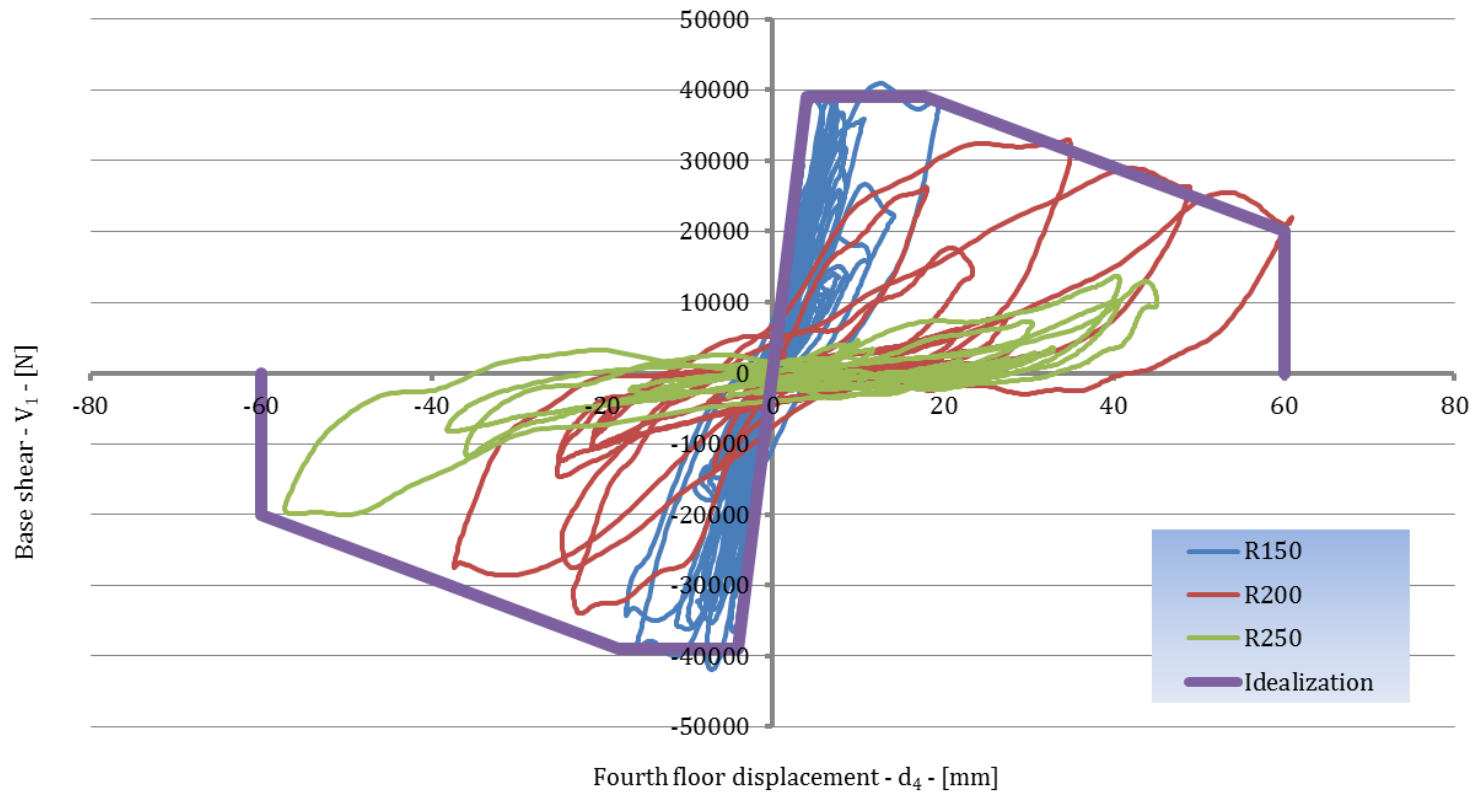






## Tavola vibrante: risultati e idealizzazioni

*Taglio alla base versus spostamento al quarto piano: misurazioni ed idealizzazioni.*



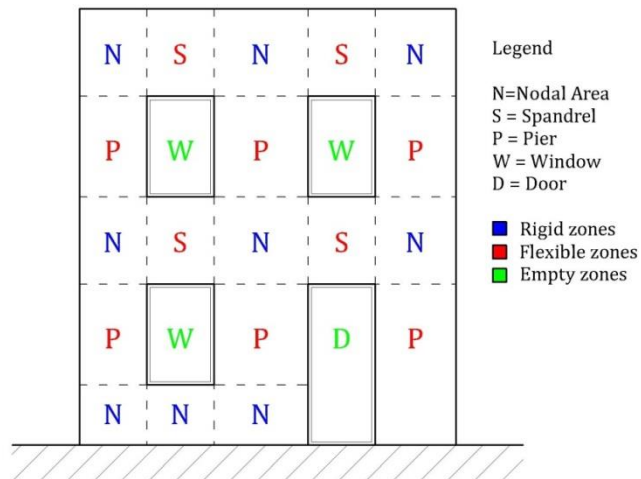


## Modelli di capacità

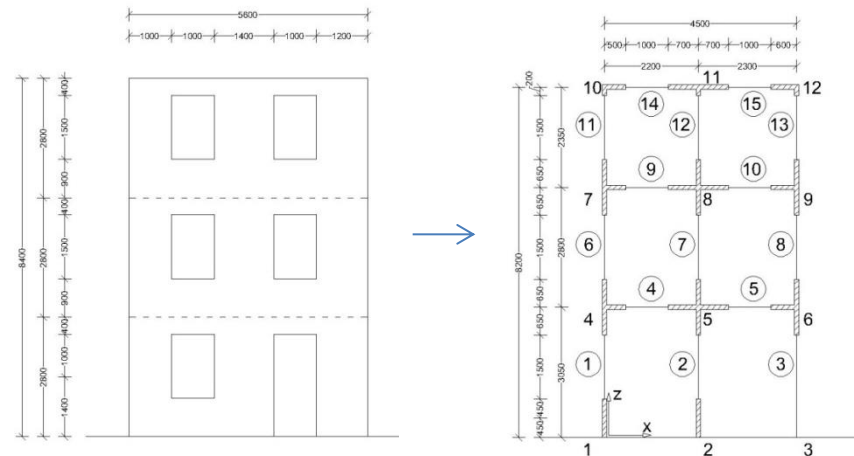
I metodi di analisi si possono dividere in:

- modelli mono-dimensionali: metodo POR [Tomazevic, 1978], metodo SAM [Magenes et al., 2000];
- modelli bi-dimensionali: elementi finiti di tipo shell;
- modelli tridimensionali.

*Modellazione di un parete in muratura con macro-elementi.*



*Parete in muratura (dalla Circ. 21745 del 1981, sulla sinistra) e la relativa modellazione a telaio (sulla destra).*



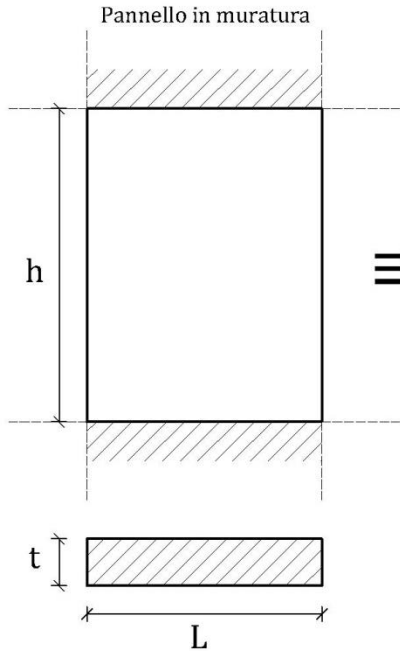
Una parete in muratura può essere divisa nei seguenti macro-elementi:

- zone nodali (sono parti che si comportano rigidamente durante l'analisi);
- zone deformabili: maschi (ad asse verticale), fasce (ad asse orizzontale).

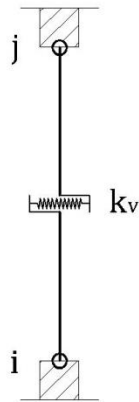


## Descrizione delle modellazioni utilizzate

*Modellazione di un pannello murario.*



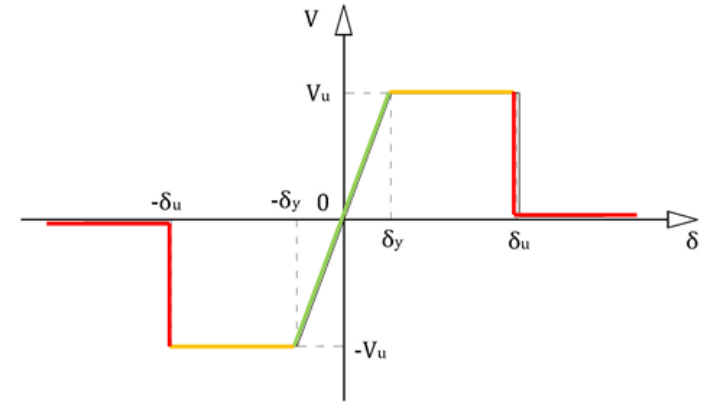
Modello con NLink



Modello a quattro molle



*Comportamento degli elementi link.*



L'elemento link concentra tutta la deformabilità nella molla centrale e non costituisce un elemento frame.

Nel modello a quattro molle, invece, la parte deformabile è un elemento frame con delle molle all'estremità.

Taglio ultimo:  $V_u = \min(V_{ds}; V_{ss}; V_f)$

Spostamento elastico:  $\delta_y = \frac{V_u}{k}$

Rigidezza a taglio:  $k = \frac{1}{\frac{h^3}{12 \cdot E \cdot I} + \frac{\chi \cdot h}{G \cdot A}}$

Spostamento ultimo:  $\delta_u = (0,004 \div 0,008) \cdot h$

Dove:

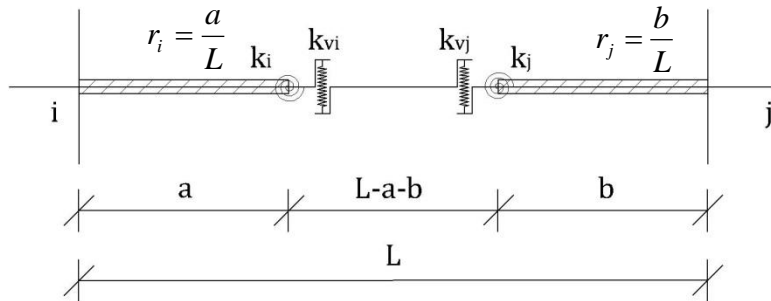
- $V_{ds}$  = taglio ultimo per fessurazione diagonale;
- $V_{ss}$  = taglio ultimo per scorrimento;
- $V_f$  = taglio ultimo per flessione.



## Modellazione avanzata in MatLab®: formulazione lineare

La seguente modellazione a quattro molle consente l'analisi non lineare in storia di spostamenti di pareti in muratura. Si procede per step di incrementi di spostamenti.

*Elemento frame con offset rigidi e molle.*



Fattori di deformabilità:

$$\alpha_{ij} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{3 \cdot EI} + \frac{1}{k_i} + \frac{2}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} \cdot \frac{1}{k_v} + \frac{\chi}{GA \cdot L}$$

$$\alpha_{ji} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{3 \cdot EI} + \frac{1}{k_j} + \frac{2}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} \cdot \frac{1}{k_v} + \frac{\chi}{GA \cdot L}$$

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

Definizione della matrice di trasformazione:

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

Forma simbolica:  $\underline{v}' = \underline{T} \cdot \underline{v}$

Relazione della parte deformabile:  $\underline{f}' = \underline{K}' \cdot \underline{v}' + \underline{f}'_0$

Relazione di tutto il frame:  $\underline{f} = \underline{K} \cdot \underline{v} + \underline{f}_0 + \underline{f}''_0$

Rotazione ed assemblaggio per l'intera struttura.

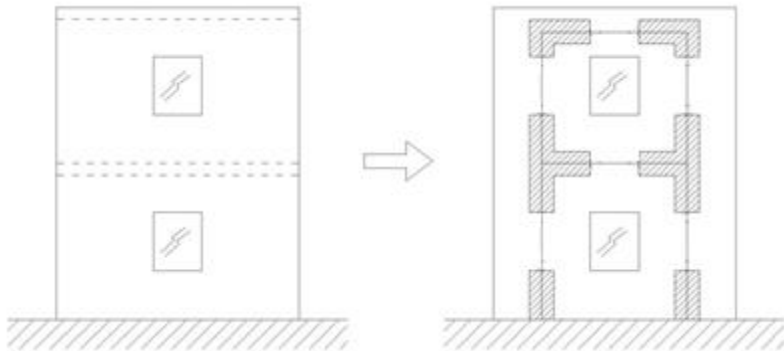
Relazione finale:  $\underline{F} = \underline{K} \cdot \underline{s} + \underline{F}_0$



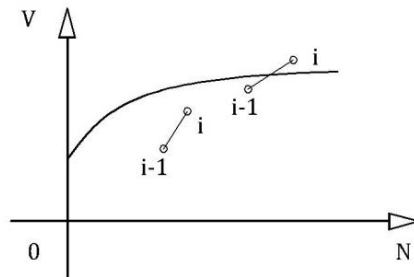
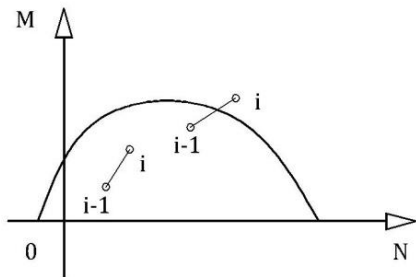
## Modello a plasticità concentrate: analisi non lineare

L'eventuale correzione plastica viene eseguita controllando i domini di resistenza in corrispondenza di ogni molla.

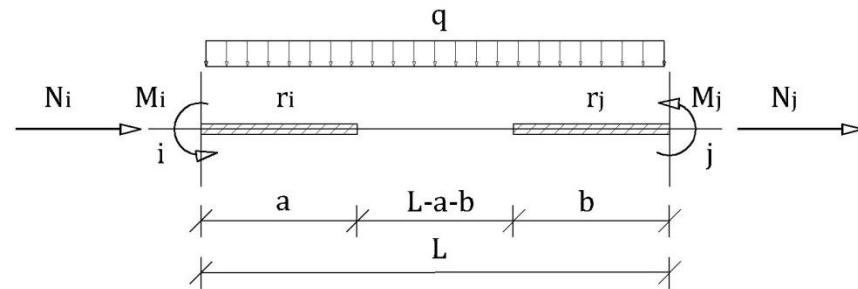
*Analisi elastica con telai equivalenti.*



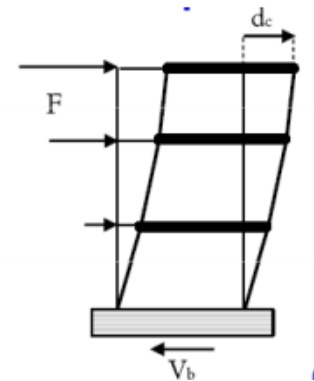
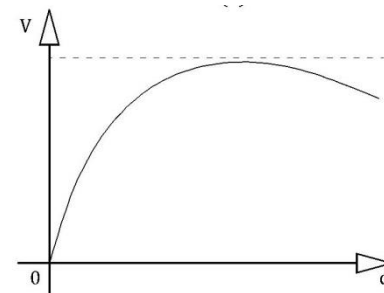
*Secondo step: correzione plastica*

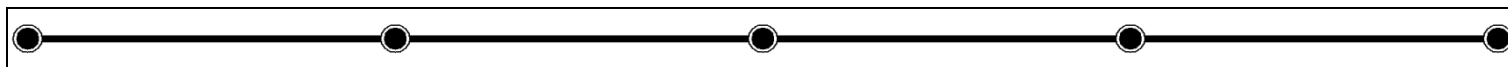


*Primo step: predizione elastica*



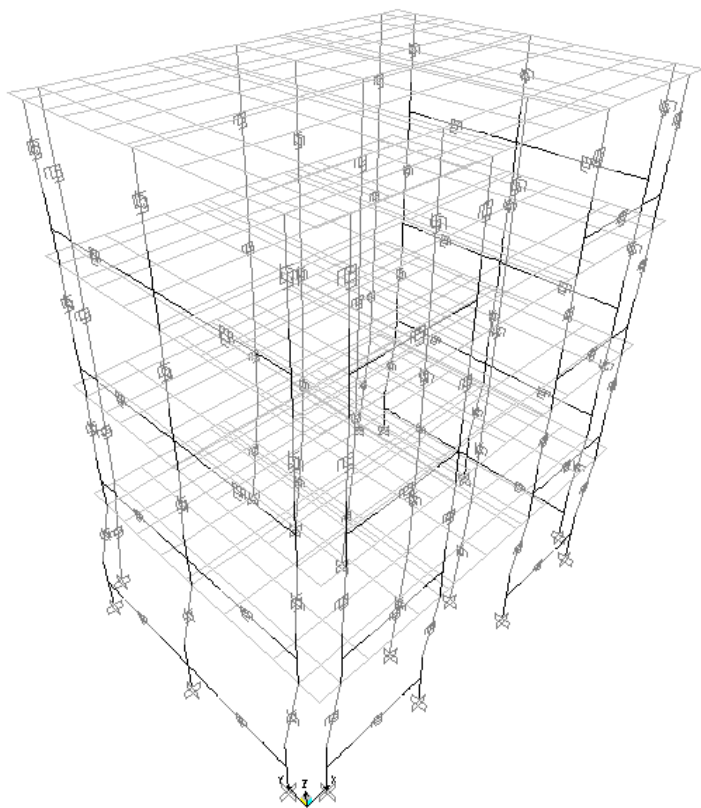
*Risultato finale: curva di pushover in controllo di spostamenti.*



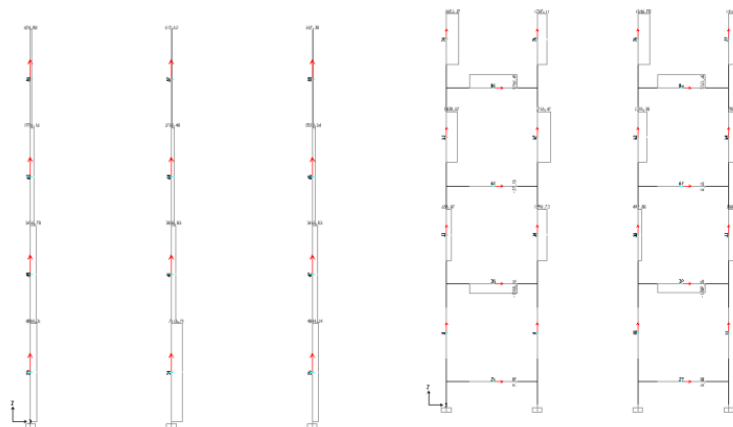


## Analisi di pushover non lineare con elementi link

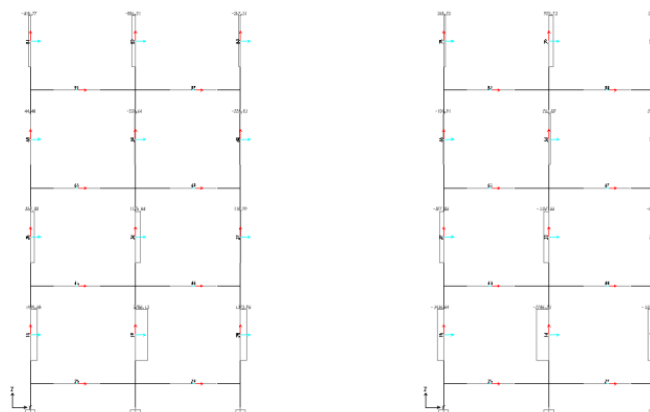
*Modellazione della struttura con elementi link e con shell.*



*Taglio nei link pareti Sud e Nord.*



*Taglio nei link: pareti Ovest ed Est.*

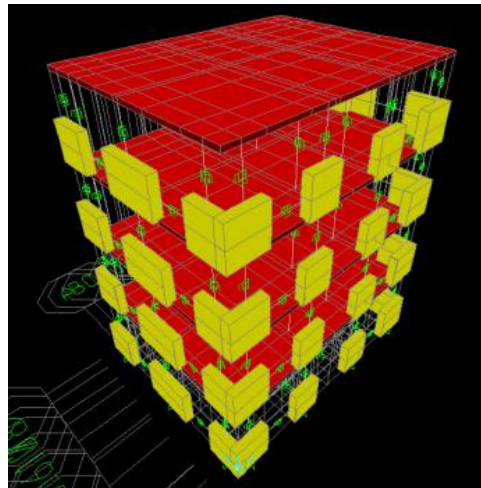




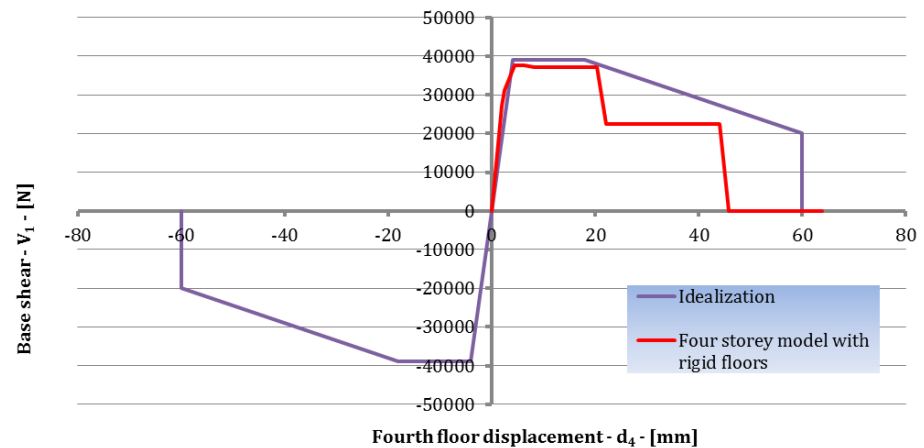
## Confronto con risultati sperimentali



*Modello reale testato sulla tavola vibrante.*



*Modellazione in SAP2000® con NLLink.*



*Confronti tra involucro dei dati sperimentali e curva di pushover ottenuta dal modello a quattro piani con piani rigidi e controllo di spostamento sulla sommità della struttura.*

I risultati del modello interpretano sufficientemente bene i dati sperimentali.

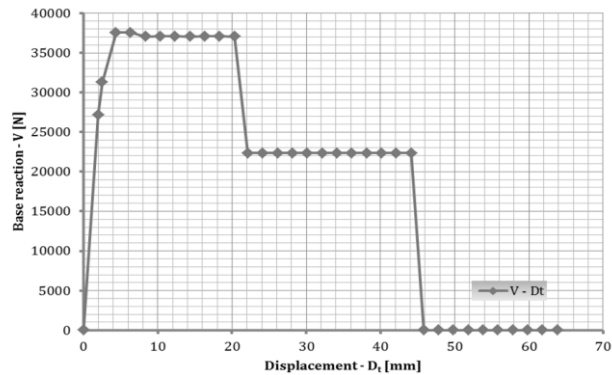
Con la curva di pushover è stato possibile:

- applicare il metodo N2 proposto da Fajfar et al. (2000);
- controllare lo stato degli elementi link e la modalità di collasso.

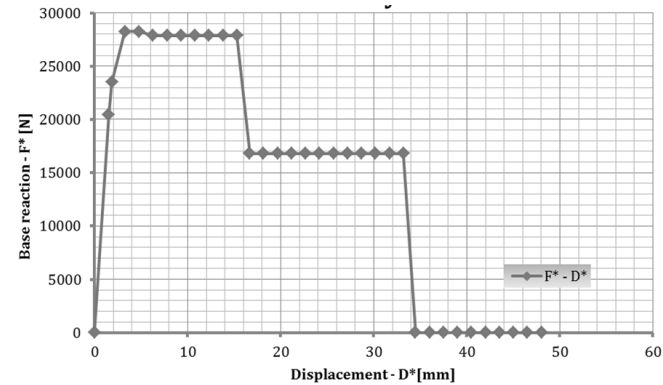
Il modello in SAP2000® può essere utilizzato anche per analisi dinamiche modali.



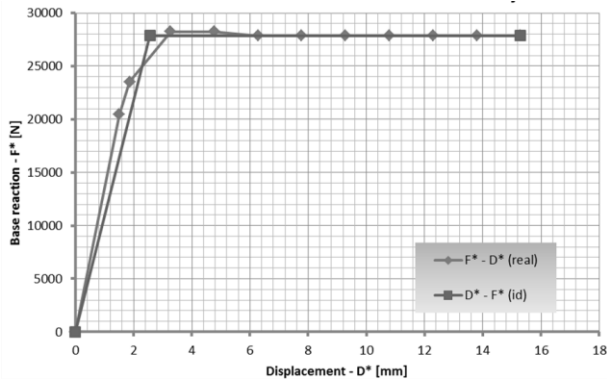
## Curva di pushover e metodo N2 [Fajfar et al., 2000]



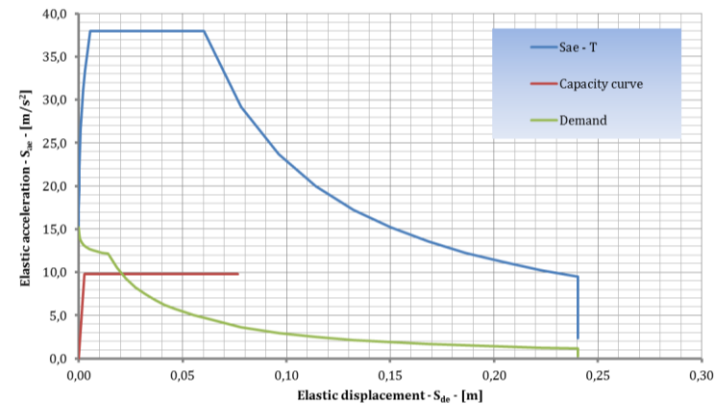
Curva di pushover con distribuzione lineare e piani rigidi. Sistema MDOF.



Curva di pushover con distribuzione lineare e piani rigidi. Sistema SDOF.



Idealizzazione bilineare della curva di pushover.



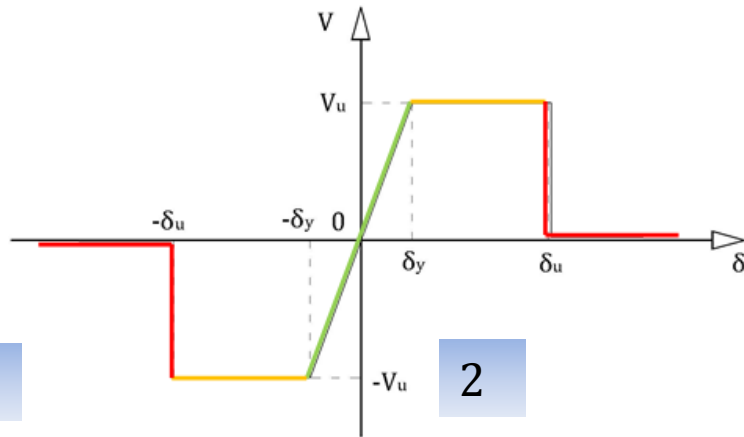
Calcolo della domanda di spostamento plastico.





## Risultati del metodo N2: stato degli elementi

*Comportamento degli elementi link.*

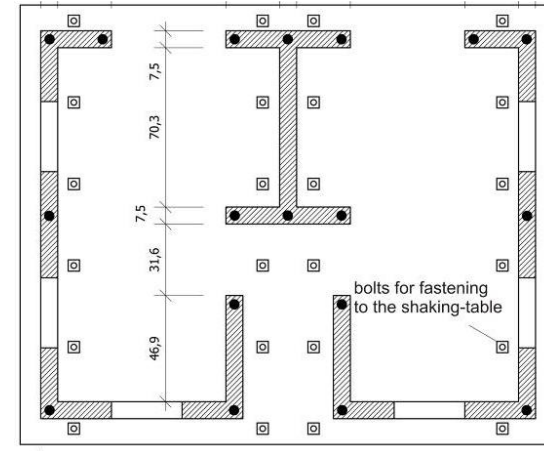


1

2

3

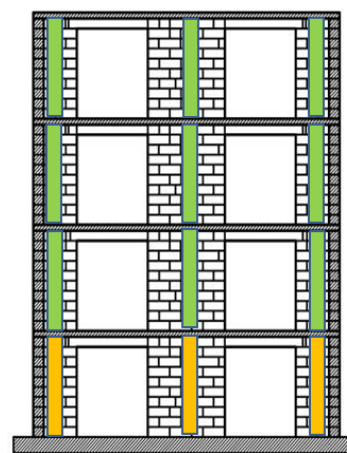
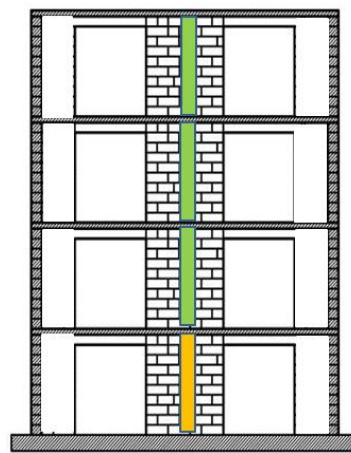
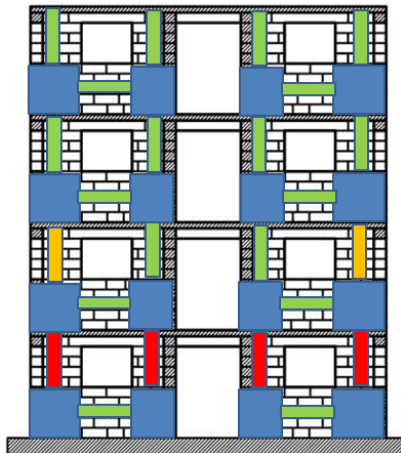
Direzione del sisma.



1

2

3



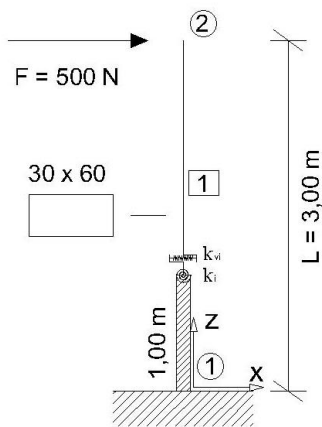
Status degli elementi link  
allo step 15 (27,20 mm) con  
piani rigidi.

- (1) parete nord;
- (2) parete centrale;
- (3) parete sud.

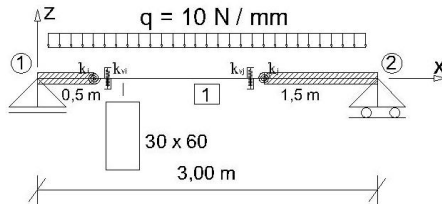


## Validazione della formulazione lineare

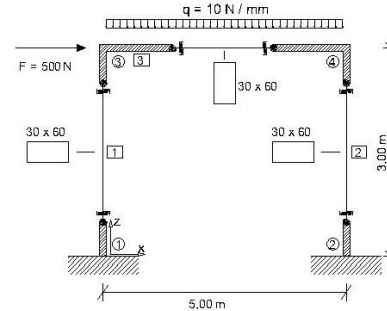
Test 1 - 3.



Test 4 - 5.



Test 6 - 9.



Tipologie di test:

- a) trave elastica;
- b) trave elastica con offset rigidi;
- c) trave elastica con offset rigidi e molle.

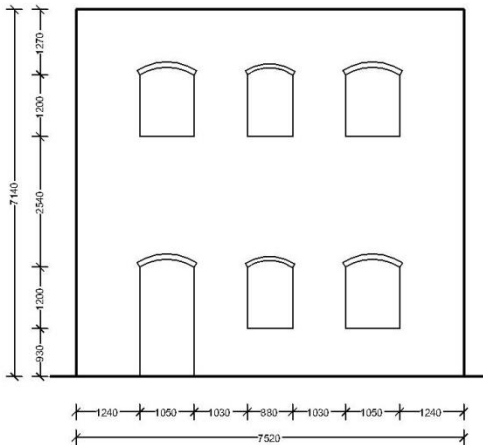
Nella tabella è possibile osservare che i risultati forniti dal codice sviluppato in MatLab® sono in linea con i dati forniti dal SAP2000®.

Test	Joint	MatLab®			SAP2000®			Variazioni percentuali		
		u	v	f <sub>y</sub>	u	v	f <sub>y</sub>	u	v	f <sub>y</sub>
		[mm]	[mm]	[°]	[mm]	[mm]	[°]	[%]	[%]	[%]
1 a	2	1,1837	-0,1116	0,0006	1,1837	-0,1116	0,0006	0,00	0,00	0,00
2 b	2	0,3645	-0,1116	0,0003	0,3640	-0,1116	0,0003	0,14	0,00	-1,81
3 c	2	2,3690	-0,1116	0,0013	2,3692	-0,1116	0,0013	-0,01	0,00	0,00
4 a	1	0,0000	0,0000	-0,0038	0,0000	0,0000	-0,0038	-	-	0,00
4 a	2	0,0000	0,0000	0,0038	0,0000	0,0000	0,0038	-	-	0,00
5 b	1	0,0000	0,0000	0,0018	0,0000	0,0000	0,0018	-	-	0,00
5 b	2	0,0000	0,0000	-0,0018	0,0000	0,0000	-0,0018	-	-	0,00
6 c	1	0,0000	0,0000	0,0141	0,0000	0,0000	0,0142	-	-	-0,70
6 c	2	0,0000	0,0000	-0,0124	0,0000	0,0000	-0,0125	-	-	0,80
7 a	1	0,4544	-0,8688	0,0045	0,4544	-0,8688	0,0045	0,00	0,00	0,67
7 a	2	0,0645	-0,8741	-0,0043	0,0645	-0,8741	-0,0043	0,00	0,00	0,92
8 b	1	0,4006	-0,8683	0,0026	0,4006	-0,8683	0,0026	0,00	0,00	-0,38
8 b	2	-0,2359	-0,8745	-0,0026	-0,2355	-0,8745	-0,0026	0,17	0,00	-1,17
9 c	1	0,9349	-0,8685	0,0139	0,9370	-0,8685	0,0139	-0,22	0,00	0,07

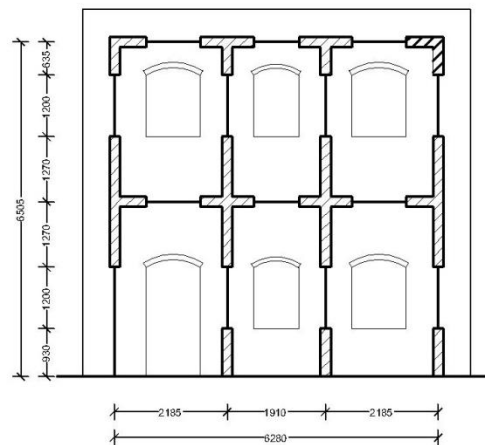


## Validazione della formulazione non lineare

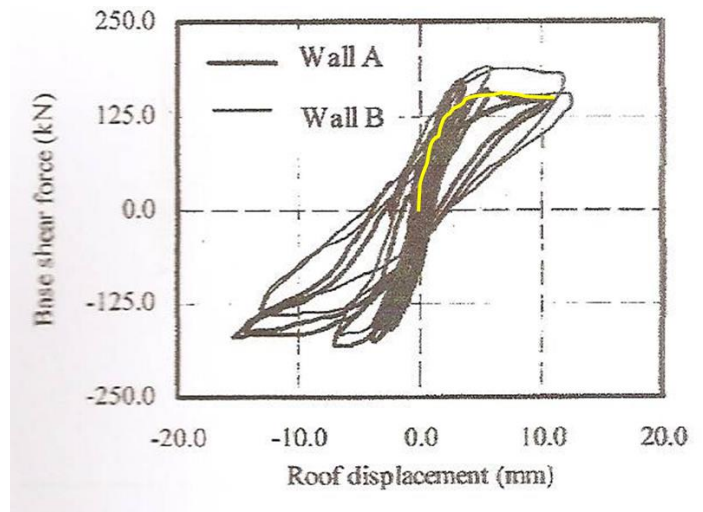
Parete reale [Yi et al., 2006].



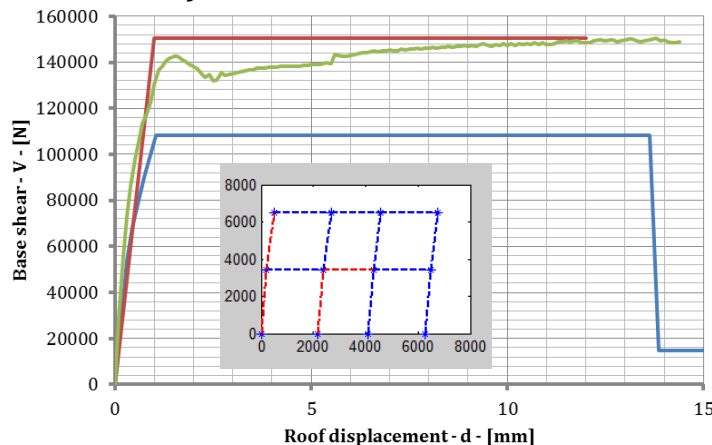
Modellazione in MatLab®.



Inviluppo dei dati sperimentali [Yi et al., 2006].



Confronti delle curve di Pushover.

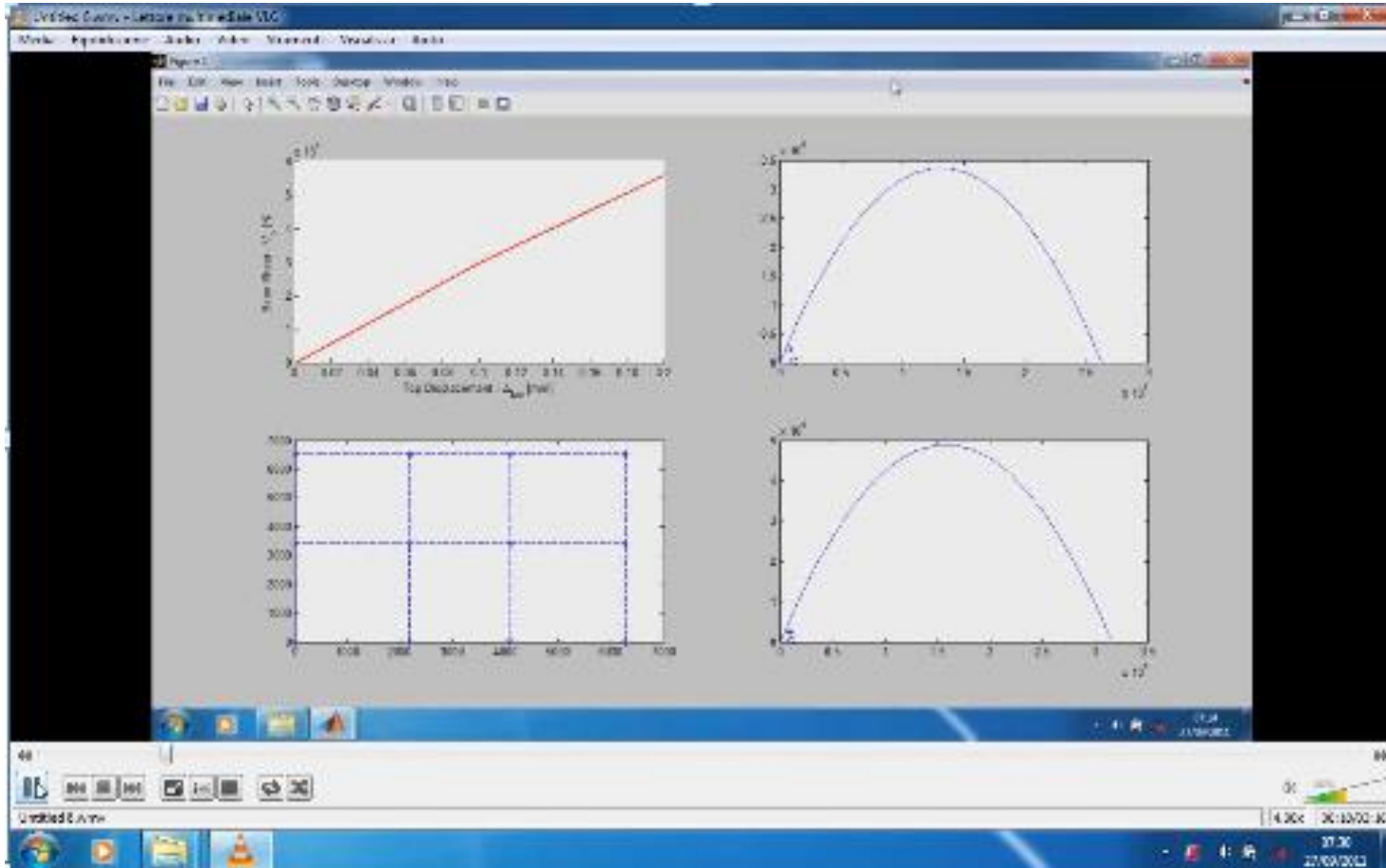


Legenda:

- 1) idealizzazione dei dati sperimentali;
- 2) modellazione MatLab®;
- 3) modellazione SAP2000®;
- 4) inviluppo dei dati sperimentali.

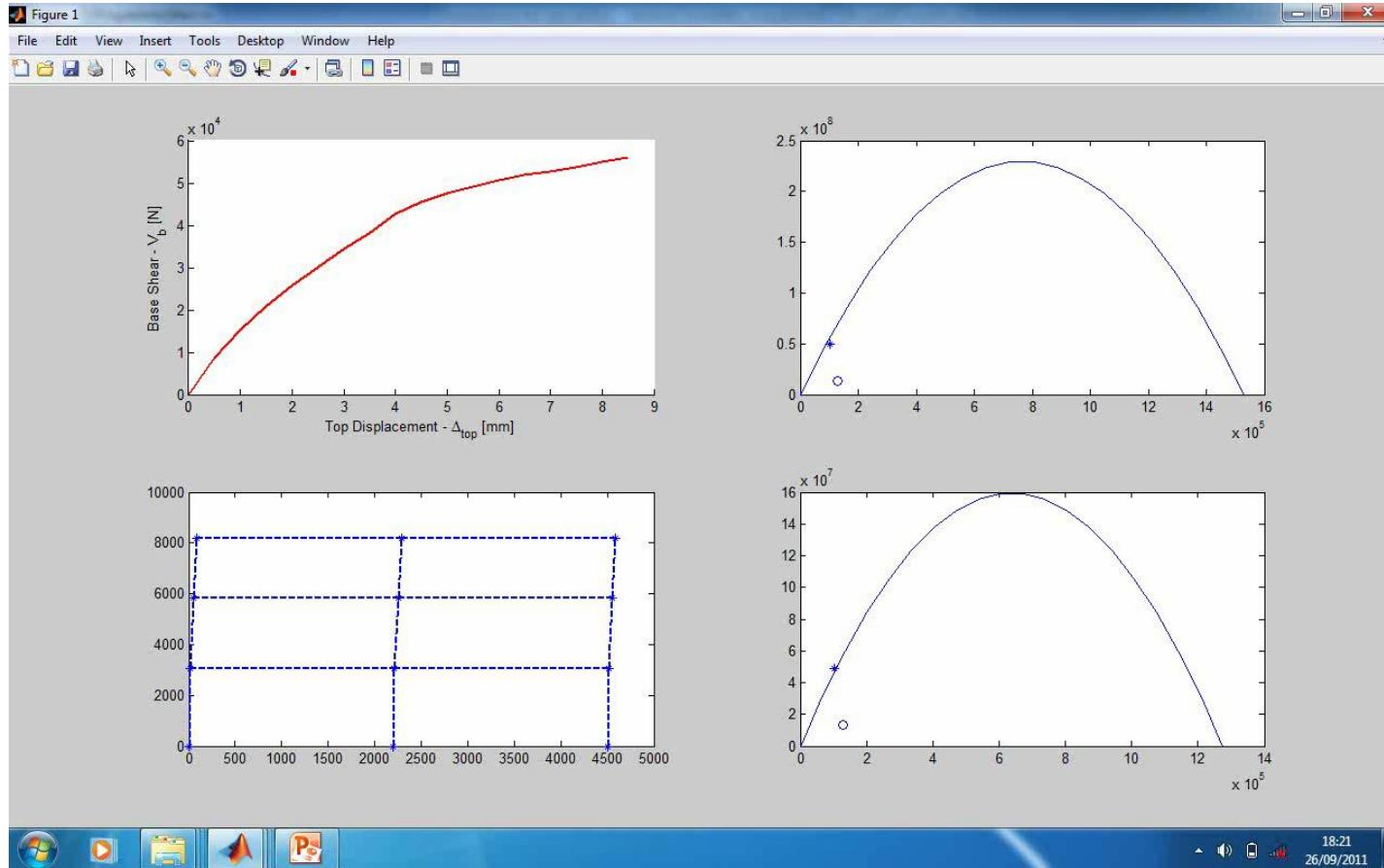


## Video dell'analisi in MatLab (Pareti AB)





## Video dell'analisi in MatLab (Parete Circolare n° 21745)





## Conclusioni

Questo lavoro ha prodotto due metodi non lineare a telaio equivalente per l'analisi di semplici strutture in muratura; il primo con elementi link in ambiente SAP2000<sup>®</sup>, il secondo con quattro molle ed in ambiente MatLab<sup>®</sup>.

Ogni modello deve consentire un controllo della capacità sismica delle strutture in muratura con lo scopo di avere una progettazione orientata (design-oriented) che può essere utilizzata dal progettista grazie all'implementazione di tutte le prescrizioni delle norme in vigore.

Un punto di forza della modellazione a telaio è l'elemento frame. In particolare, il codice in MatLab<sup>®</sup>, prima utilizza un frame elastico (con tratti deformabili e tratti rigidi) per ottenere un predizione elastica. Dopo, se i domini di resistenza sono violati, vengono introdotte delle plasticità concentrate alle estremità della parte deformabile costituite da molle (taglianti e/o rotazionali) con rigidezza variabile.

I prossimi sviluppi del modello avanzato a quattro molle possono riguardare l'estensione al caso delle strutture 3D con l'implementazione di un codice numerico per ottenere un'analisi non lineare in storia di spostamenti.

Introduzione

Modelli di capacità

Risultati sperimentali

Modellazioni

Validazione



**Grazie per l'attenzione !**