

**Collegio dei Geometri e dei Geometri Laureati  
Reggio Emilia - 26 novembre 2010**

---



**Modellazione numerica ed utilizzo di  
codici di calcolo commerciali  
*(ovvero non fidiamoci degli ingegneri)***

---

***Dott. Ing. Nicola GAMBETTI, Libero Professionista***

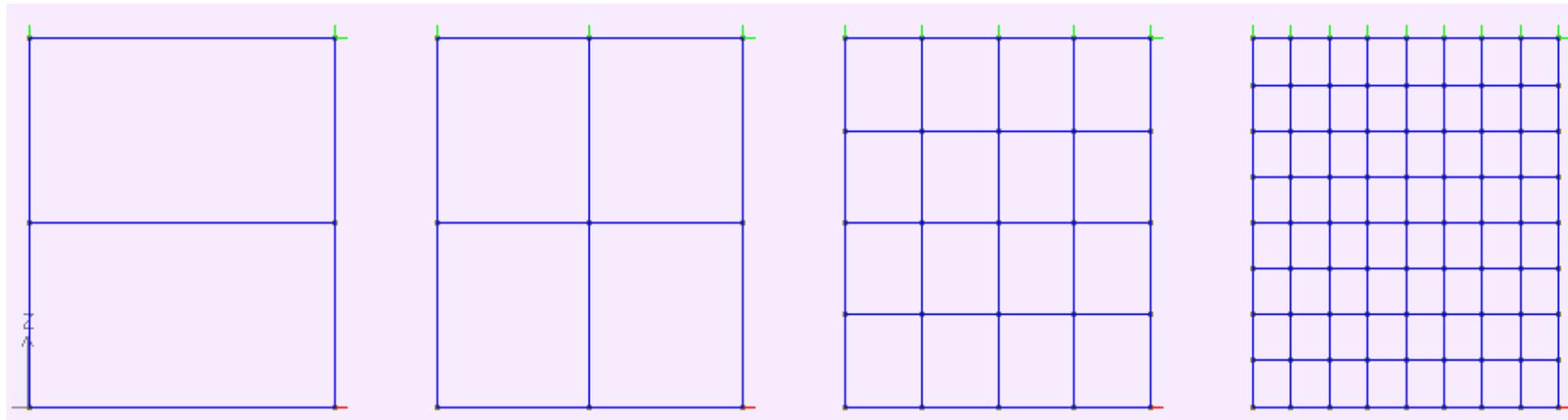
# NTC 2008 – Strutture in muratura



1. Analisi statica agli e.f. di un maschio murario
2. Semplici analisi dinamiche
3. Analisi statica di un edificio a struttura mista c.a. e muratura portante
4. Analisi di un edificio esistente in muratura
5. Analisi di un edificio storico
6. Confronto fra risultati sperimentali, analisi limite e programmi commerciali

## Analisi statica di un maschio murario

La normativa vigente (NTC08) impone di eseguire le verifiche di resistenza in termini delle caratteristiche delle sollecitazioni ( N,M,T) i codici di calcolo agli elementi finiti valutano le componenti del tensore delle tensioni nei punti di Gauss degli elementi e talvolta definiscono delle “macro” per risalire da esse alle sollecitazioni. Occorre un opportuno senso critico per interpretare i risultati.



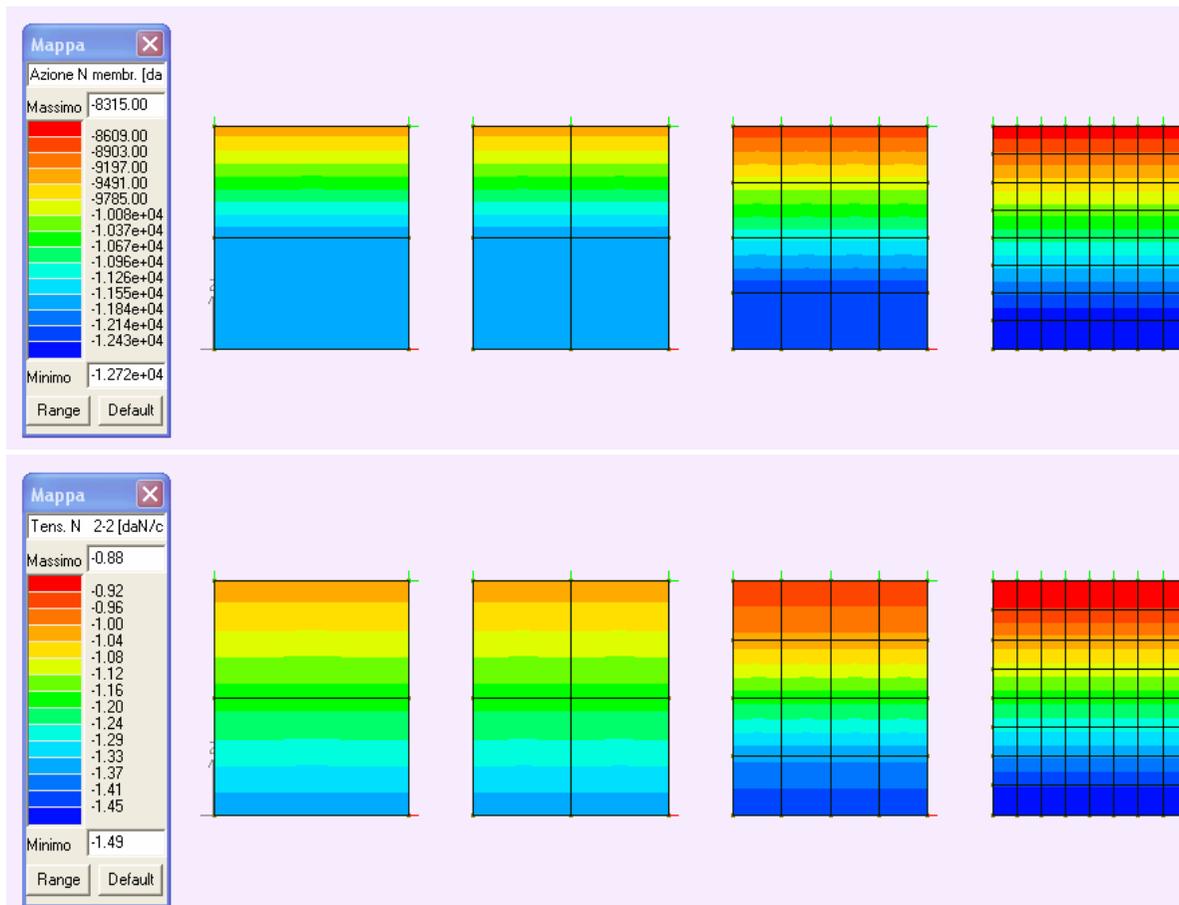
“Mesh” utilizzate

“Caratteristiche del setto: altezza 350 cm, lunghezza 300 cm, spessore 24 cm

Muratura : solido elastico omogeneo  $E=5000 \text{ N/mm}^2$ ,  $G=2000 \text{ N/mm}^2$

# Analisi statica di un maschio murario

1<sup>a</sup> condizione di carico: sforzo normale semplice  
(peso proprio + distribuito 2000 daN/m in sommità)

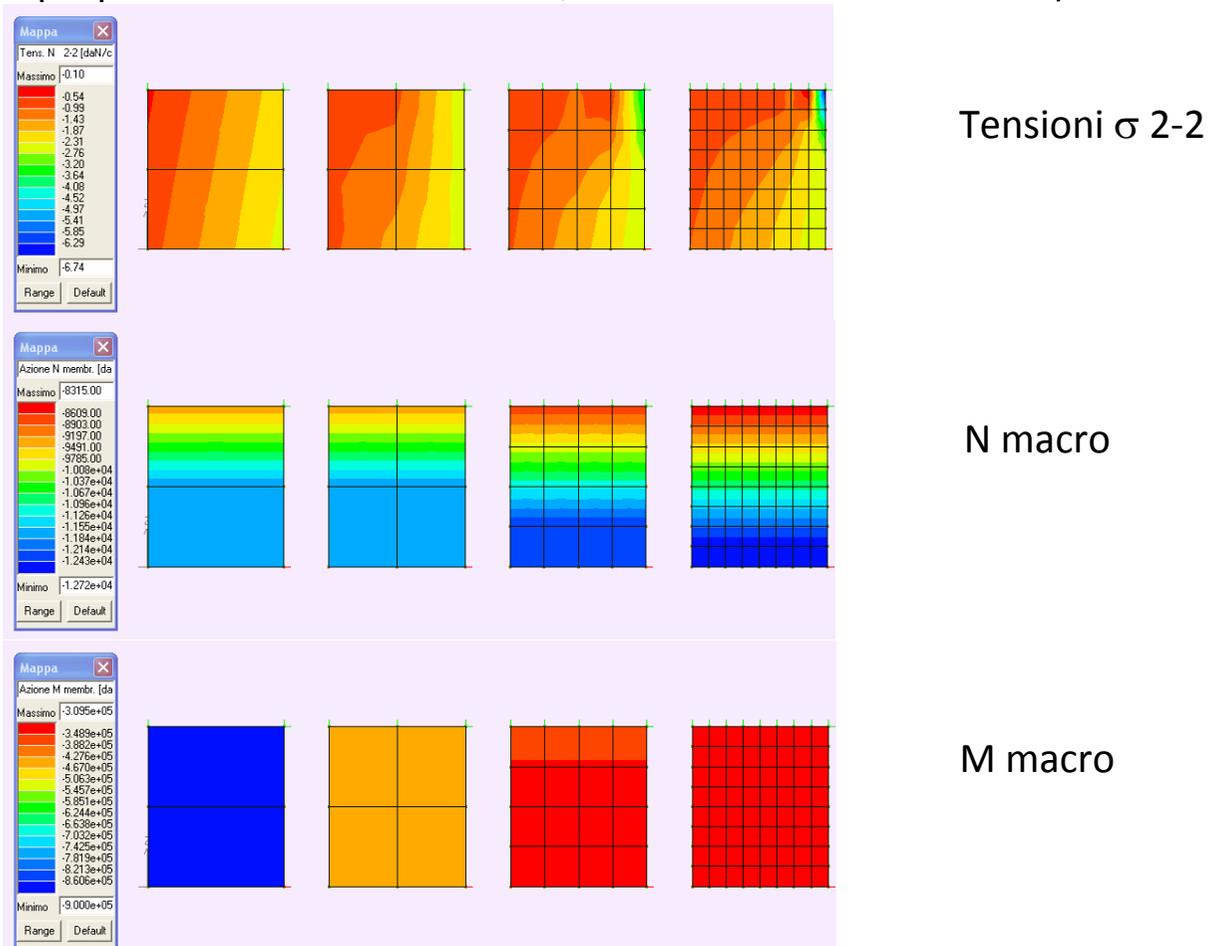


Tensioni  $\sigma$  2-2

N macro

# Analisi statica di un maschio murario

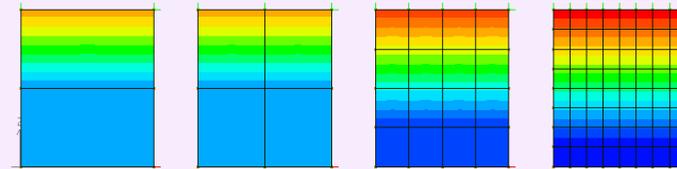
2<sup>a</sup> condizione di carico: sforzo normale eccentrico  
(peso proprio + distribuito 2000 daN/m<sup>2</sup> + concentrato 2000 daN)



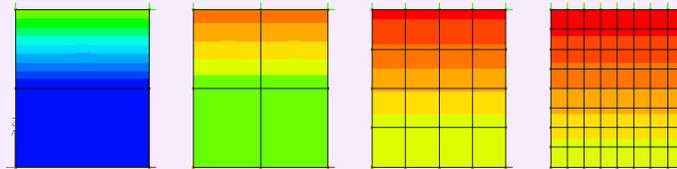
# Analisi statica di un maschio murario

3<sup>a</sup> condizione di carico

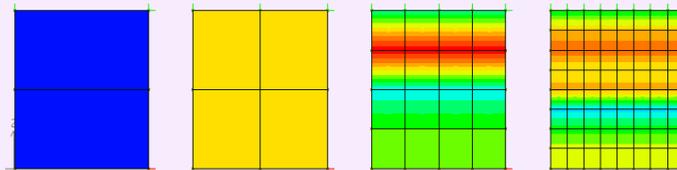
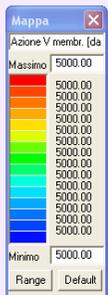
(peso proprio + distribuito 2000 daN/m<sup>2</sup> + concentrato 2000 daN + azione orizzontale 5000 daN)



N macro



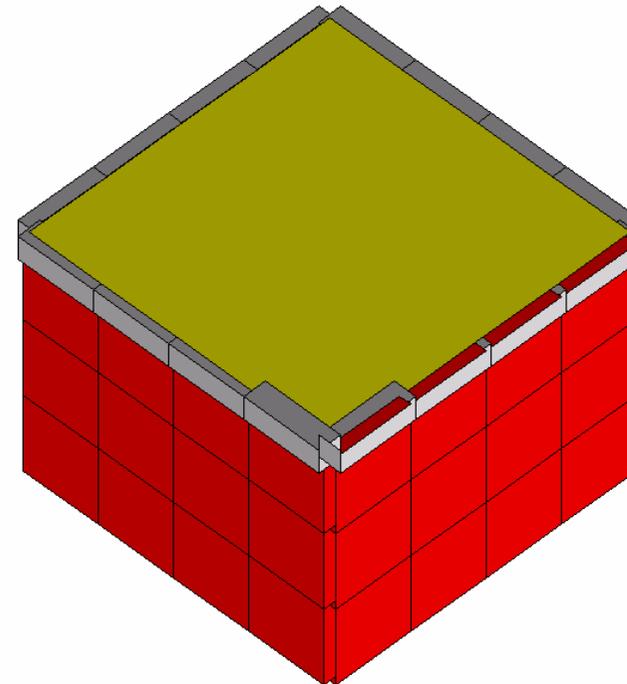
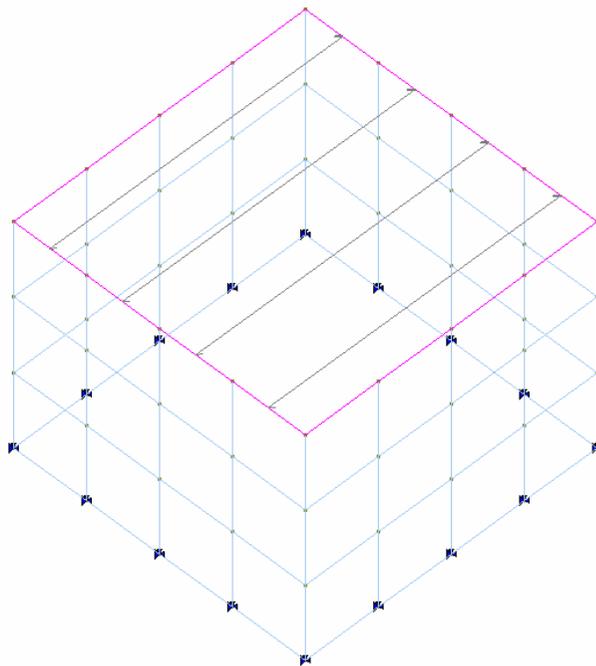
M macro



V macro

## Alcuni problemi di modellazione

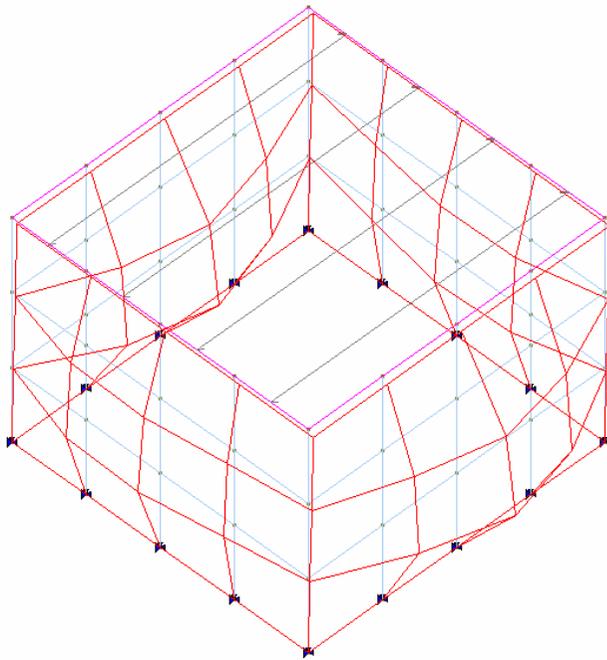
### Analisi modale di un caso semplice



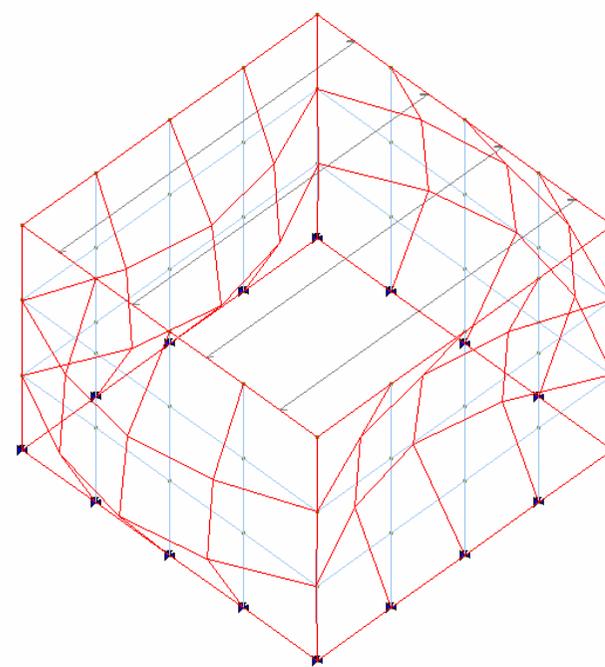
Pareti 4x3 m, spessore 15 cm,  $\gamma=2000 \text{ daN/m}^3$   
Muratura solido elastico omogeneo  $E=8000 \text{ N/mm}^2$ ,  $G=3200 \text{ N/mm}^2$

## Alcuni problemi di modellazione

**Effetto del peso proprio della muratura:  
compaiono modi locali**



Deformata ottenuta per  
combinazione dei modi

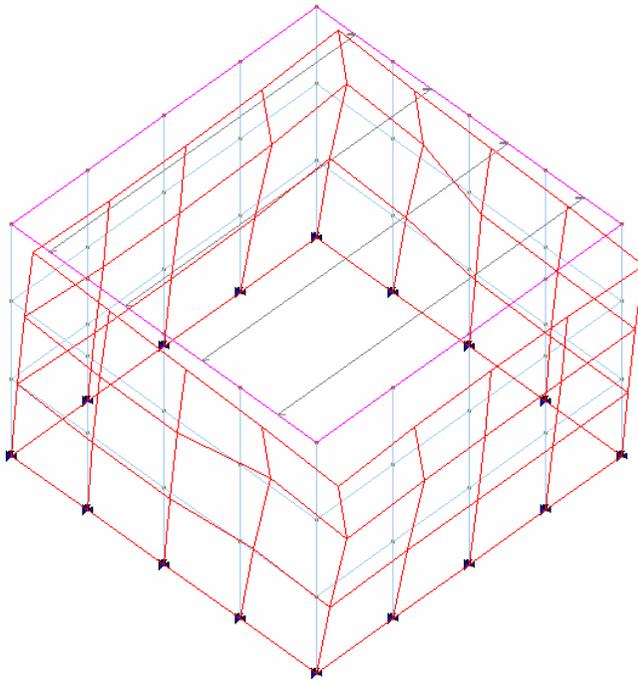


1° modo di vibrare

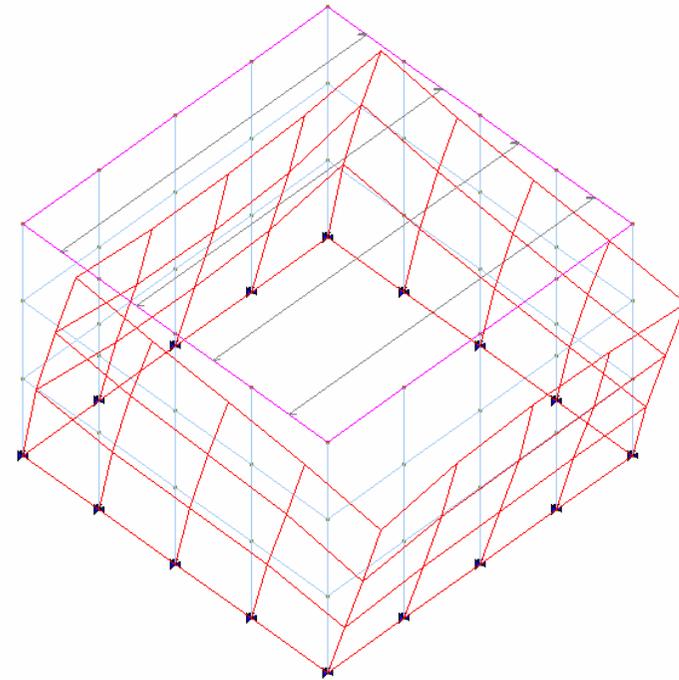
# Alcuni problemi di modellazione



**Analisi dinamica tenendo conto delle masse solo a livello dei solai**



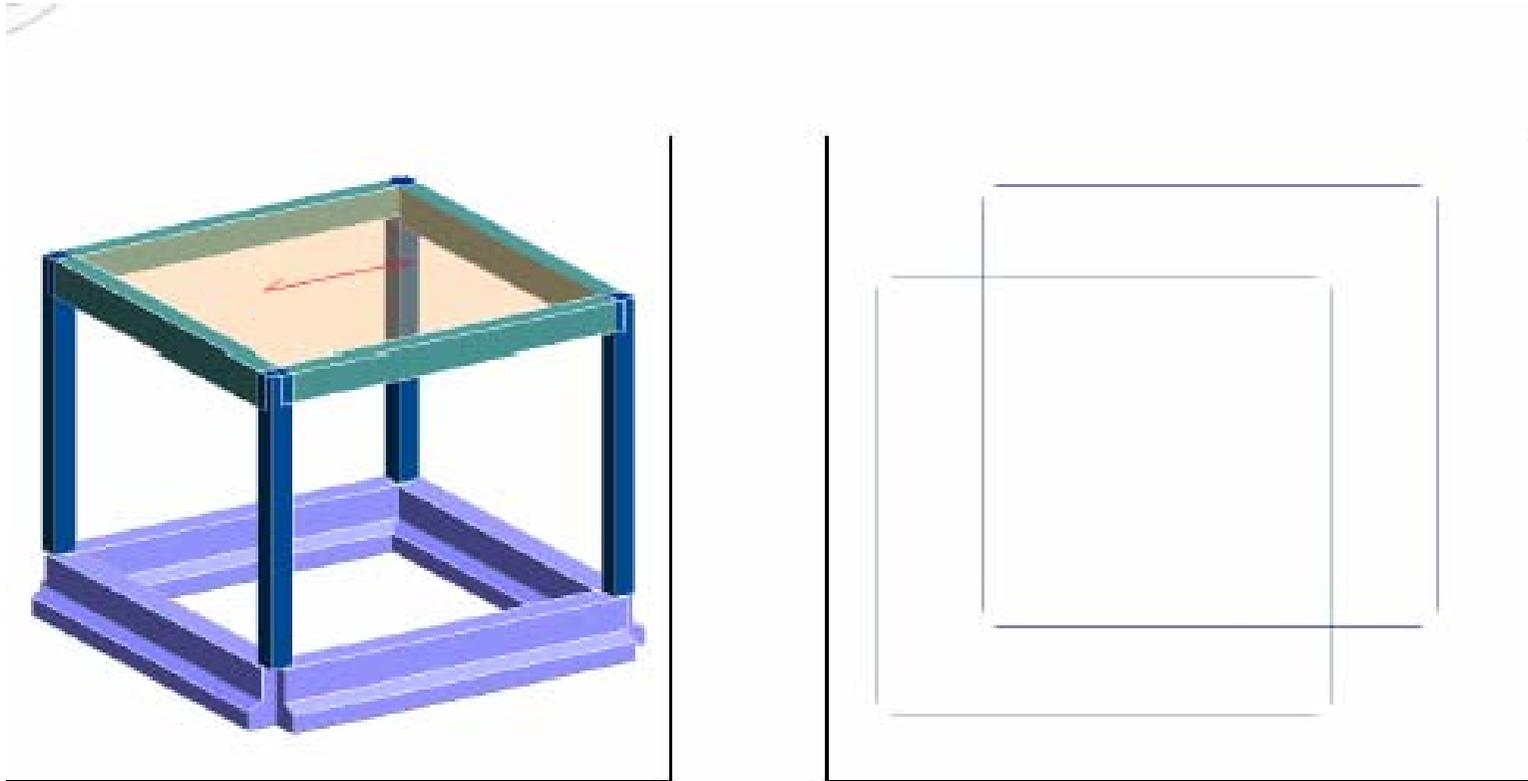
Deformata ottenuta per  
combinazione dei modi



1° modo di vibrare

## Alcuni problemi di modellazione

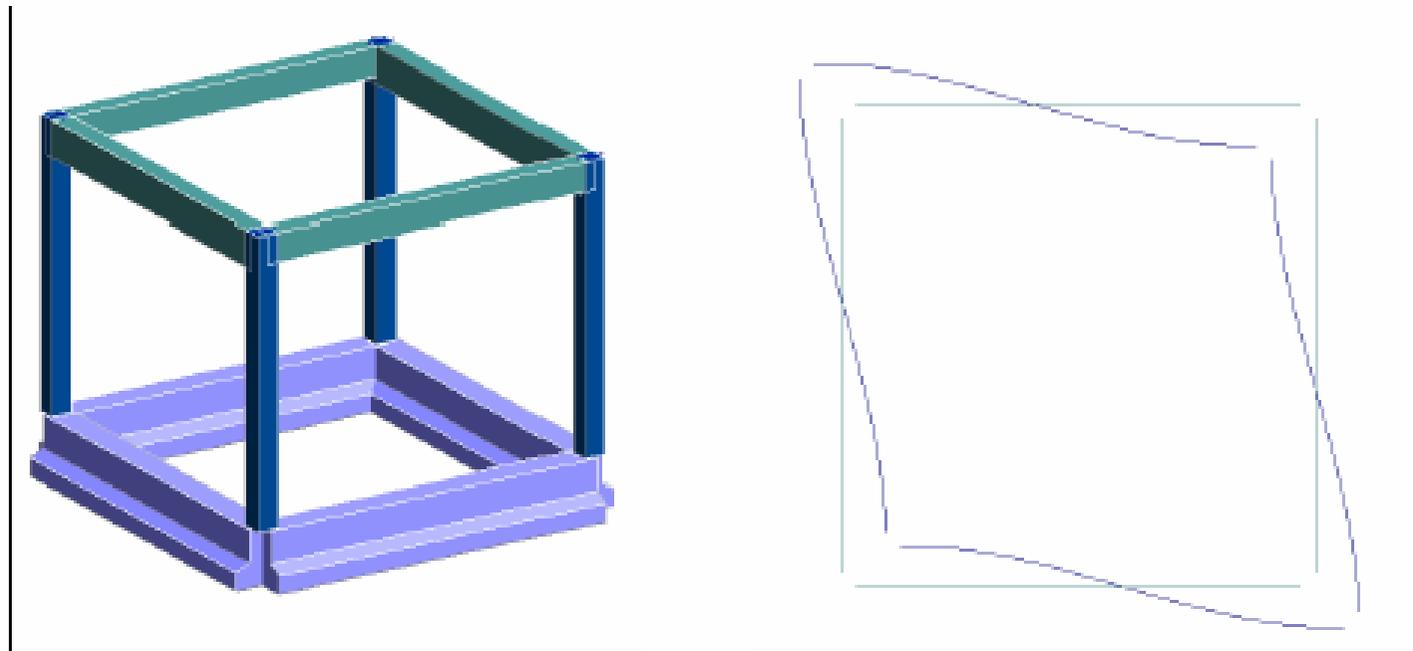
### Corretta modellazione dei solai



### *Modello strutturale ad impalcato rigido*

## Alcuni problemi di modellazione

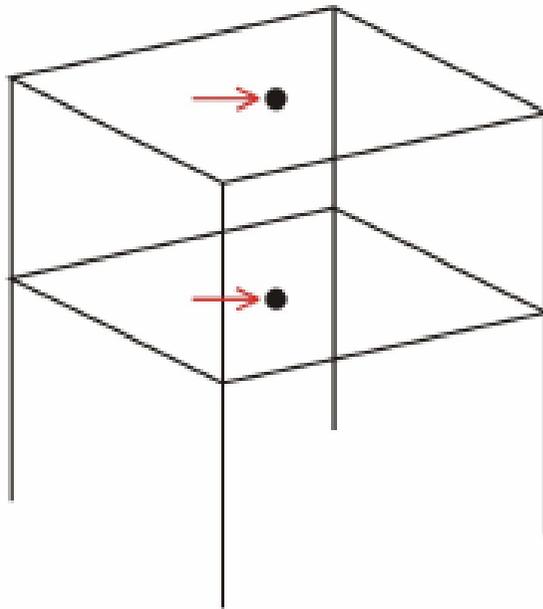
### Corretta modellazione dei solai



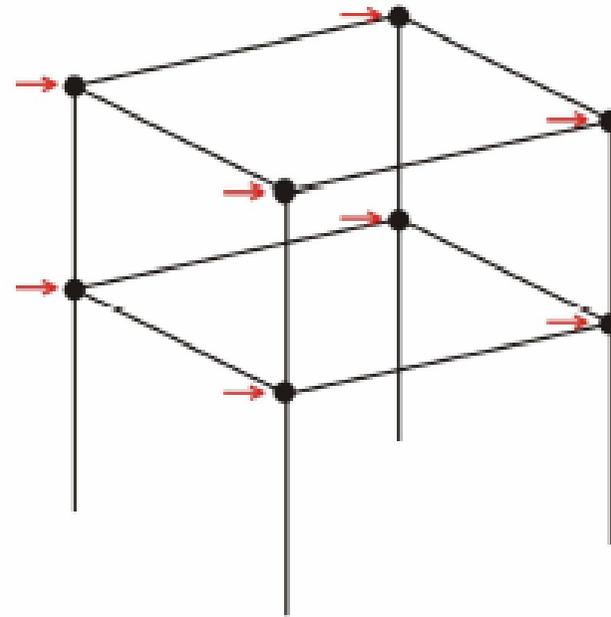
*Modello strutturale ad impalcato deformabile*

# Alcuni problemi di modellazione

## Modellazione delle masse



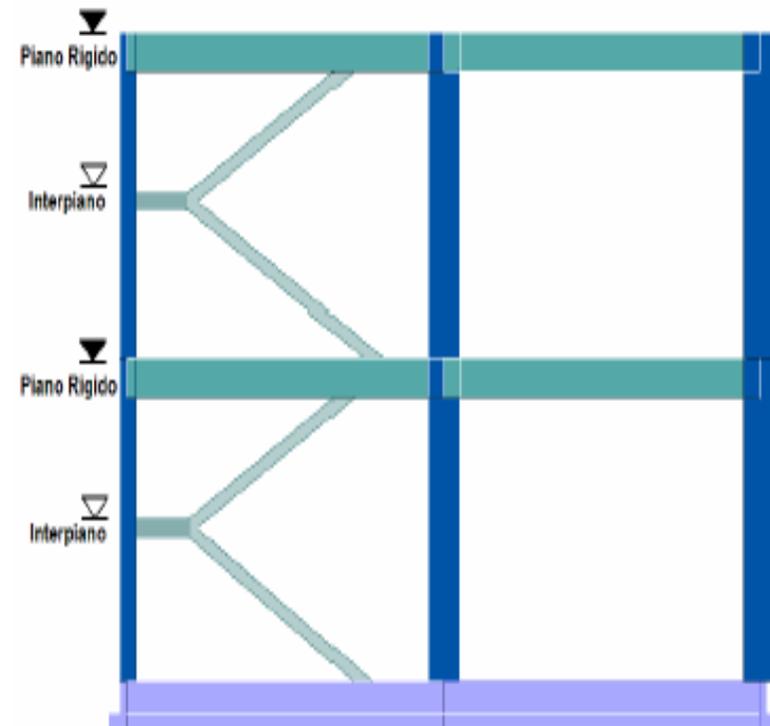
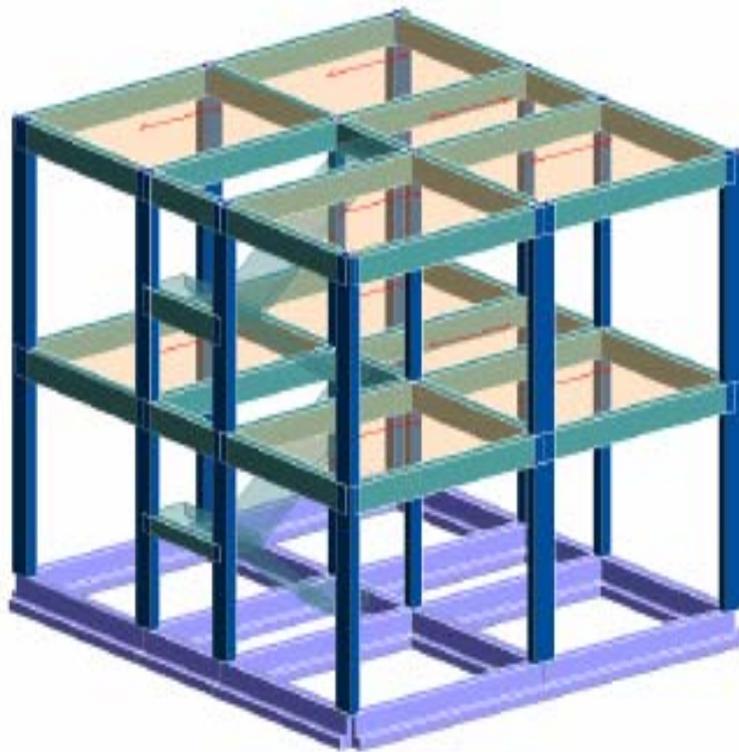
*Analisi Sismica Classica*



*Analisi Sismica Nodale*

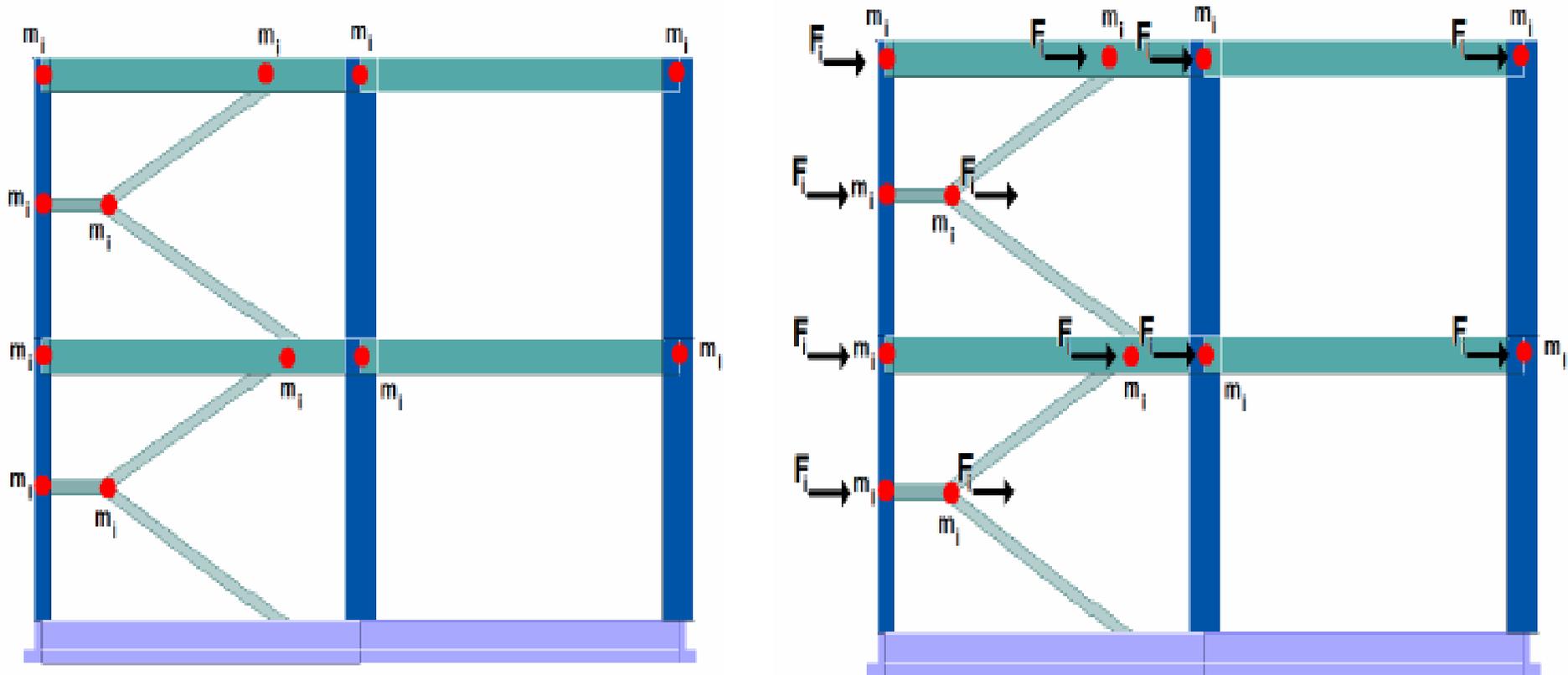
# Alcuni problemi di modellazione

## Modellazione delle masse



# Alcuni problemi di modellazione

## Modellazione delle masse





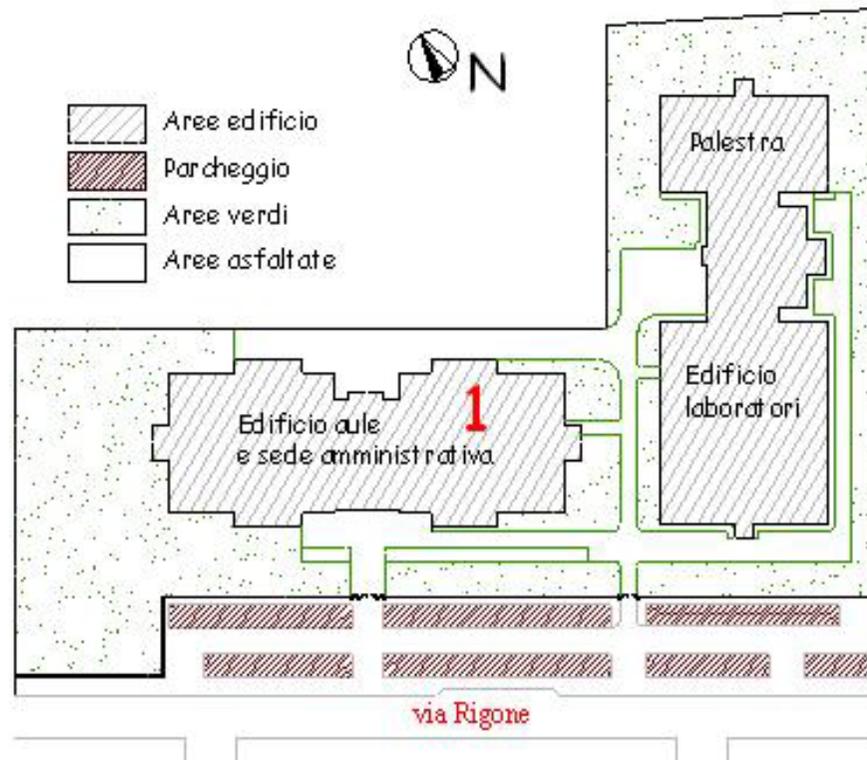
- **Edificio a struttura mista**

**Complesso scolastico di recente costruzione (anni '90) in struttura mista c.a. e muratura portante  
(2003-2004)**

## Alcuni problemi di modellazione

### Edificio a struttura mista

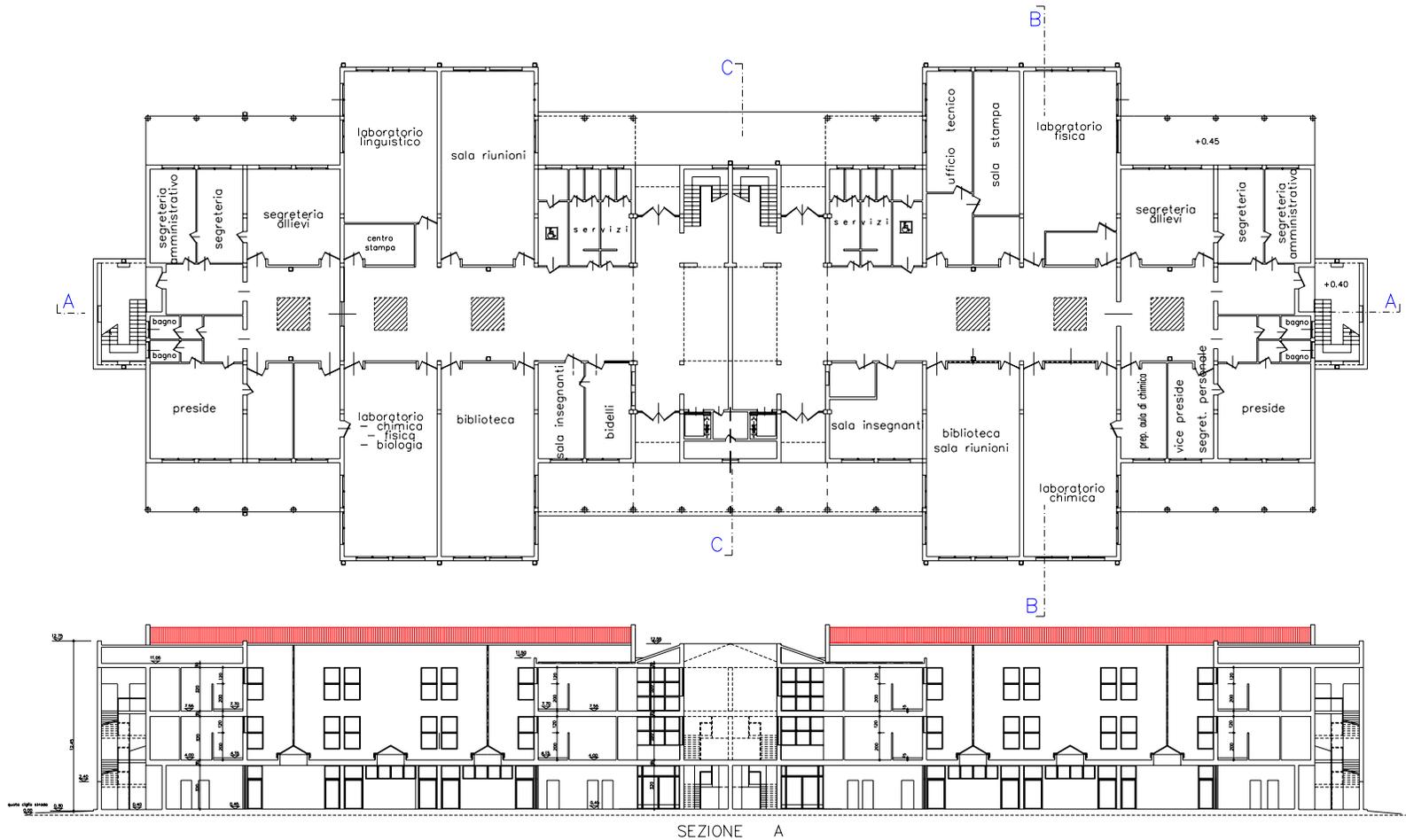
Complesso scolastico di recente costruzione (anni '90) in struttura mista c.a. e muratura portante



# Alcuni problemi di modellazione



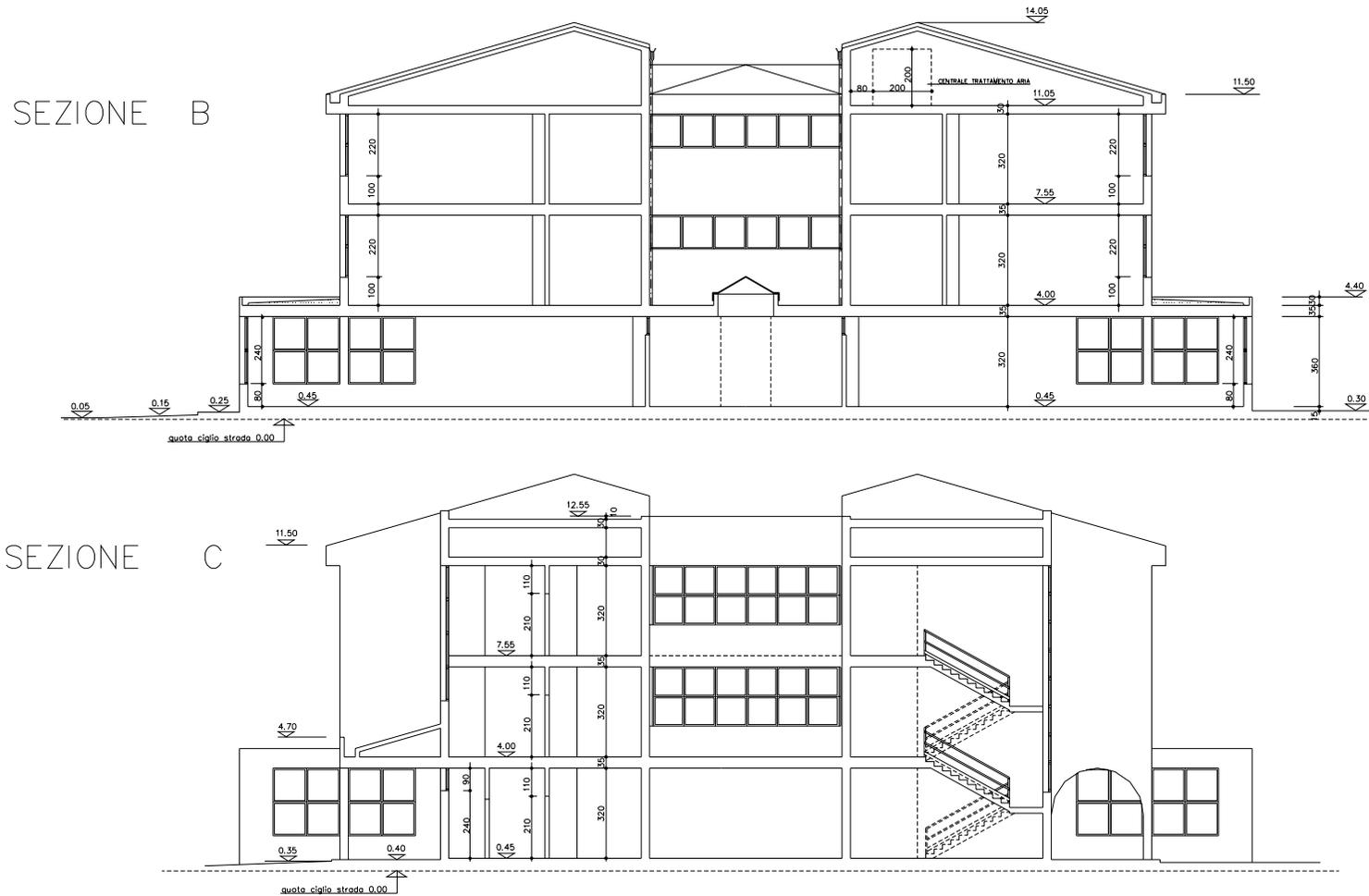
Pianta piano terra e sezione longitudinale



# Alcuni problemi di modellazione

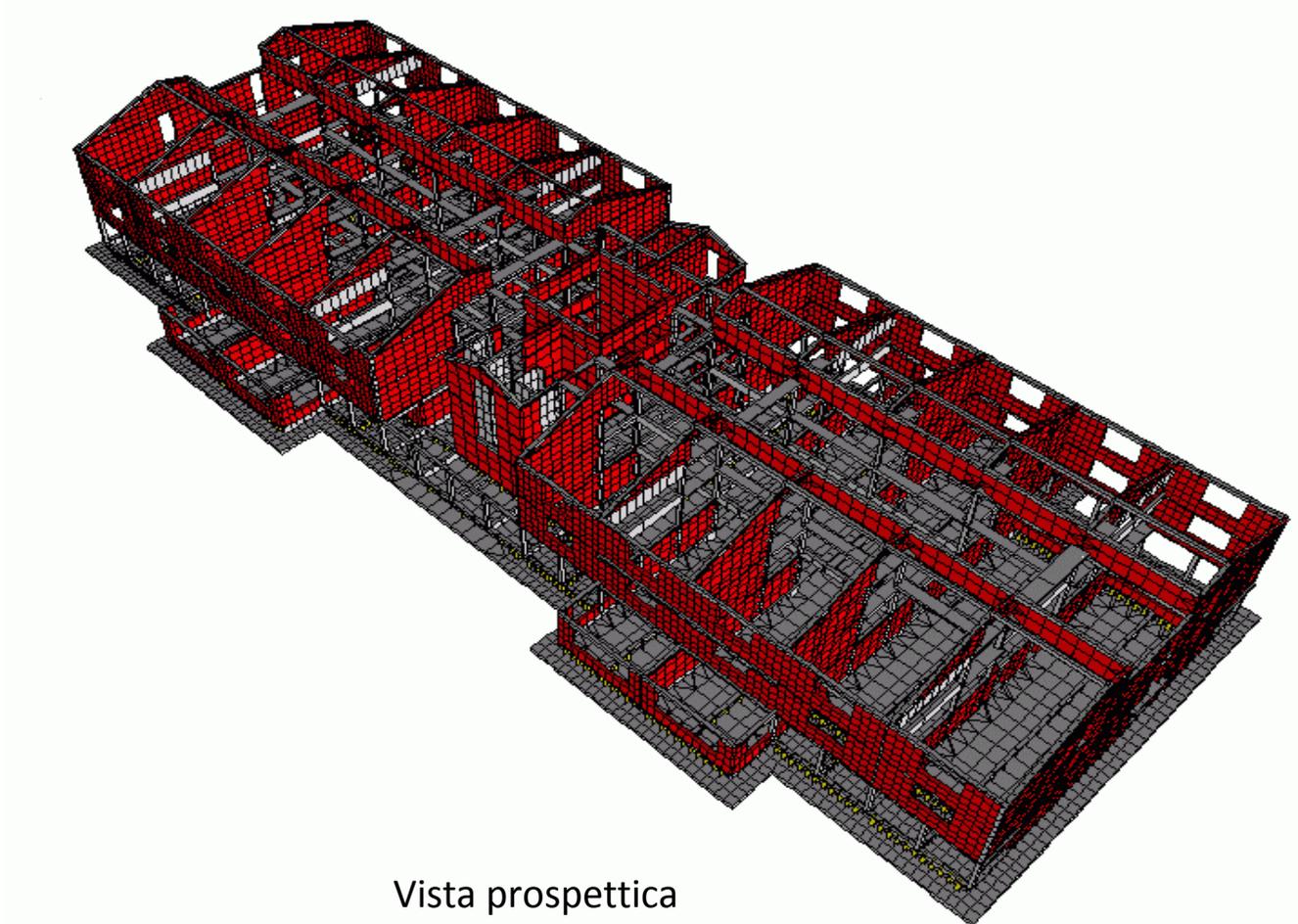


## Sezioni trasversali



# Alcuni problemi di modellazione

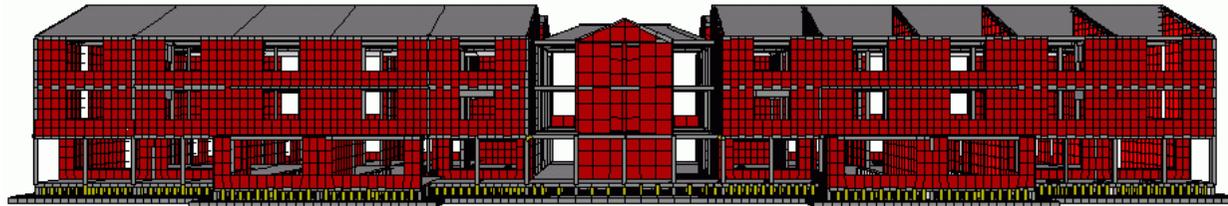
## Modello di calcolo



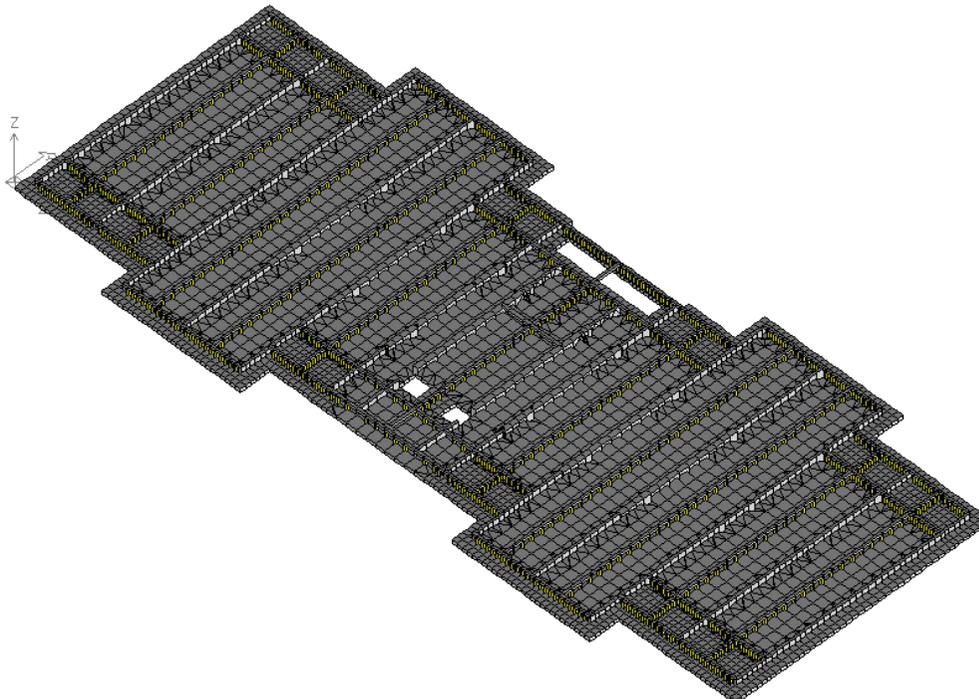
Vista prospettica

# Alcuni problemi di modellazione

## Modello di calcolo



Vista frontale

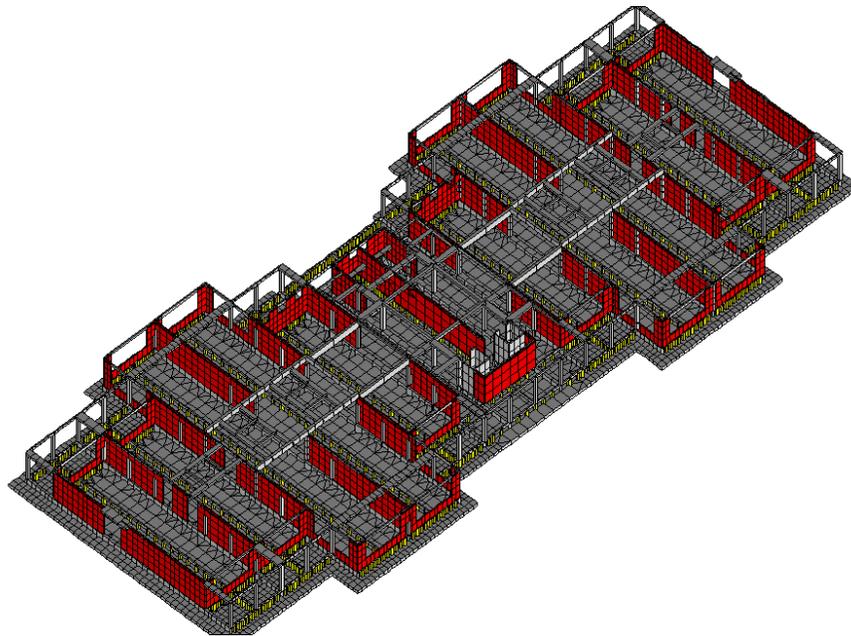


Platea nervata

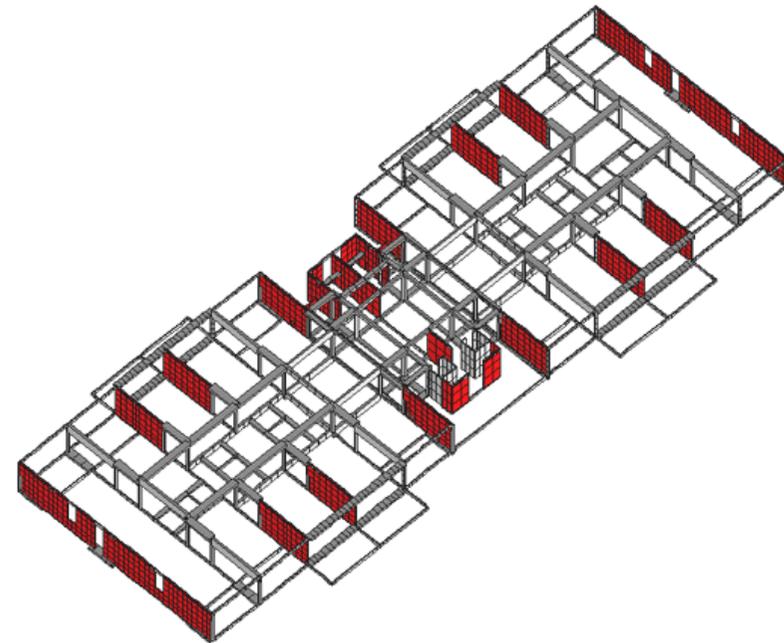
# Alcuni problemi di modellazione



## Modello di calcolo



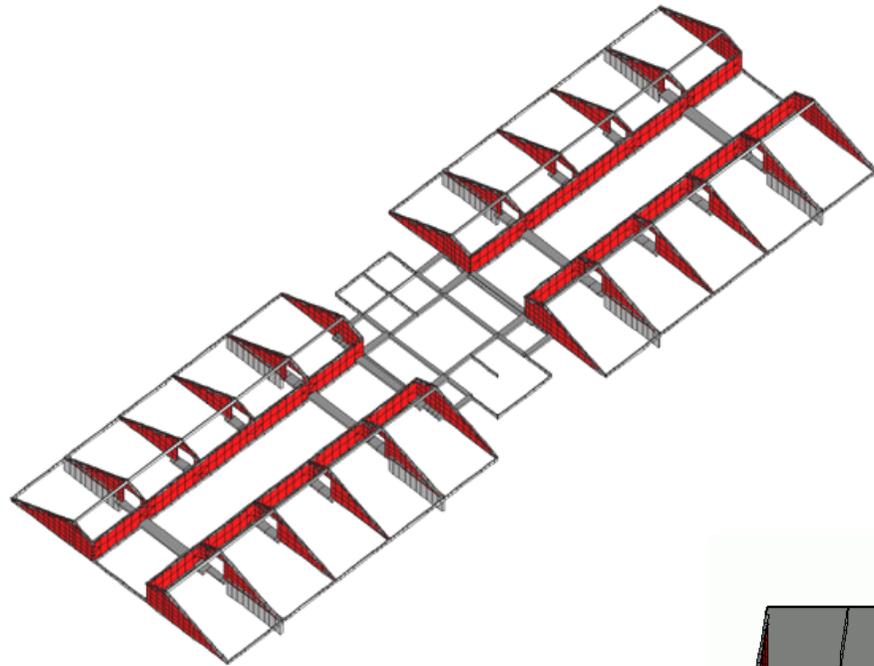
Vista impalcato quota +3,85 m



Vista impalcato quota +7,40 m

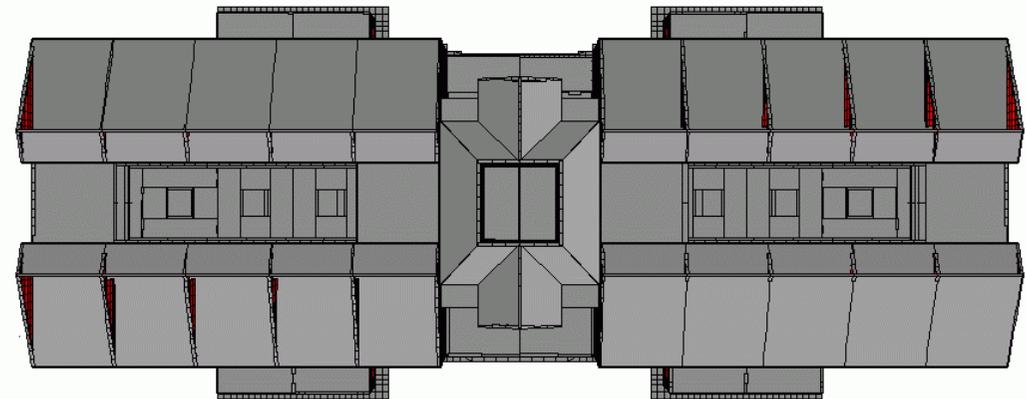
# Alcuni problemi di modellazione

## Modello di calcolo



Vista sottotetto

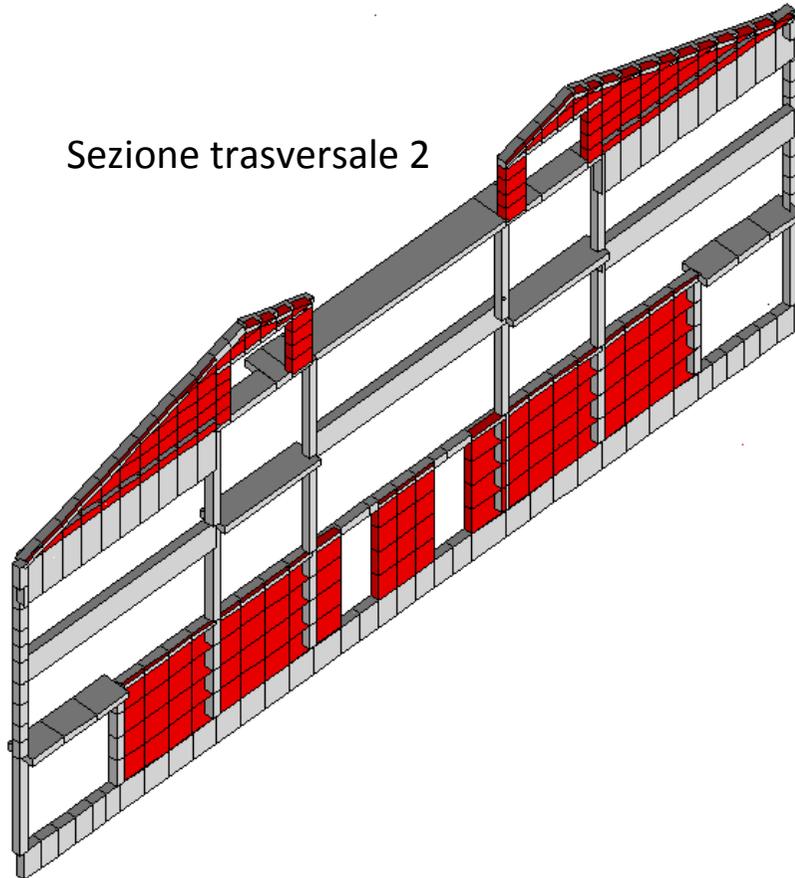
Vista falde tetto



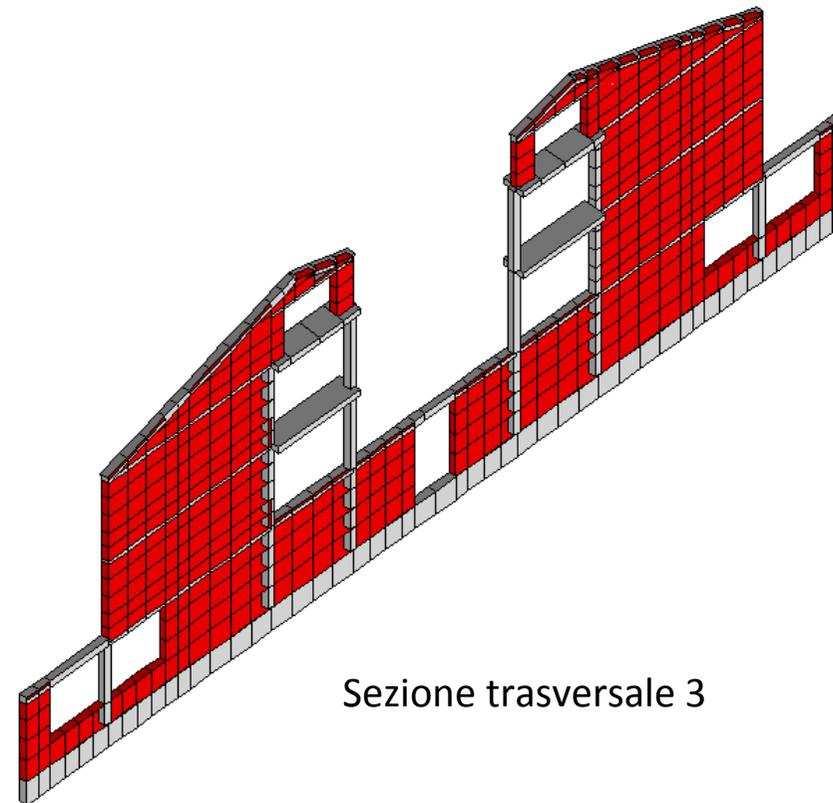
# Alcuni problemi di modellazione

## Modello di calcolo

Sezione trasversale 2



Sezione trasversale 3

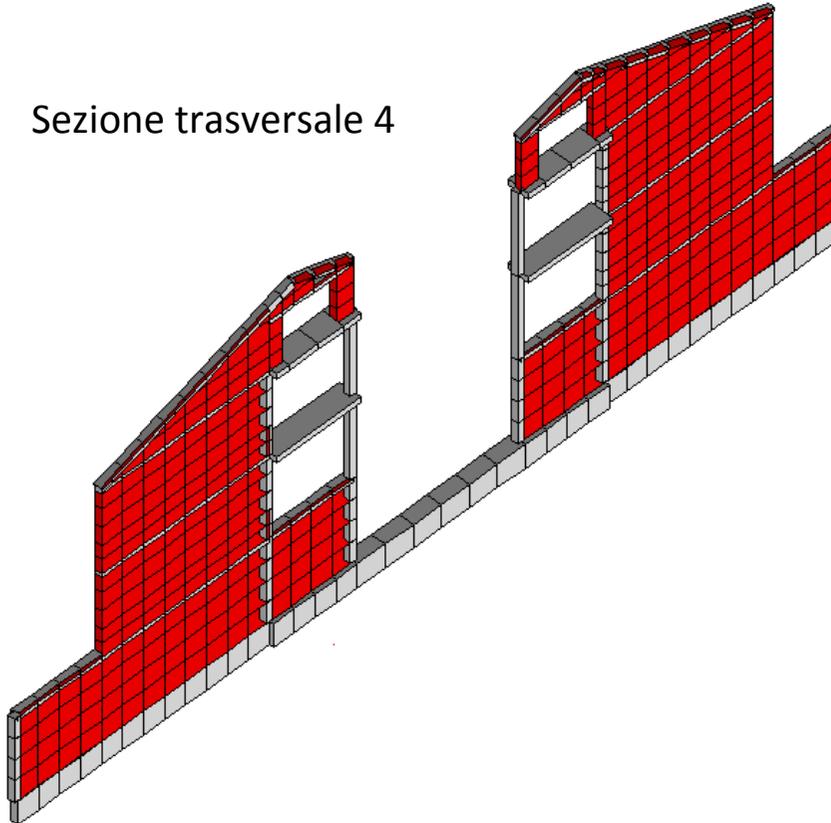


# Alcuni problemi di modellazione

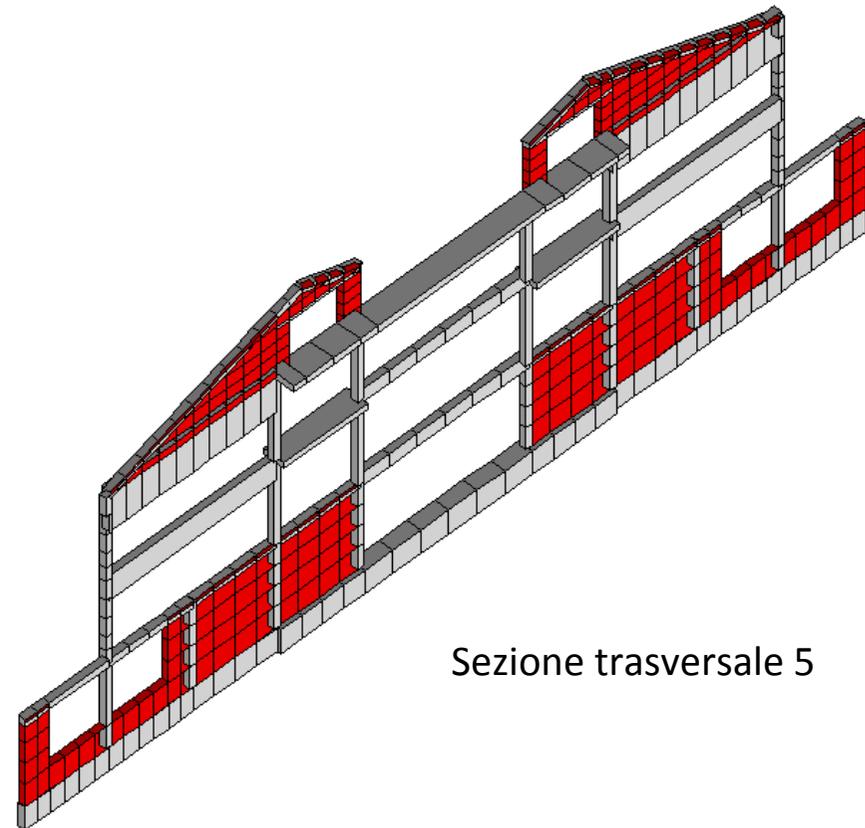


## Modello di calcolo

Sezione trasversale 4

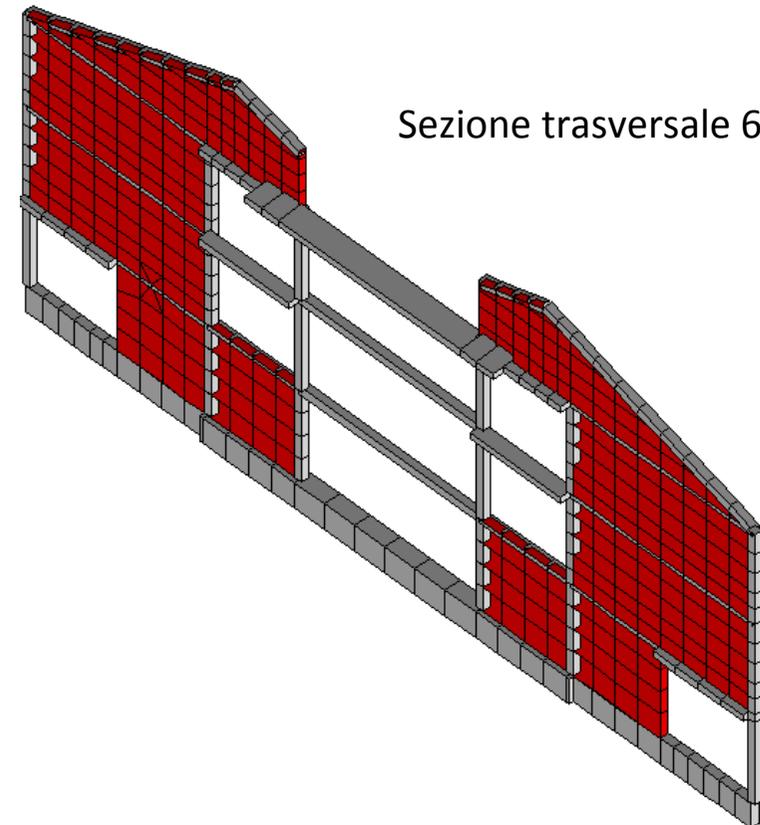
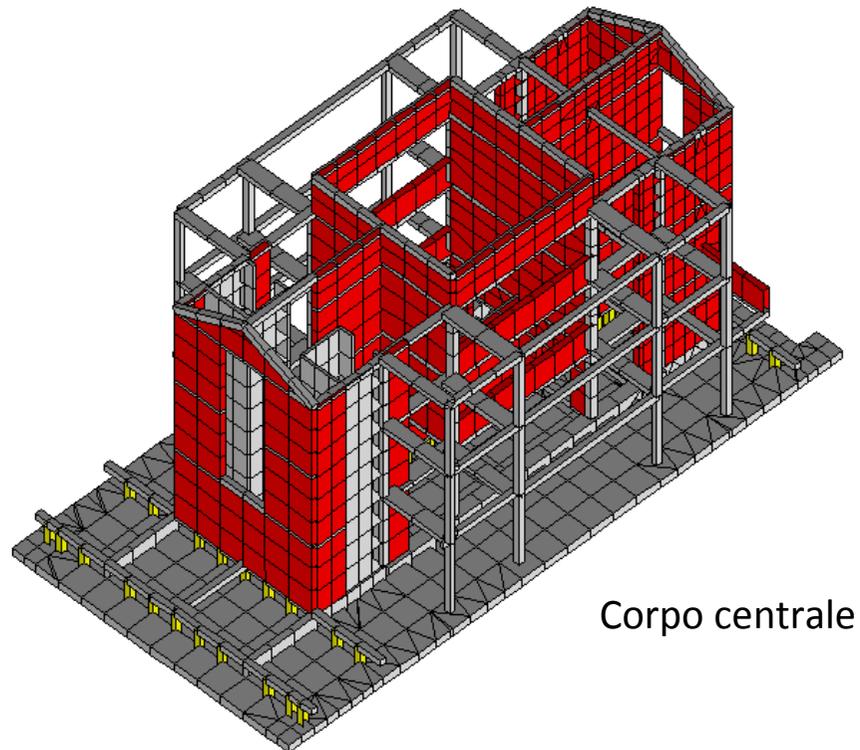


Sezione trasversale 5



# Alcuni problemi di modellazione

## Modello di calcolo



# Alcuni problemi di modellazione

## Caratteristiche della muratura



Mattoni per elementi portanti 28x21x18 cm  
 $E=6700 \text{ N/mm}^2$ ,  $G=0,4E$

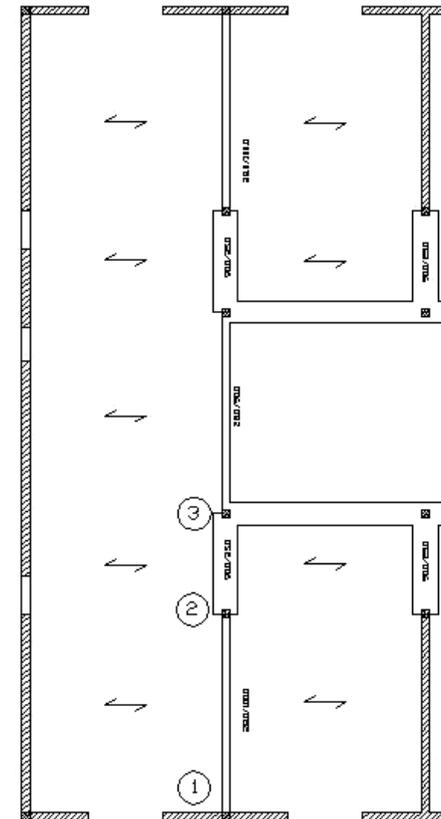
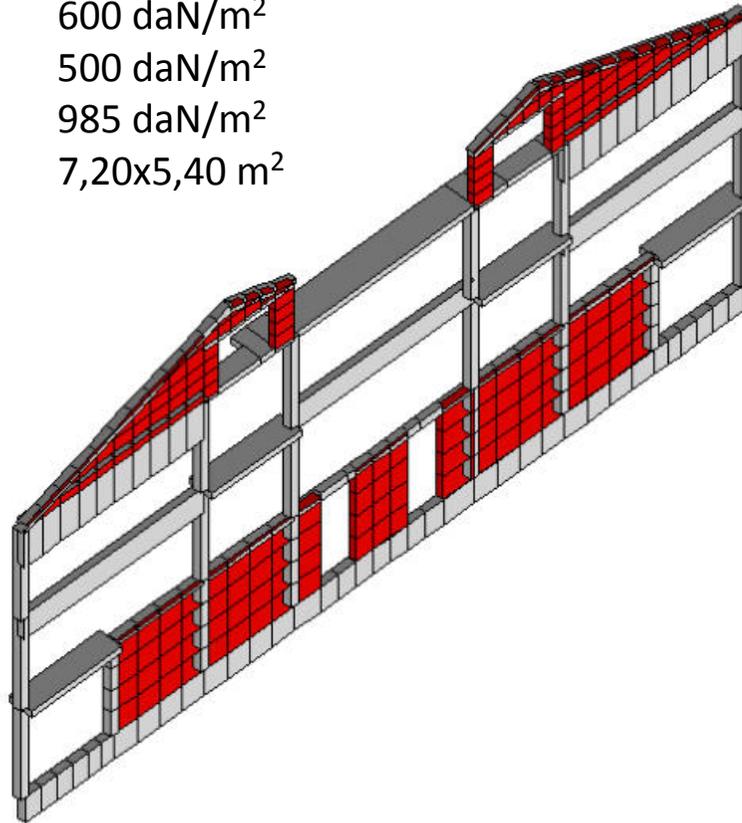


Mattoni per tramezzi 25x21x12 cm

# Alcuni problemi di modellazione

## Confronto fra modello completo e analisi a telai piani disaccoppiati

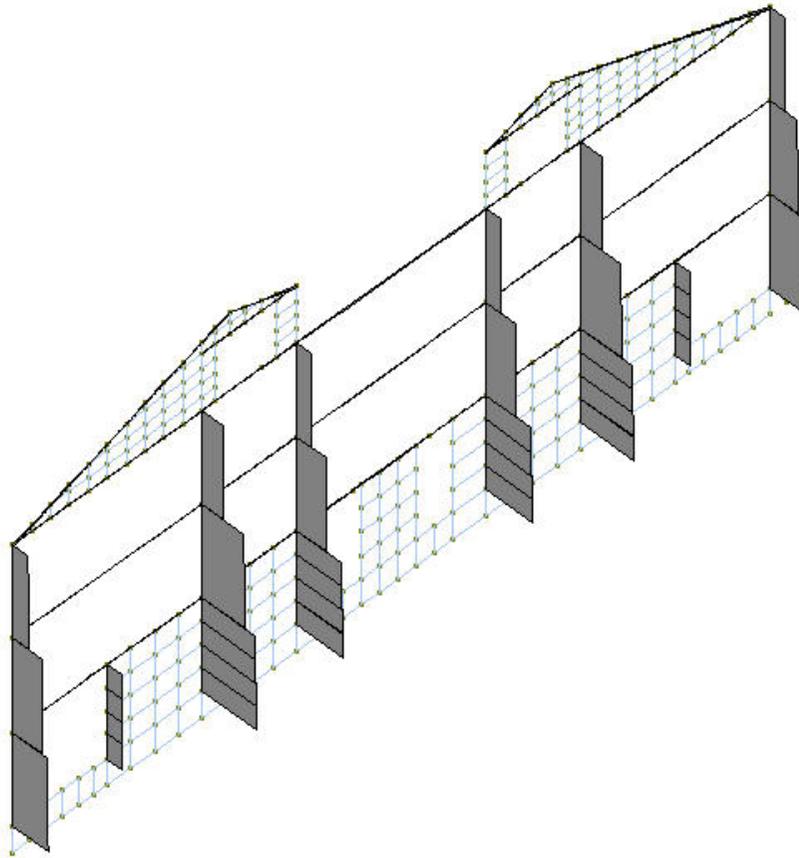
- solaio copertura 600 daN/m<sup>2</sup>
- solaio sottotetto 500 daN/m<sup>2</sup>
- solaio tipo 985 daN/m<sup>2</sup>
- area influenza 7,20x5,40 m<sup>2</sup>



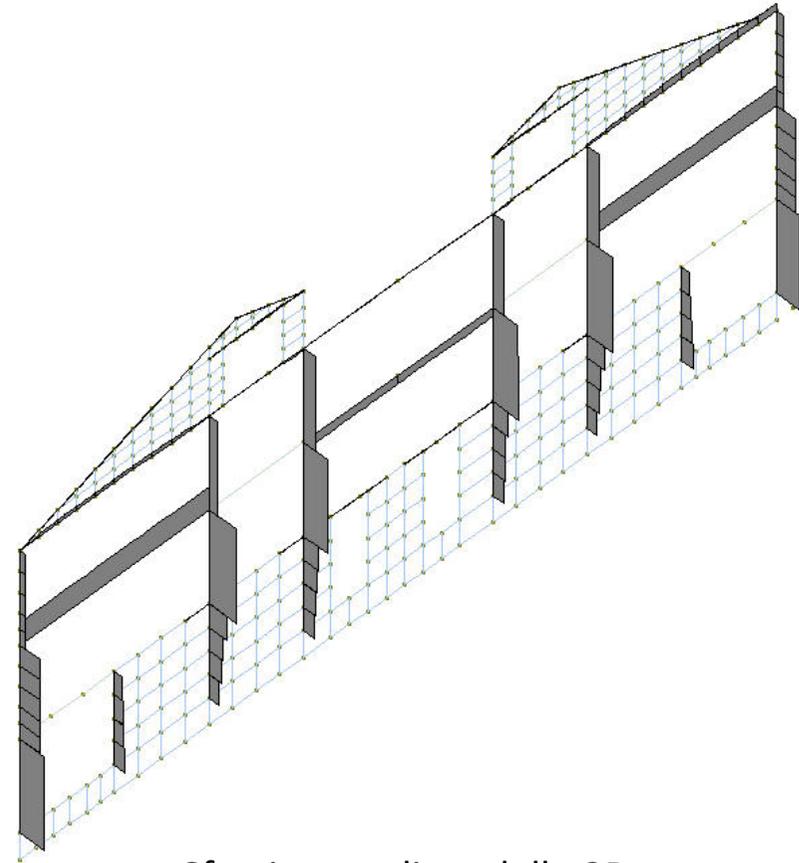
# Alcuni problemi di modellazione



## Confronto fra modello completo e analisi a telai piani disaccoppiati



Sforzi normali telaio piano



Sforzi normali modello 3D

## Alcuni problemi di modellazione

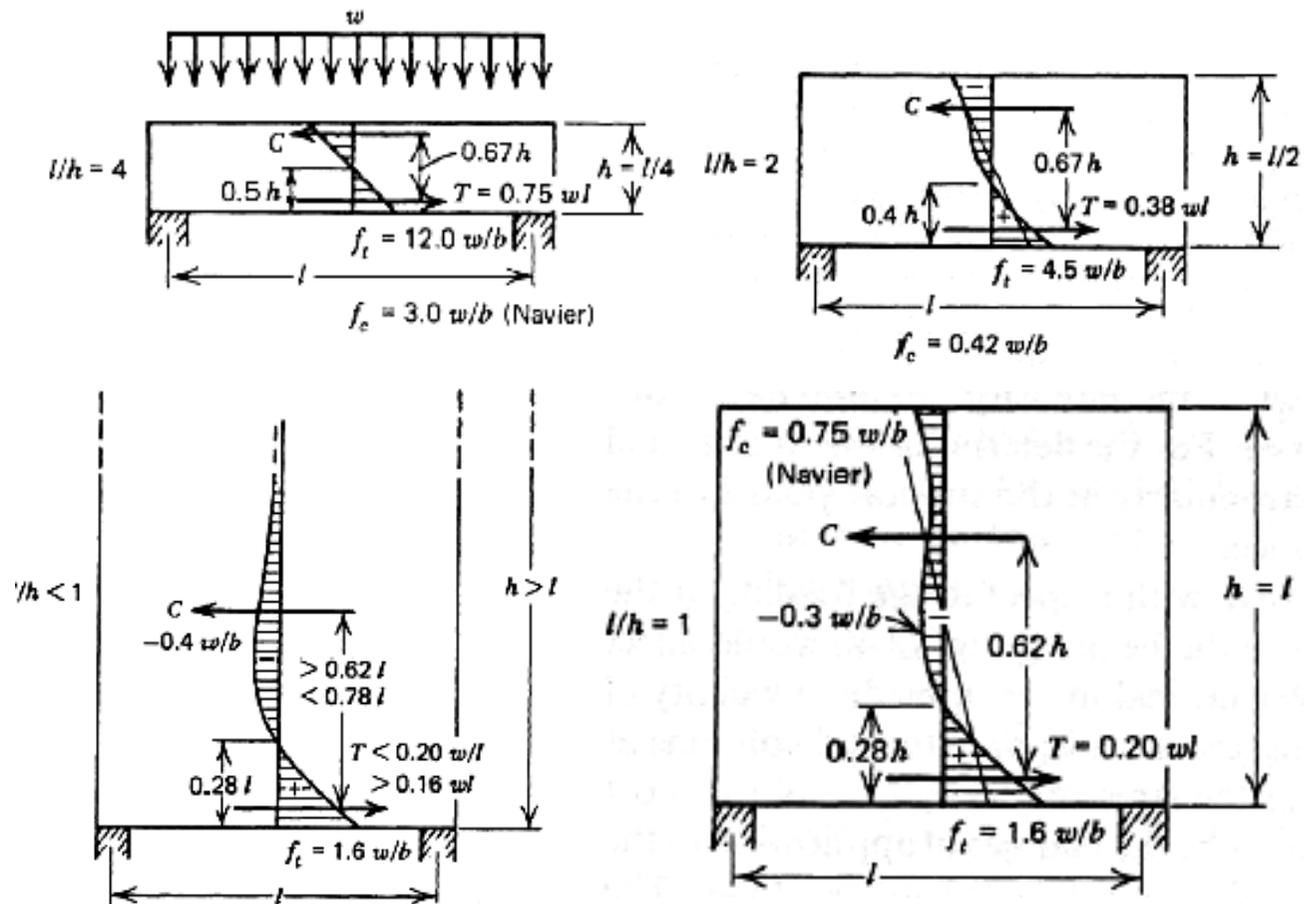
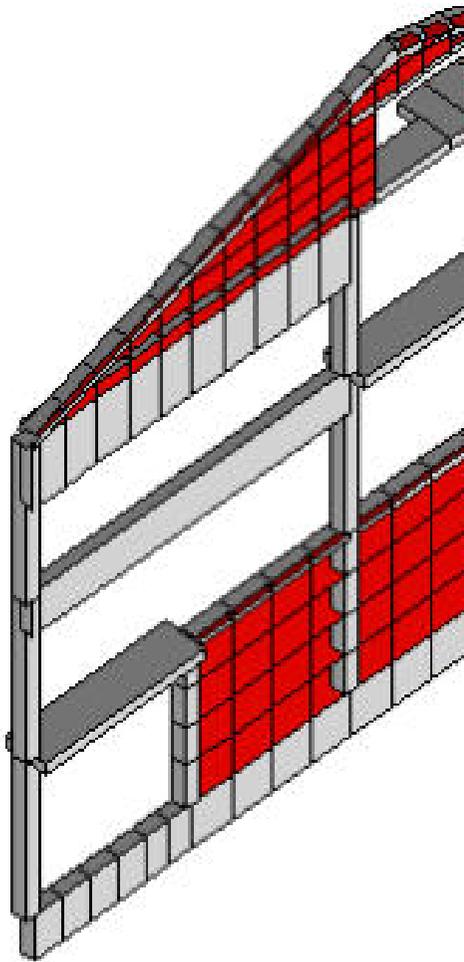
### Confronto fra modello completo e analisi a telai piani disaccoppiati

	Sforzo normale telaio piano [daN]	Sforzo normale modello 3D [daN]	Sforzo normale modello 3D con rigidezza flessionale modificata [daN]
<i>Pilastro 1</i>	57960	31900	41580
<i>Pilastro 2</i>	83000	50000	59600
<i>Pilastro 3</i>	58140	41800	52600

N.B.: il valore “**errato**” dello scarico sui pilastri dipende sia dall’aver collegato i muri ai pilastri in c.a. che dall’aver usato elementi “plate&shell” e dunque una rigidezza flessionale per le pareti in muratura. Se tale rigidezza viene trascurata si riottengono risultati dei modelli a telaio piano.

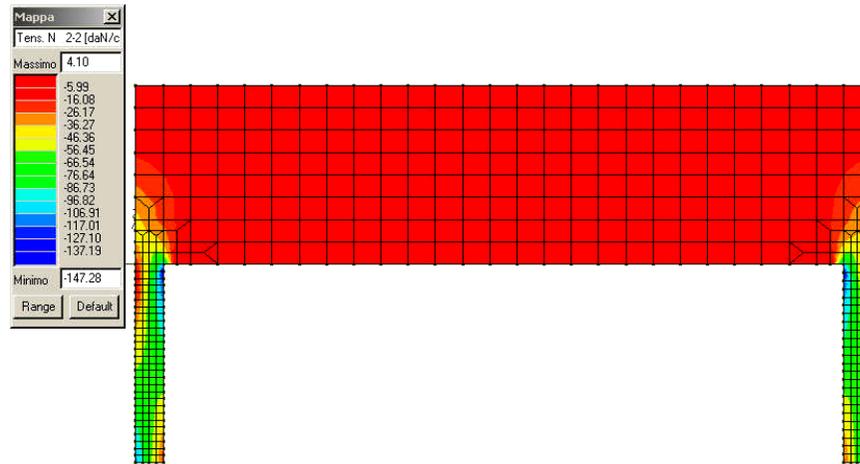
# Alcuni problemi di modellazione

## L'analisi della "trave-parete"

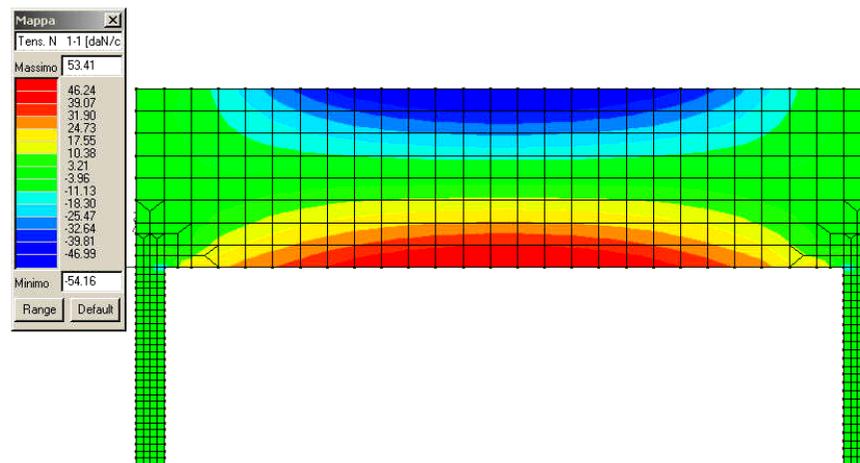


# Alcuni problemi di modellazione

## Risultati analisi FEM *plane-stress*



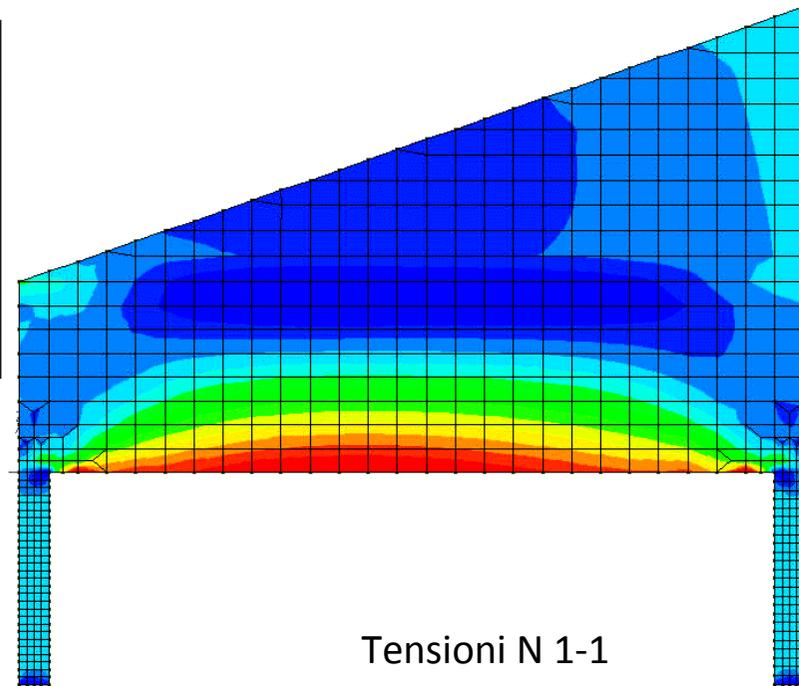
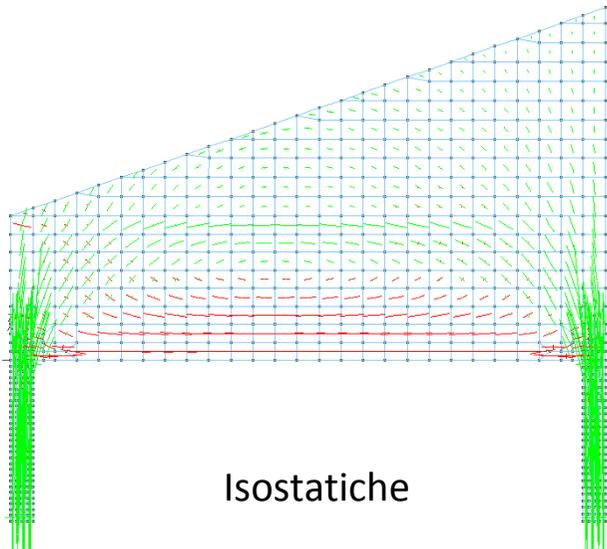
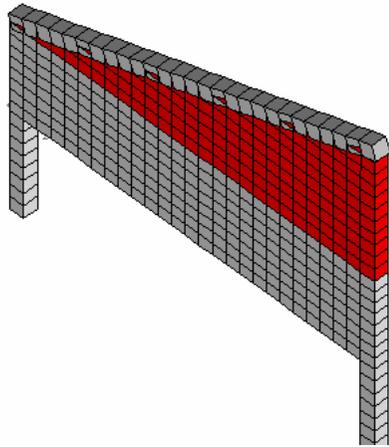
Tensioni N 2-2



Tensioni N 1-1

# Alcuni problemi di modellazione

## Effetto del tamponamento in muratura se considerato portante





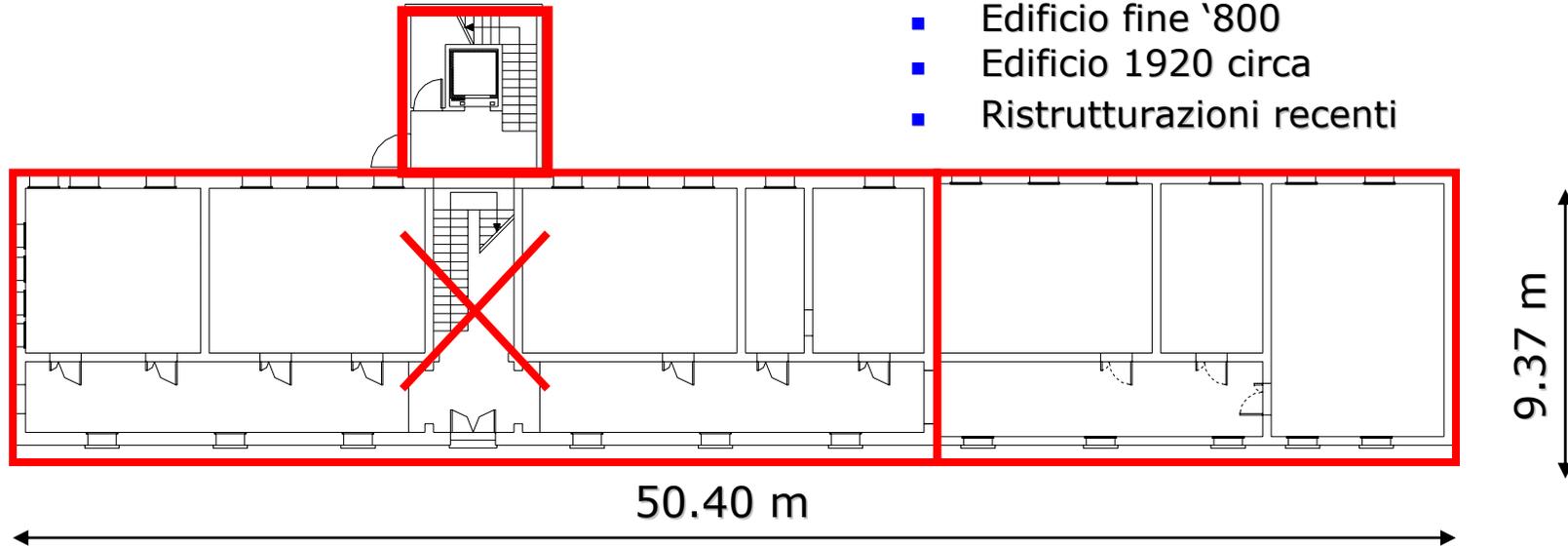
## Edificio scolastico in muratura

Una parte dell'edificio è stata costruita alla fine del 1800. L'edificio è stato ampliato fra il 1920 e il 1930, infine verso il 1970 sono stati inseriti alcuni vani tecnici

**(2005)**

## Edificio esistente

- Edificio fine '800
- Edificio 1920 circa
- Ristrutturazioni recenti



Prospetto



Vano scala



Retro

## Edificio esistente

### Pareti

	spessore	Snellezza
Piano terra 1	45cm	10.6
Piano terra 2	30cm	15.9
Piano primo 1,2	30cm	14.0
Sottotetto 1,2	30cm	4.5

### D.M. 20/11/87

Spessore minimo delle pareti	cm 12	si
Snellezza massima delle pareti	20	si

### NTC08

Spessore minimo delle pareti	cm 24	si
Snellezza massima delle pareti	12	no

Muratura in elementi  
resistenti pieni artificiali



Nessuna prova sui  
materiali



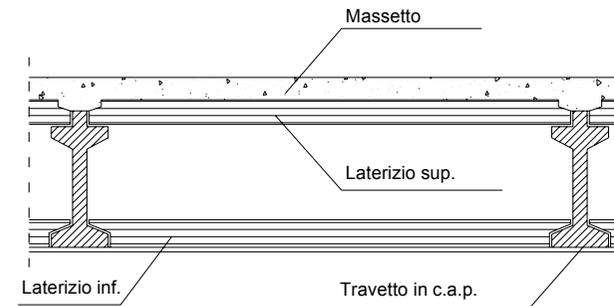
Proprietà materiale  
definite in base  
normativa (LC1)

# Edificio esistente

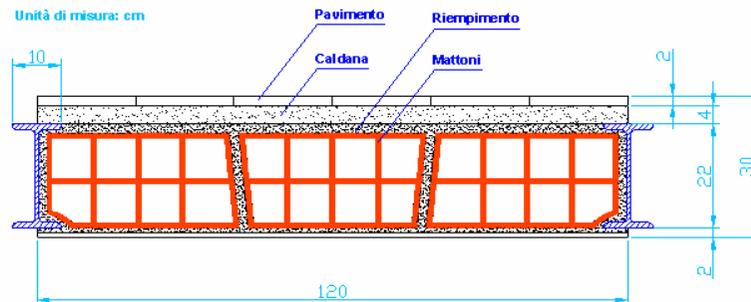
## Solai



“PANNELLI PREFABBRICATI INT. 120cm”



SOLAIO TIPO “VARESE”



“SOLAIO A VOLTERRANE”



“SOLAIO A PUTRELLE E VOLTINE”

- Non è assicurata la rigidezza nel piano

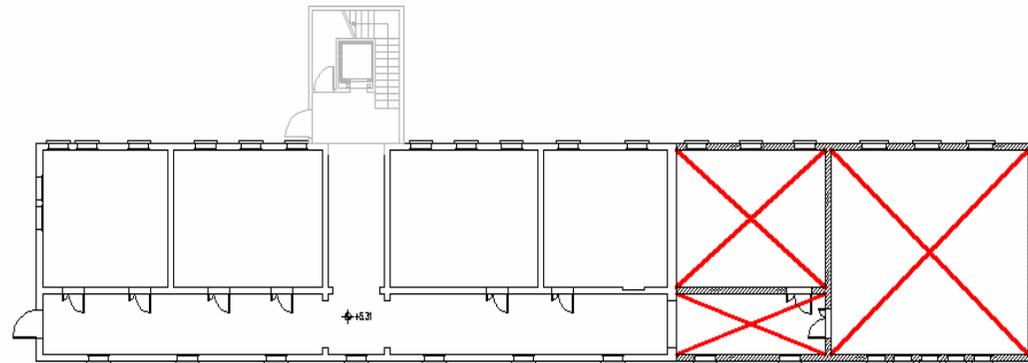
# Edificio esistente

## Solai (osservazioni)

1. Copertura spingente
2. Mancanza di collegamenti pareti - solaio
3. Rimozione di due solai



Solaio sostituito con controsoffitto

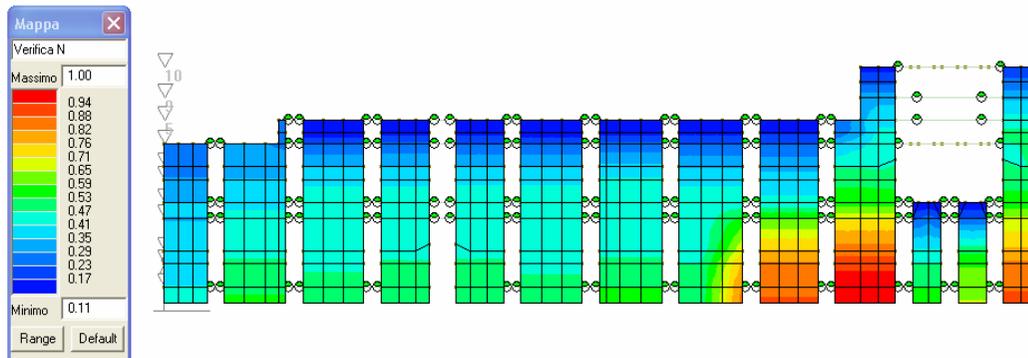
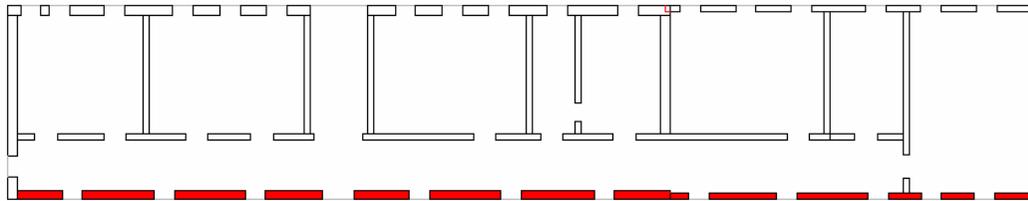


- Condizioni che favoriscono ribaltamenti delle pareti

# Edificio esistente

## Analisi statica per soli carichi verticali

- Calcolo con programma agli elementi finiti



*Esempio: Allineamento nord*

- Tutti i setti risultano verificati → Analisi sismica

- Normativa: NTC08 cap.8 "Costruzioni esistenti"

## Analisi locale (azioni fuori dal piano)

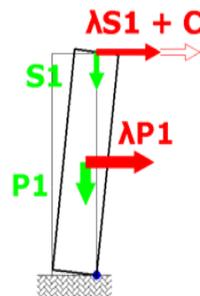
- Tipi di verifiche:

1. Ribaltamento generale
2. Pressoflessione fuori dal piano

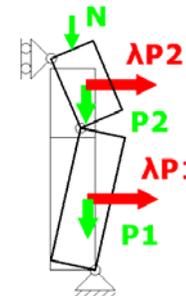
- Creazione di un programma (RiPar):



A.  
Verifica ai soli carichi  
verticali



B.  
Ribaltamento  
generale



C.  
Pressoflessione  
fuori dal piano (3  
cerniere)

-	0.02g	Tiranti	0.05g	Fasce	0.10g	Giunto	0.12g
---	-------	---------	-------	-------	-------	--------	-------

# Edificio esistente

## Analisi locale (azioni fuori dal piano)

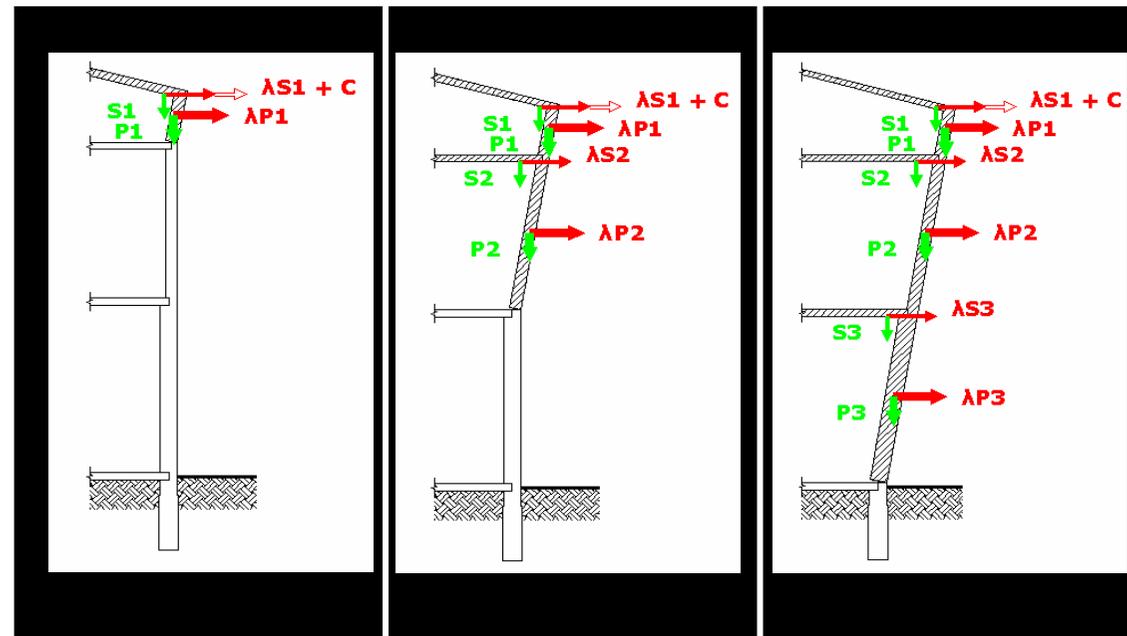
### -RIBALTAMENTO

- Problema: Mancanza di collegamenti parete - solaio
- Analisi Cinematica: Calcolo di  $\lambda$  per equilibrio alla rotazione
- Verifica:  $\lambda > a_0$

$$a_0 = \frac{a_g S}{q} \frac{\alpha}{\beta} + 1.5 \frac{z}{H} \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\phi}}$$

Allegato 11.c dell'ord. 3274

bozza 09/11/2004 ora sostituita NTC2008 §  
7.8.1.5.2



Valore PGA di collasso

Possibili meccanismi di ribaltamento

# Edificio esistente

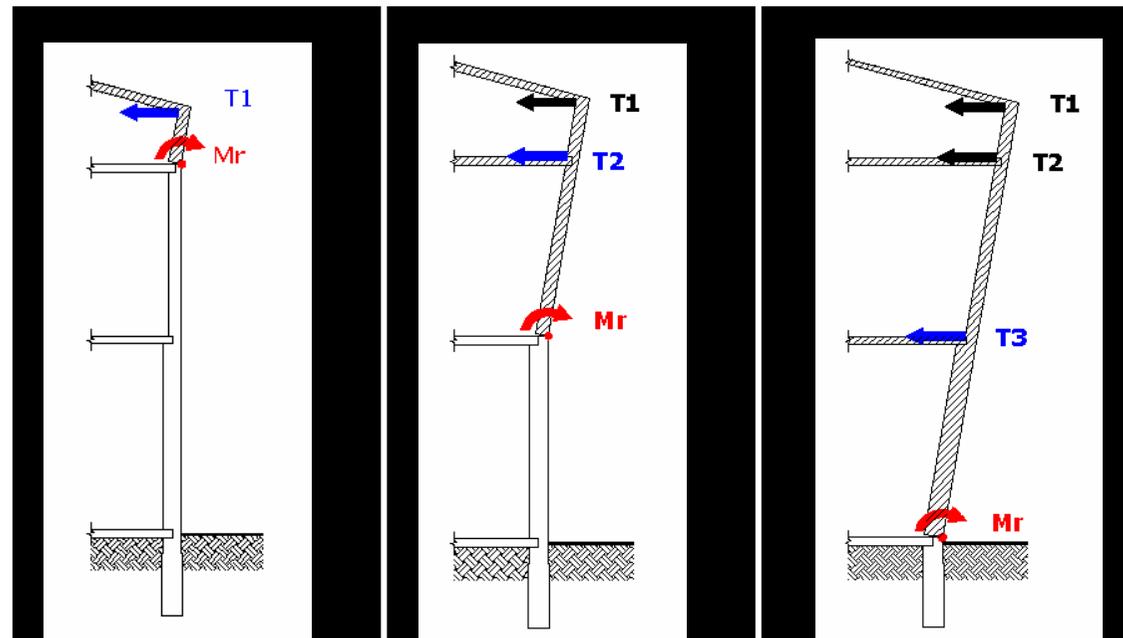
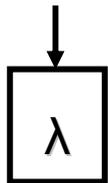
## Analisi locale (azioni fuori dal piano)

### -RIBALTAMENTO

- Risultati: nessuna parete verificata
- Intervento: Tiranti

Moltiplicatore di progetto

$$a_0 = \frac{a_g S}{q} \frac{\alpha}{C_1} + 1.5 \frac{z}{H} \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\theta}_0}$$



*Schemi per il calcolo dei tiranti*

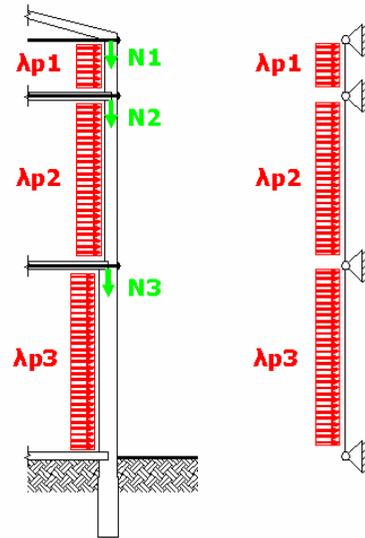
# Edificio esistente

## Analisi locale (azioni fuori dal piano)

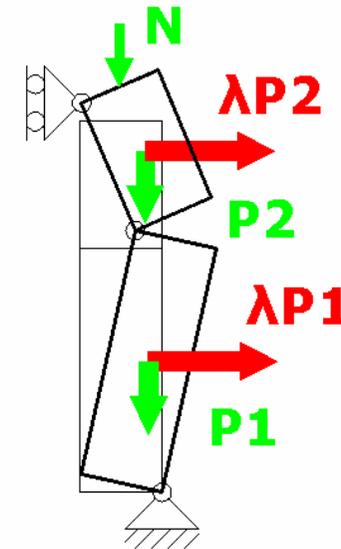
### -PRESSOFLESSIONE

Assicurate le pareti ai solai e scongiurate ribaltamenti → Rottura interna

- Schema: trave appoggiata



- Meccanismo delle 3 cerniere



- Analisi Cinematica: Calcolo di  $\lambda$ , moltiplicatore dei carichi orizzontali

- Verifica:  $\lambda > a_0$ , tutte le pareti risultano verificate →

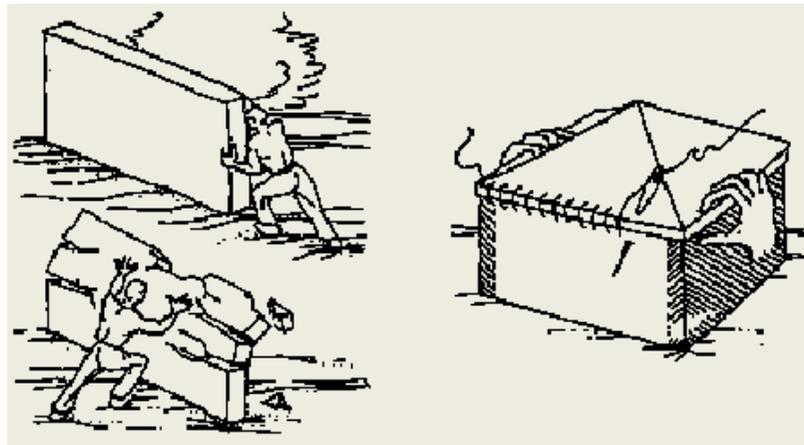
*Analisi globale*

## Edificio esistente

### Analisi globale

- Verifica delle pareti per sollecitazioni nel proprio piano
- Assicurato un comportamento "scatolare":
  1. Esclusi collassi locali per azioni fuori dal piano
  2. Solai rigidi nel proprio piano

Normativa: Solai con soletta collaborante e rete metallica  $S > 5 \text{ cm}$



# Edificio esistente

## Analisi globale

-Modellazione (fem)

1. Solai rigidi nel proprio piano
2. Maschi murari: plate & shell
3. Fasce di piano: bielle

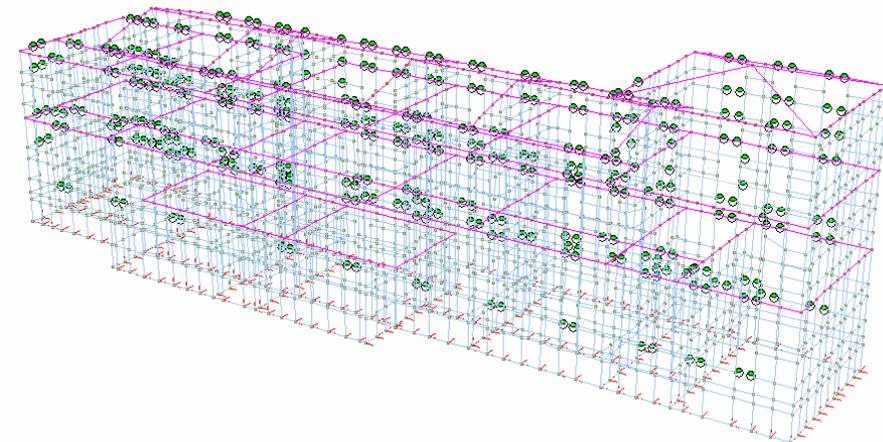
- Tipi di analisi:
  - a. Analisi statica lineare
  - b. Analisi dinamica modale

- $q = 2.7$  fattore di struttura

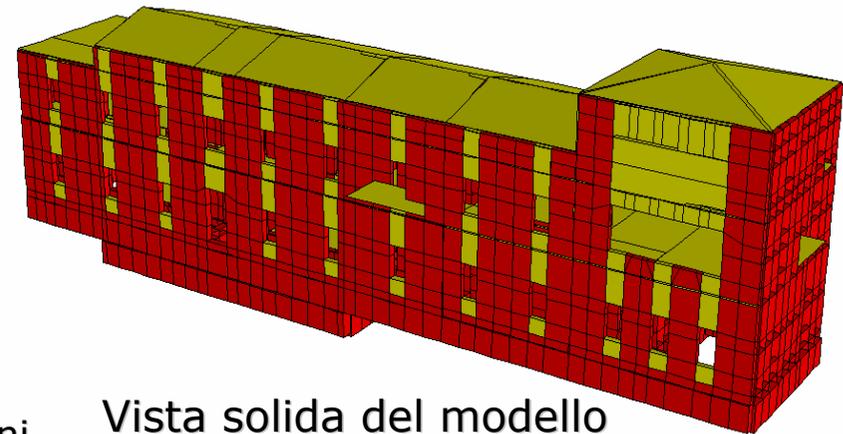
Muratura ordinaria

Non  
regolari  
in elevazione

Due o  
Più piani



Vista del modello con elementi

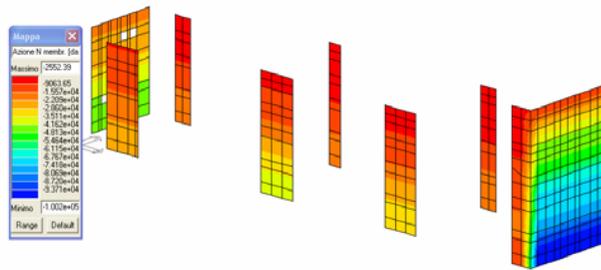


Vista solida del modello

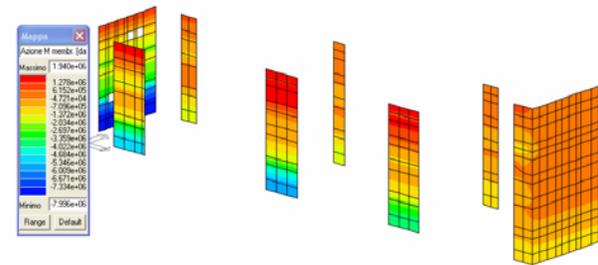
# Edificio esistente

## Analisi globale

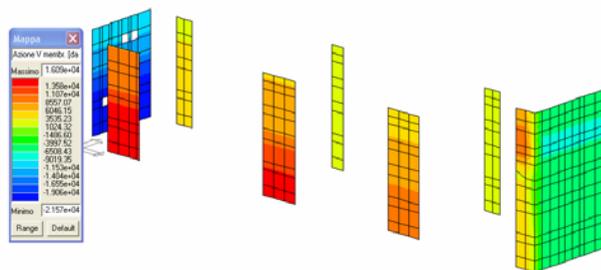
### -ANALISI STATICA LINEARE



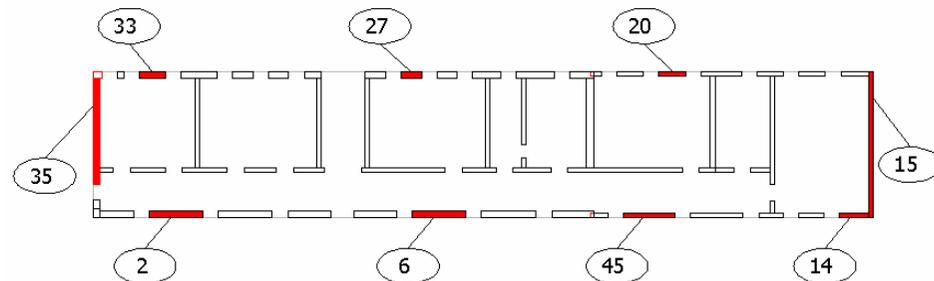
Mappa sforzo normale



Mappa momento



Mappa taglio



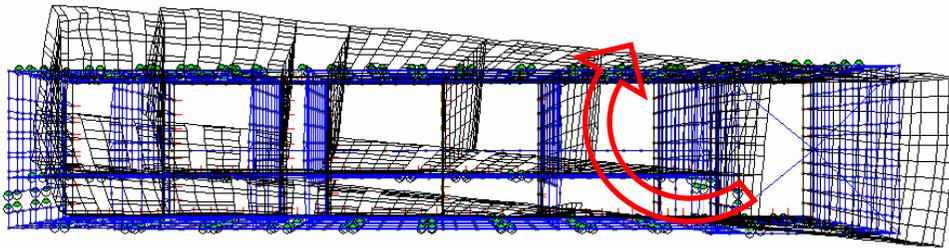
Setti murari in esame

## Edificio esistente

### Analisi globale

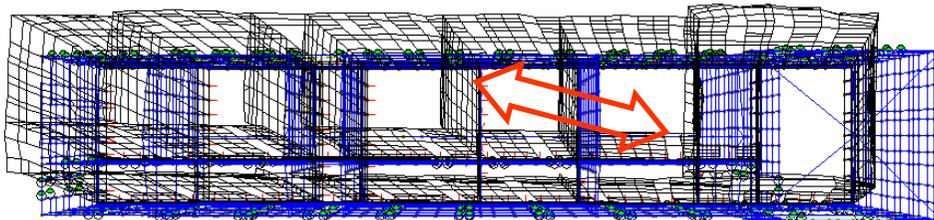
#### *-ANALISI DINAMICA MODALE*

#### Modi di vibrare



Primo modo

$T = 0.260 \text{ sec}$



Secondo modo

$T = 0.242$

## Edificio esistente

### Analisi globale

#### *-CONFRONTO DEI RISULTATI*

- Verifiche

a. Pressoflessione

b. Taglio per scorrimento  
e fessurazione diagonale

<b>Analisi statica lineare</b>	Nessun setto verificato
<b>Analisi dinamica modale</b>	Nessun setto verificato

- Calcolo della PGA di collasso

Valore PGA di collasso

<b>Analisi statica lineare</b>	0.052g
<b>Analisi dinamica modale</b>	0.055g

## Edificio esistente

### Analisi globale

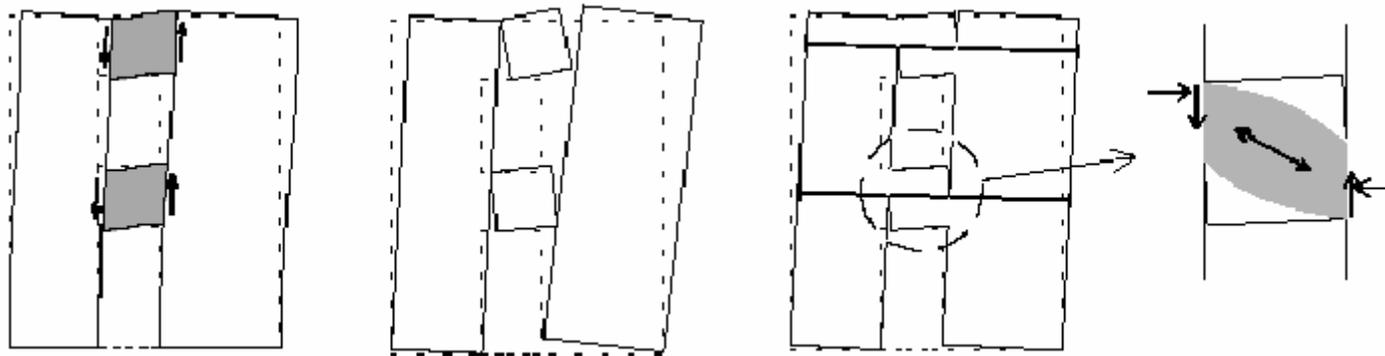
*-Intervento per far collaborare le fasce di piano*

- Influenza delle fasce sul tipo di risposta:

Accoppiamento tra i montanti murari

- Inserimento di tiranti (o cordoli):

Fornire compressione necessaria per attivare puntone inclinato



# Edificio esistente

## Analisi globale (edificio riparato)

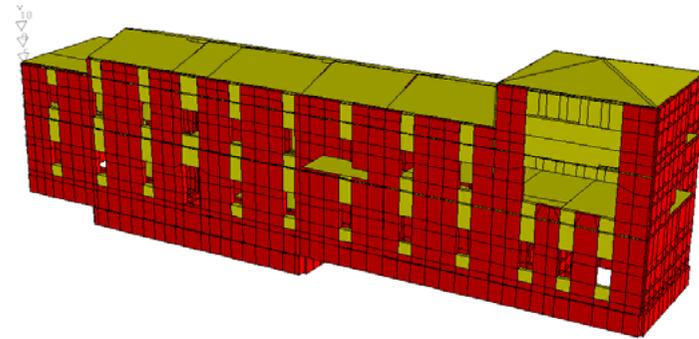
### -Modellazione

1. Solai rigidi nel proprio piano
2. Maschi murari: plate & shell
3. Fasce di piano: plate & shell

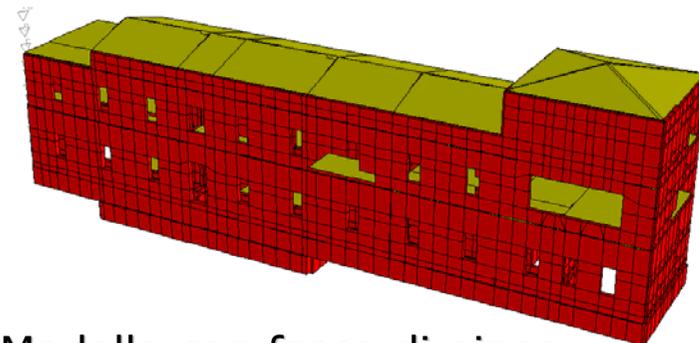
### ■ Tipi di analisi:

- a. Analisi statica lineare
- b. Analisi dinamica modale
- c. Analisi statica non-lineare  
(metodo POR)

└ con foglio Excel



Modello senza fasce di piano



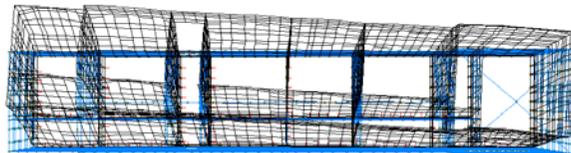
Modello con fasce di piano

# Edificio esistente

## Analisi globale (edificio riparato)

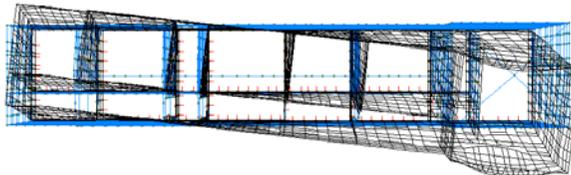
### *-ANALISI DINAMICA MODALE*

- Modi di vibrare



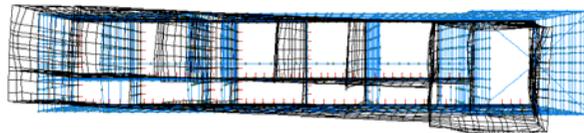
Modo 1

$T = 0.230 \text{ s}$



Modo 2

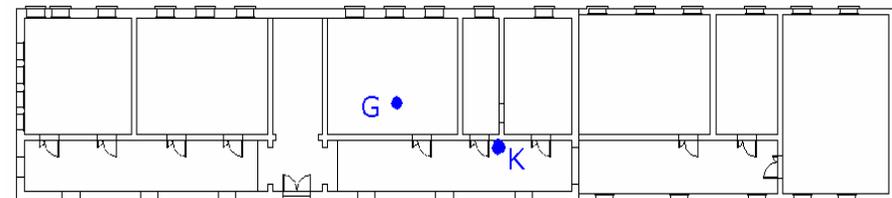
$T = 0.190 \text{ s}$



Modo 3

$T = 0.158 \text{ s}$

modo	% massa x	% massa y
1	0.2	79.7
2	4.4	5.9
3	82.8	0.01

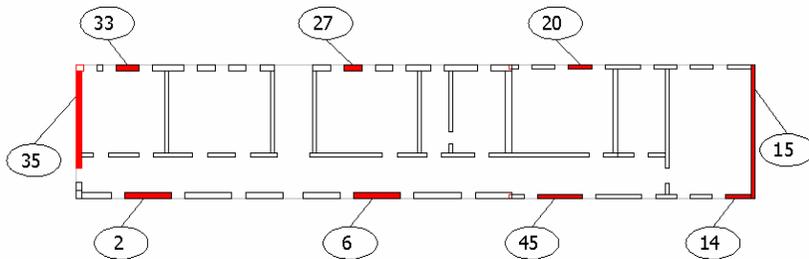


## Edificio esistente

### Analisi globale (edificio riparato)

*-ANALISI STATICA LINEARE E DINAMICA MODALE*

- Analisi di 9 montanti murari



- Estrazione di N, M, T dai risultati delle analisi

- Calcolo PGA di collasso

<b>Analisi statica lineare</b>	0.097g
<b>Analisi dinamica modale</b>	0.105g

## Edificio esistente

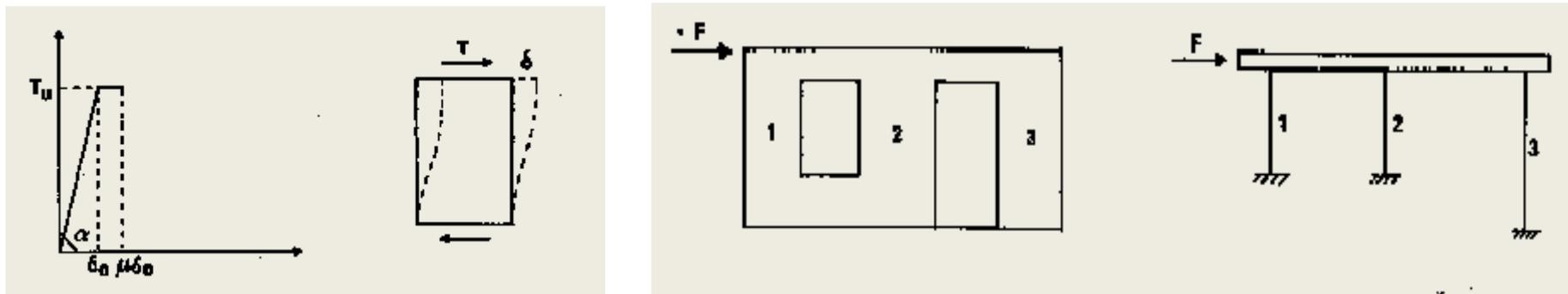
### Analisi globale (edificio riparato)

-ANALISI STATICA NON-LINEARE, metodo POR

- Indicazioni della Circ.21745 del 30/7/81 (fino a 3 piani)

*"istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica per la riparazione ed il rafforzamento degli edifici in muratura danneggiati dal sisma" **Non più in vigore***

- Ipotesi:
  1. Comportamento elastico-perfettamente plastico
  2. Rottura a taglio per fessurazione diagonale
  3. Solai (e fasce) infinitamente rigidi



# Edificio esistente

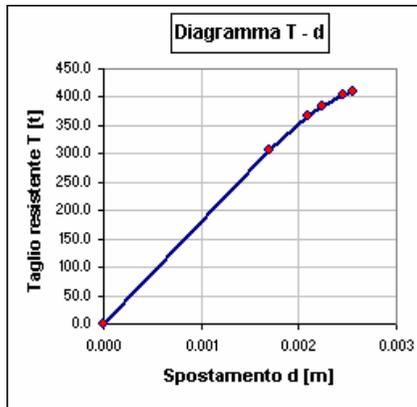
## Analisi globale (edificio riparato)

-ANALISI STATICA NON-LINEARE, metodo POR

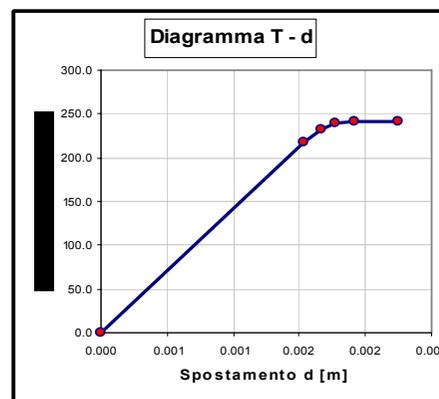
### ■ Analisi

1. calcolo del taglio ultimo (piano terra)  
somma dei contributi dei vari setti

2. calcolo del taglio applicato  
di piano  $T_i$



Direzione x



Direzione y

Somma delle forze di piano  
dei piani superiori

■ Verifica:  $T_{ul} > T_i$

**Non verificato**



## Edificio esistente

### Analisi globale (edificio riparato)

*-Confronto fra i 3 metodi di analisi*

- Calcolo della PGA di collasso

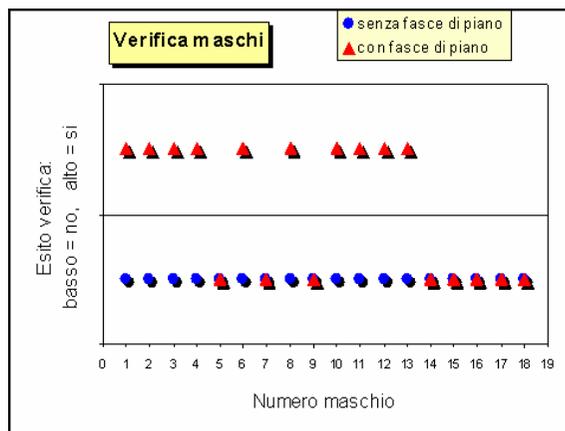
Analisi statica non-lineare POR	0.141g
Analisi dinamica modale	0.105g
Analisi statica lineare	0.097g

# Edificio esistente

## Analisi globale

-Confronto fra edificio prima e dopo l'intervento

### ■ Verifiche



>50% setti verificati

### ■ Calcolo della PGA di collasso

Senza fasce	0.055g
Con fasce	0.105g

# Edificio esistente

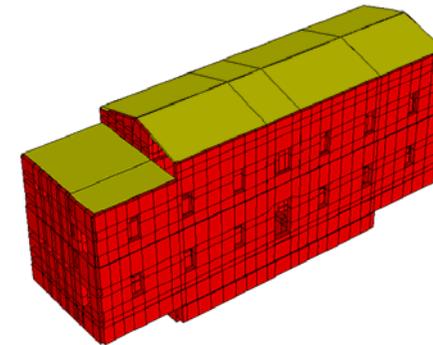
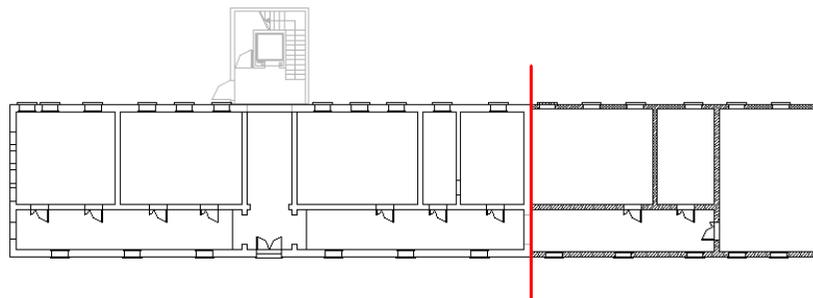
## Interventi finali

*-Giunto sismico*

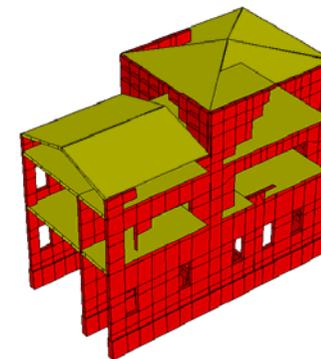
- Problema: dubbio ammassamento tra le due porzioni di edificio,

## **Pericolo di martellamento**

- Analisi dei blocchi separati



1. Edificio di fine '800



2. Edificio del 1920



## Edificio esistente

### Interventi finali

*-Giunto sismico*

- Analisi dinamica modale
- Calcolo PGA di collasso
- Confronto con edificio unito

Edificio unito	0.105g
Edificio diviso	0.119g

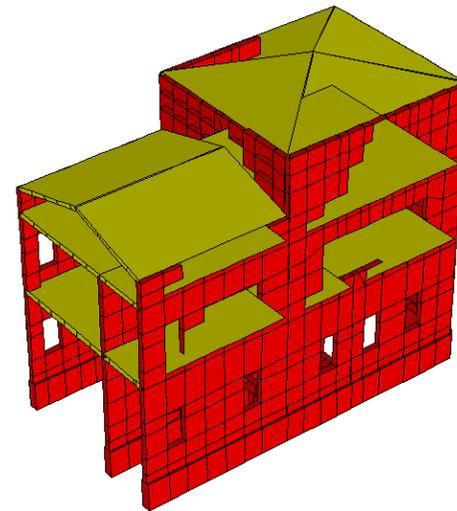
- Dimensionamento giunto: 
$$d = \frac{H}{100} \frac{a_g}{0.35g} @ 5cm$$

## Edificio esistente

### Interventi finali

*-Ripristino parete*

- Problema: perdita di una parete nell'edificio del 1920 a seguito del giunto
- Sezione aperta in pianta
- Distanza tra G e K
- Moti torsionali
  
- Intervento:  
Ripristino parete

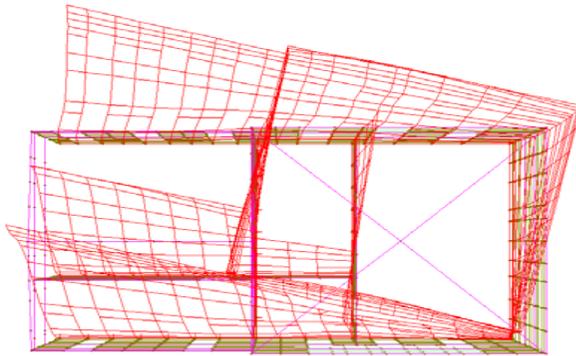


# Edificio esistente

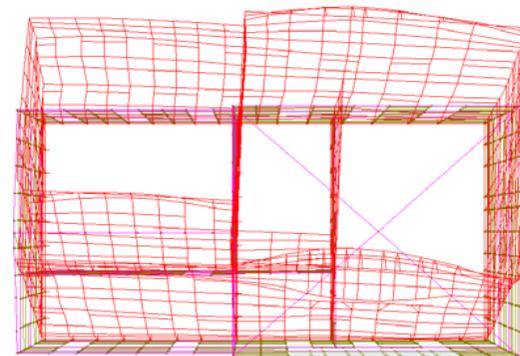
## Interventi finali

*-Ripristino parete*

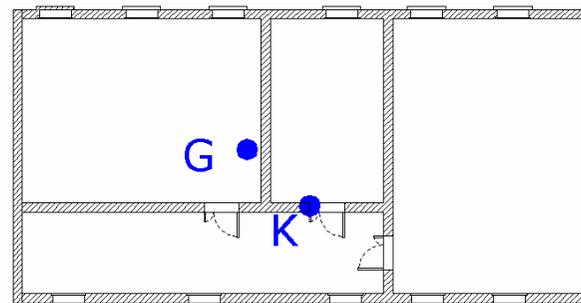
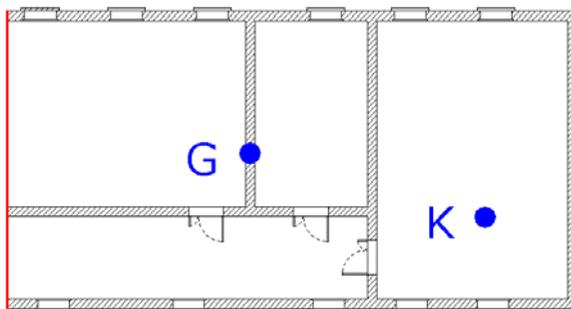
### ■ Analisi modale



Primo modo  $T = 0.292$  sec



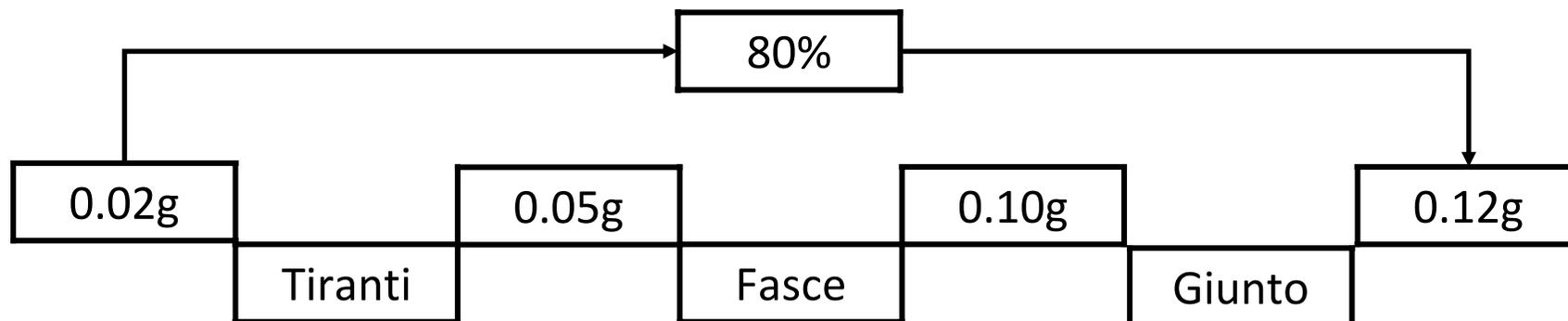
Primo modo  $T = 0.217$  sec



## Edificio esistente

### Conclusione

- Edificio esistente non possiede in buon comportamento sismico
- Interventi poco invasivi
  - Collegamenti pareti-solai
  - Collaborazione fasce di piano
- Miglioramento



## Edificio storico in aggregato

---



**Palazzo Pendaglia risulta completato all'inizio del 1400 , ma ingloba parti medievali precedenti.**

**L'edificio è stato restaurato ed adibito ad uso scolastico negli anni 90.**



## Edificio storico in aggregato

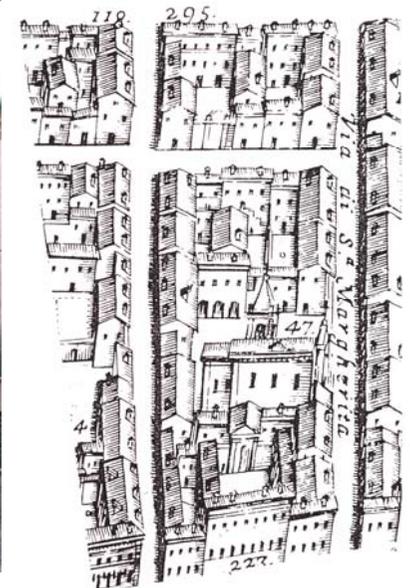
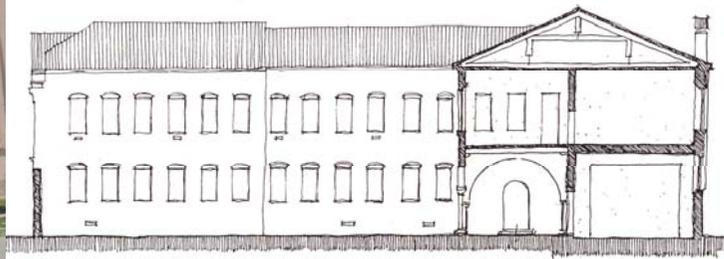
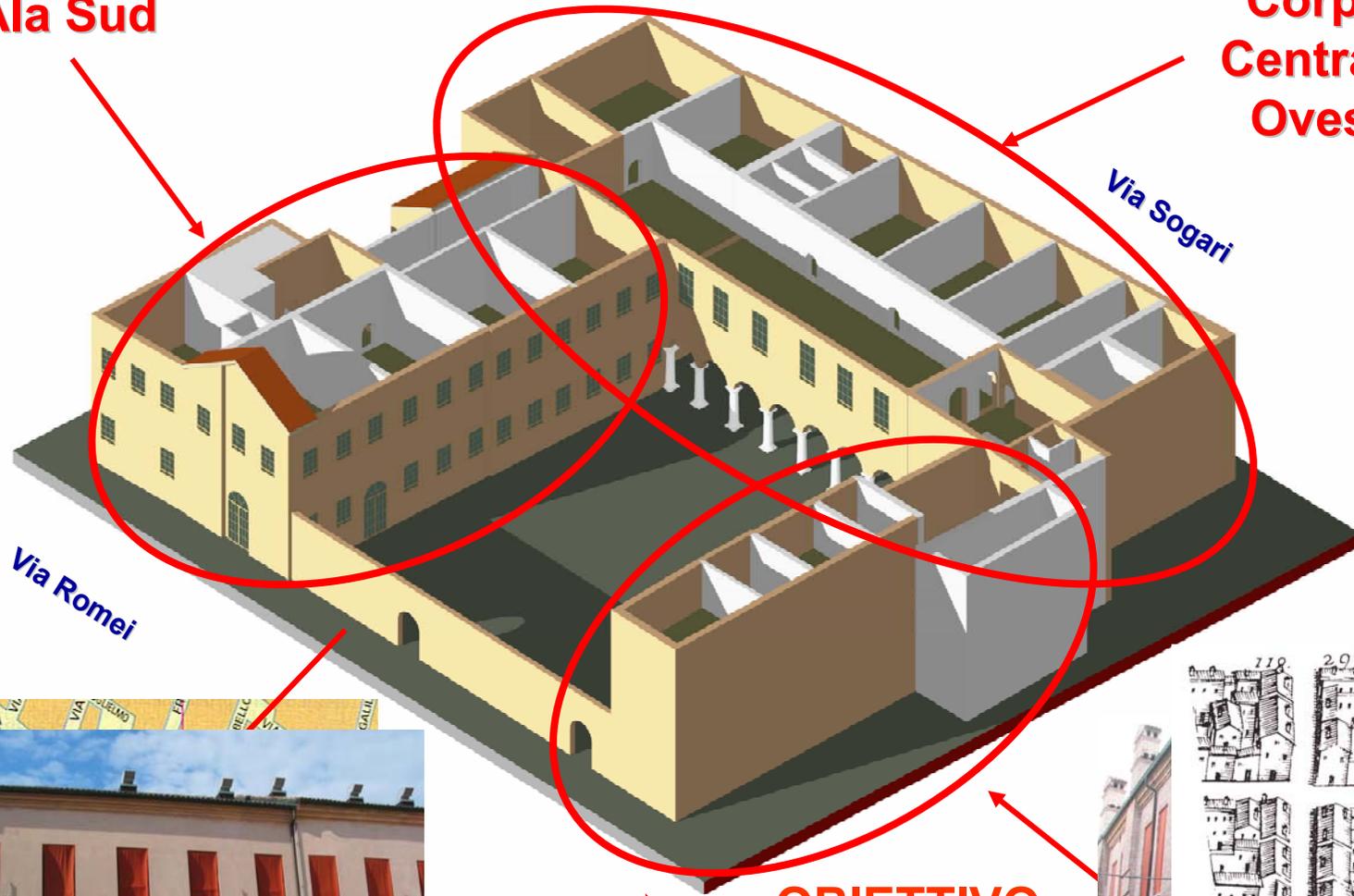
### ***Edifici in aggregato***

- Individuazione unità strutturale delimitata da spazi aperti, giunti strutturali o da **edifici contigui strutturalmente ma, almeno tipologicamente, diversi.**
- Valutare spinte non contrastate causate da orizzontamenti sfalsati e meccanismi locali derivanti da prospetti non allineati, US adiacenti di diverse altezze.
- L'analisi globale ... assume spesso un significato convenzionale ... metodologie semplificate
- La verifica per edifici con più di 2 piani ( con solai sufficientemente rigidi) può essere fatta mediante analisi statica non lineare ... trascurando la variazione della forza assiale dovuta all'azione sismica. Fuorché per le unità d'angolo .....si possono trascurare gli effetti torsionali
- Unità d'angolo e di testata ... introdurre coefficienti maggiorativi
- Solai flessibili ... analisi di singole pareti o di sistemi di pareti complanari soggette ai carichi verticali di competenza

# Palazzo Pendaglia - Ferrara

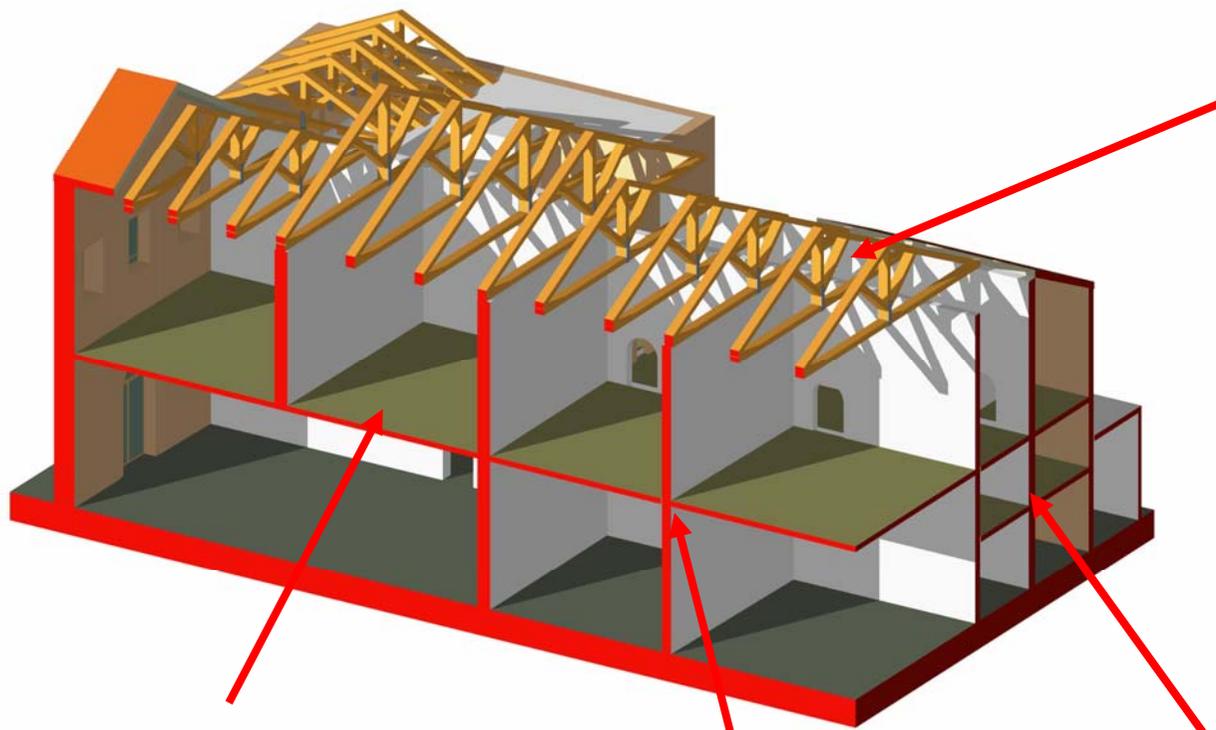
**Ala Sud**

**Corpo Centrale Ovest**



**OGGETTIVO**

## Ala Sud



Solaio in lamiera grecata

Solai in legno

Solaio

Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura

O.P.C.M.3274 9/9/04 Allegato 11D (min-max): NTC08 App. C8

“ MURATURA IN MATTONI PIENI E MALTA DI CALCE ”

$t_{rk}$ =tensione tangenziale caratteristica 0.9 -1.4 (daN/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{rk}$ =tensione caratteristica a compressione 27- 42

G=modulo di elasticità tangenziale 4500-6000

E=modulo di Young 27000-36000

$\gamma_m$ =peso specifico 1800



Livello di conoscenza LC1(limitata)

Fattore di confidenza=1.35

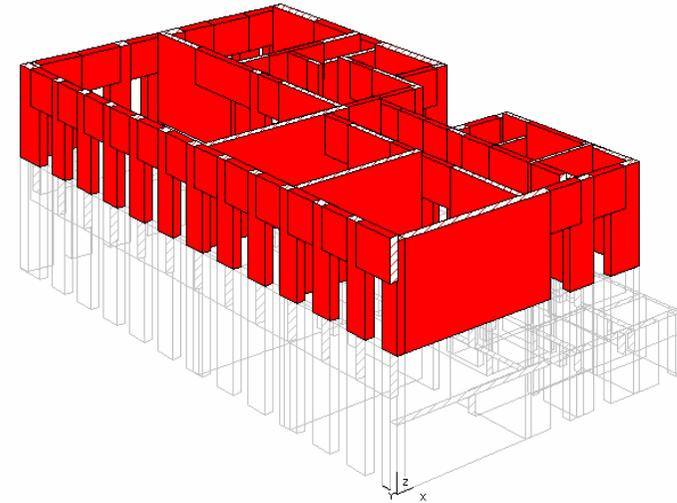
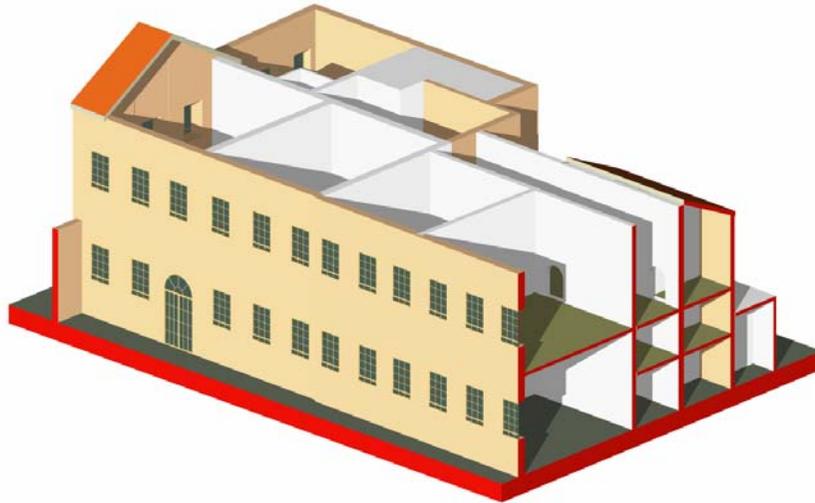


# Modellazione della Struttura

(Aedes Software)

O.P.C.M.3274 del 9/9/04

Analisi Statica non Lineare (Pushover)



## D.M.20/11/87 Modello a telaio equivalente (ECF)

➤ Verifi

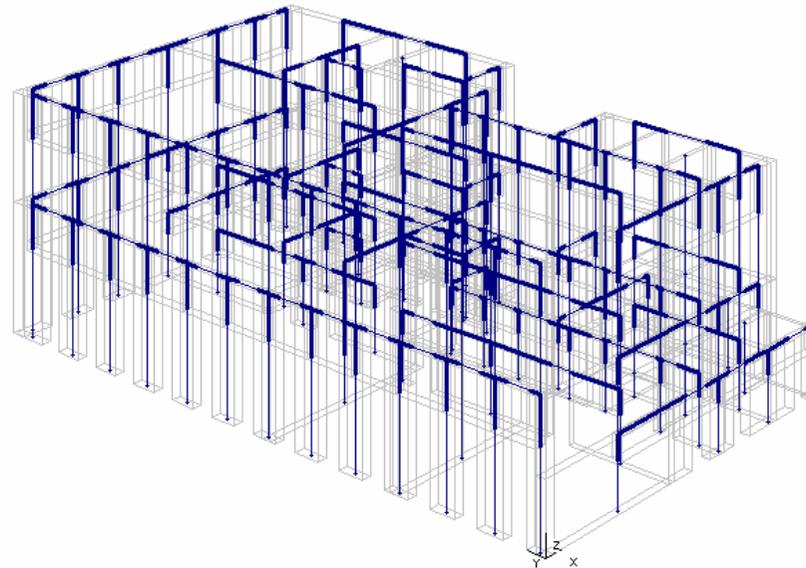
D.M.1

➤ Anal

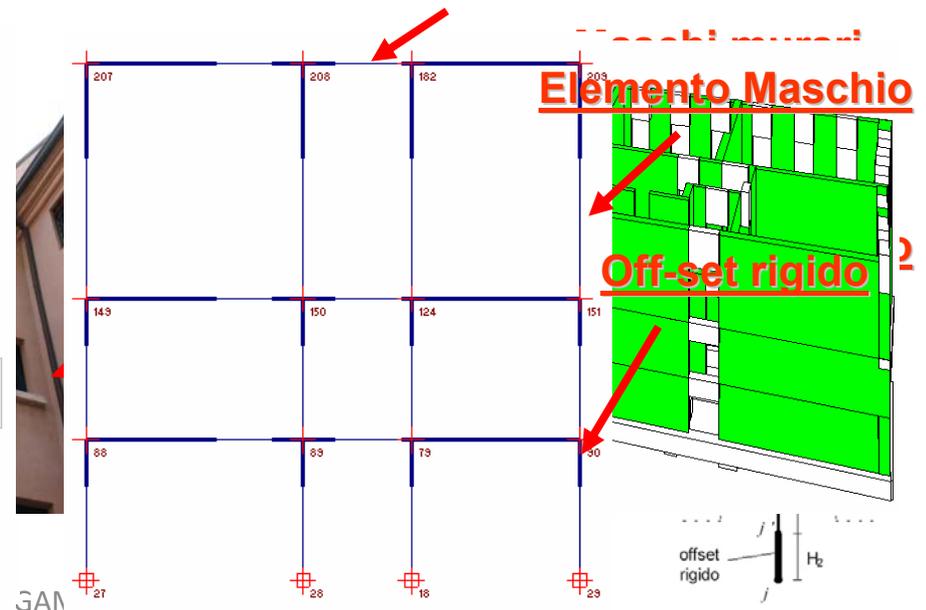
Valutazi

- ne
- or
- rik

Reg\_



## Elemento Fascia



# Principali meccanismi di rottura delle murature (OPCM3274 9/9/04)

**Scorrimento**  $V_t = D \cdot t \cdot f_{vd}$   
(murature nuove)



**Pressoflessione**

(murature nuove ed esistenti)

$$M_u = \left( \frac{D^2 \cdot t \cdot \sigma_0}{2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_0}{0.85 f_d} \right)$$

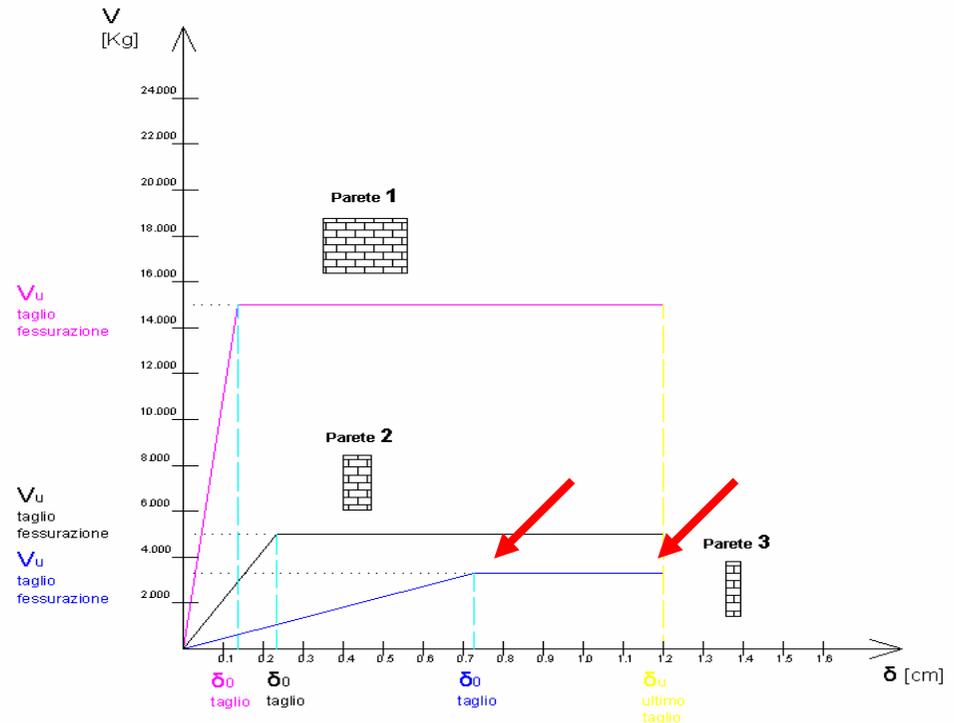
**Fessurazione Diagonale**

(murature esistenti)

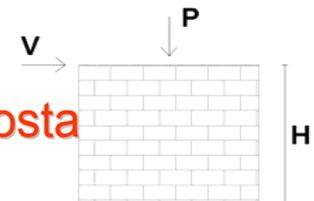


$$V_t = D \cdot t \cdot \frac{1.5 \cdot \tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \cdot \tau_{0d}}} = D \cdot t \cdot \frac{f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}}$$

**Comportamento bilineare dei maschi murari**  
**“elastico-perfettamente plastico”**



- **Spostamento ultimo elastico**  
 $\delta_u = 0.4\% H$  (taglio) della risposta  
 $\delta_u = 0.6\% H$  (pressoflessione)



# Analisi Statica non lineare (Metodo Pushover)

## Metodologia:

Consiste nell'applicare all'edificio i carichi gravitazionali ed un sistema di forze orizzontali monotonamente crescente fino al raggiungimento delle condizioni ultime.

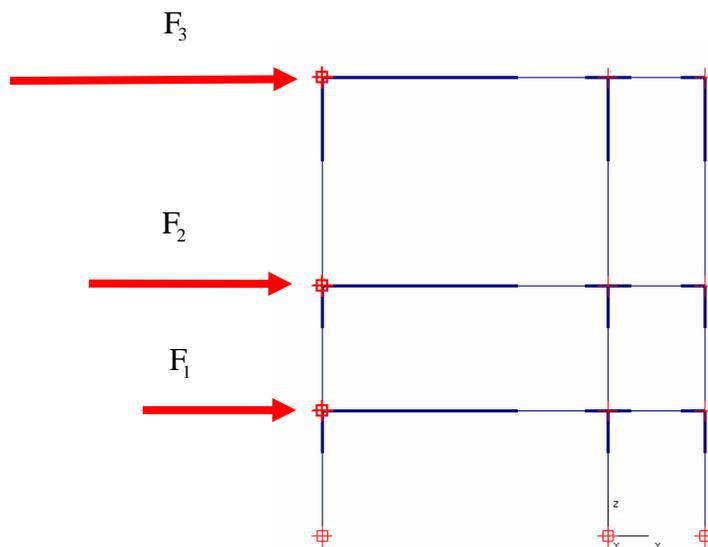
Devono essere applicate almeno due distinte distribuzioni di forze orizzontali, applicate nei baricentri delle masse di ciascun piano:

- TIPO A) proporzionale alle masse:
- TIPO B) proporzionale a quelle da utilizzarsi per l'analisi statica lineare (ed.in muratura):
- TIPO C) proporzionale al prodotto delle masse per la deformata corrispondente al primo modo di vibrare:

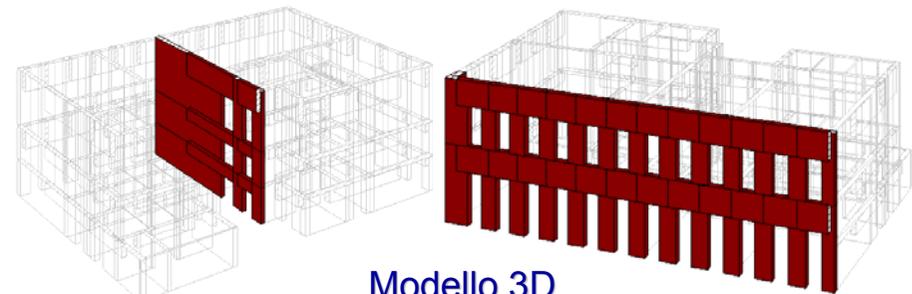
$$F_j = \frac{W_j}{\sum W_j} V$$

$$F_j = \frac{W_j \cdot z_j}{\sum W_j \cdot z_i} V$$

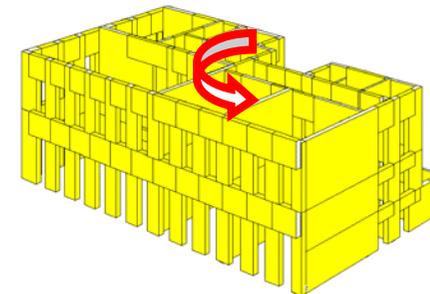
$$F_j = \frac{W_j \cdot \Phi_j}{\sum W_j \cdot \Phi_j} V$$



Modelli 2D



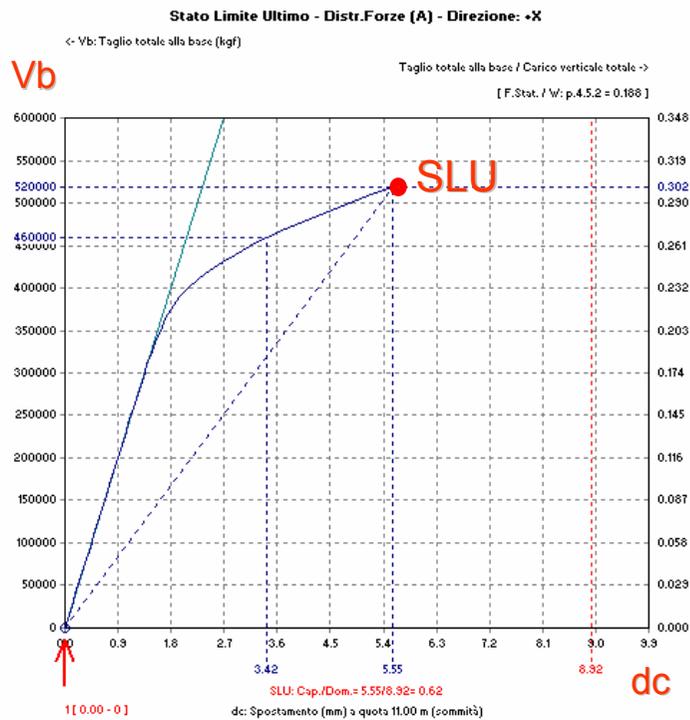
Modello 3D



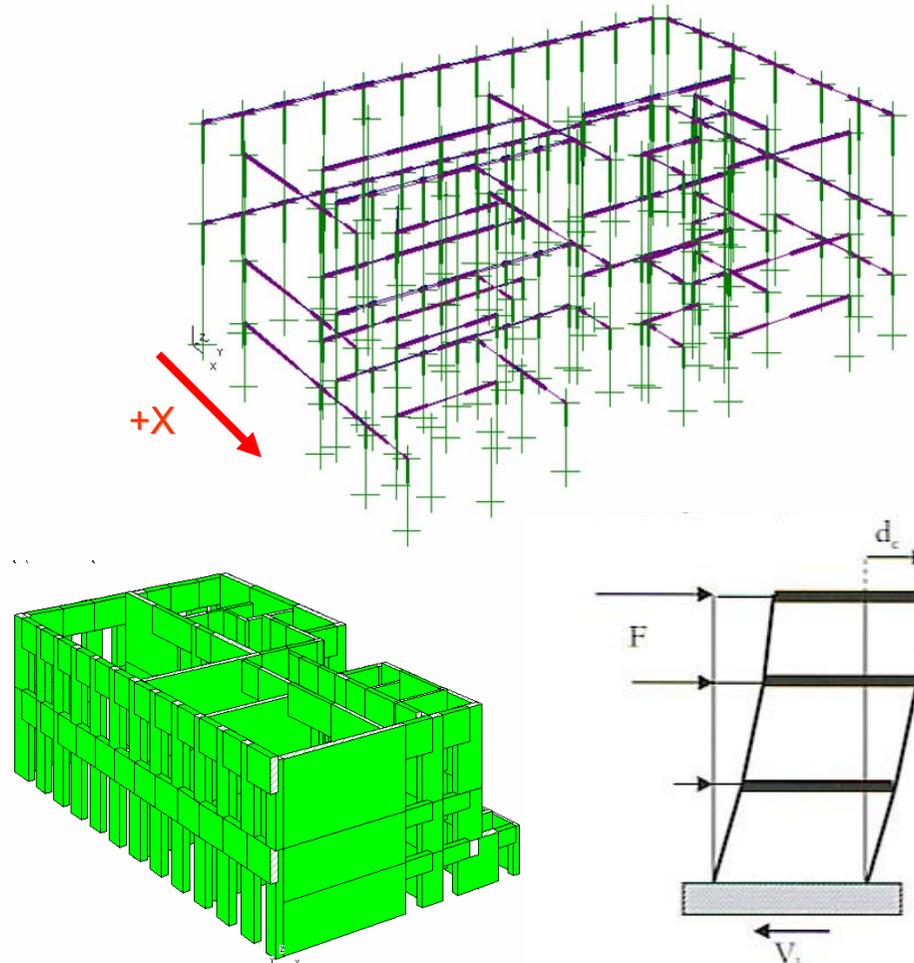
# Analisi Statica non lineare (Metodo Pushover)

- Determinazione del legame forza-spostamento generalizzato tra:
  - risultante delle forze applicate ( $V_b$ )
  - spostamento di un punto di controllo della struttura ( $d_c$ -baricentro dell'ultimo piano).

## CURVA DI CAPACITA'



## Modello 3D





# Analisi Statica non lineare (Metodo Pushover)

## ● APPLICAZIONI:

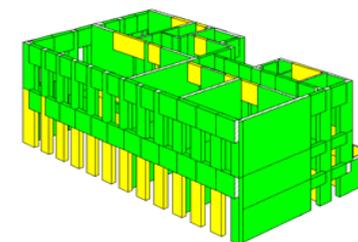
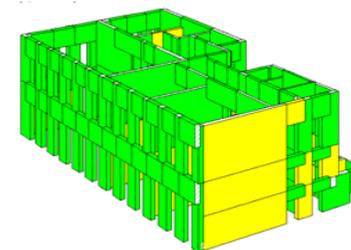
- Metodo di progetto sostitutivo dei metodi lineari (statici e dinamici) per gli edifici nuovi
- Metodo per la valutazione di edifici esistenti

## ● SCOPI:

- Valutare i rapporti di sovreresistenza  $q = \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
- Individuazione delle zone critiche dove maggiore è la richiesta di duttilità
- Controllo delle deformazioni e sollecitazioni nei singoli elementi della struttura ad ogni passo incrementale
- Valutazione dei livelli di accelerazione al suolo (PGA)

Direzione	Forza max (Kg)	$d_c$ (mm)	$\Delta_d$ (mm)	$d_c / \Delta_d$	PGA
+X	520000	5.55	8.6	0.622	0.093g
-X	-570000	7.19	10.5	0.682	0.102g

Direzione	Forza max (Kg)	$d_c$ (mm)	$\Delta_d$ (mm)	$d_c / \Delta_d$	PGA
+Y	730000	8.84	10.1	0.874	0.131g
-Y	-690000	7.10	8.6	0.825	0.124g

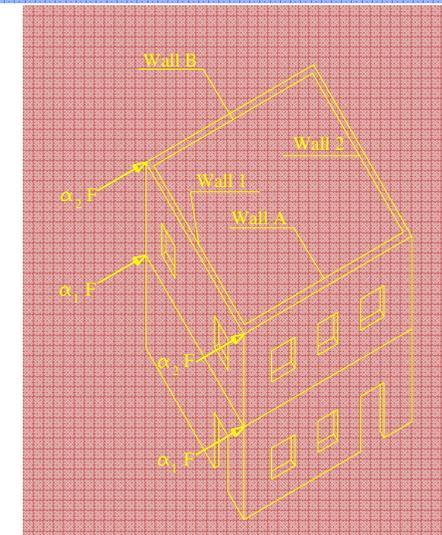
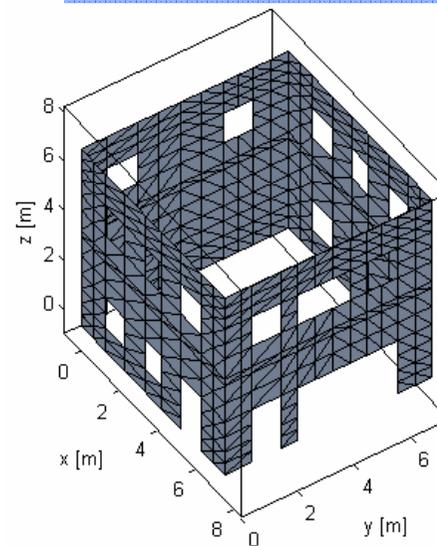
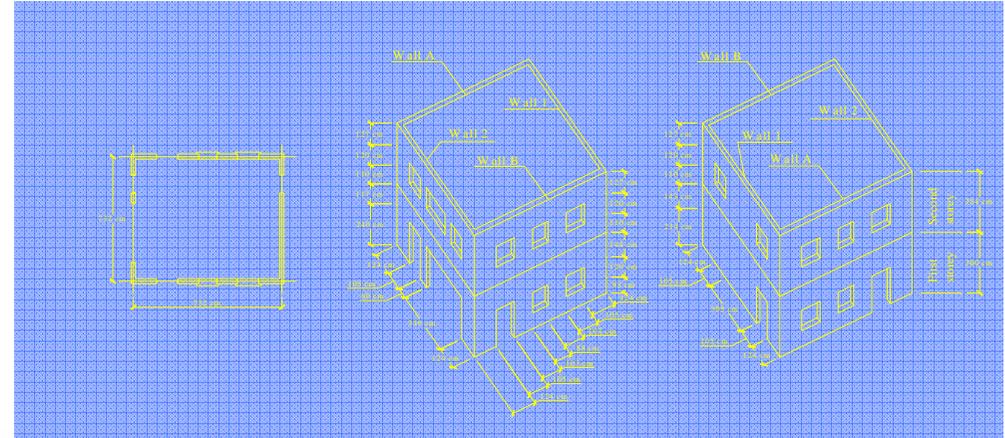


# Confronto fra risultati sperimentali, analisi limite e programmi commerciali



## ESEMPI STRUTTURALI: SPERIMENTAZIONE EFFETTUATA A ATLANTA, GEORGIA TECH (2006)

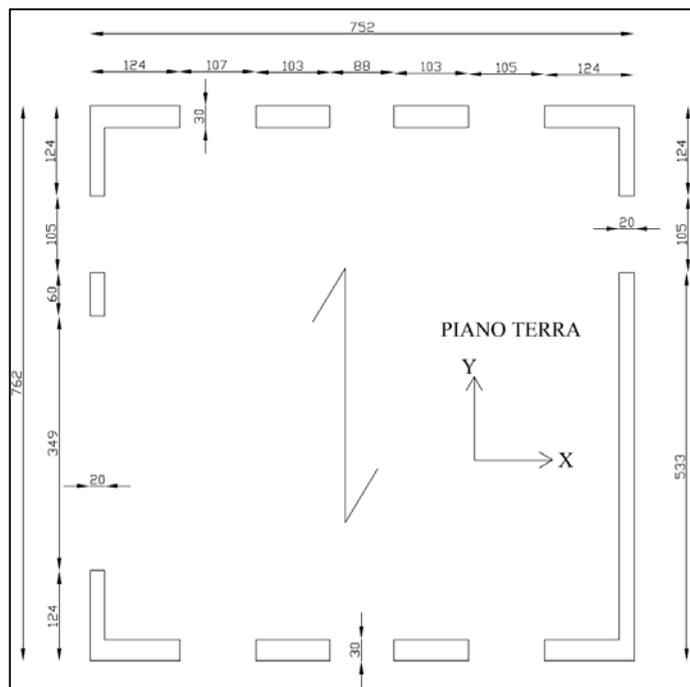
- Confronto con alcuni dati sperimentali disponibili in letteratura Tianyi Yi et al. [2006]
- Edificio in muratura a 2 piani con rapporti di apertura di versi tra i muri perimetrali → è possibile valutare il comportamento a torsione dell'edificio
- Risultati disponibili: massimo taglio alla base, sia sperimentale sia numerico (ottenuto utilizzando elementi di contatto)



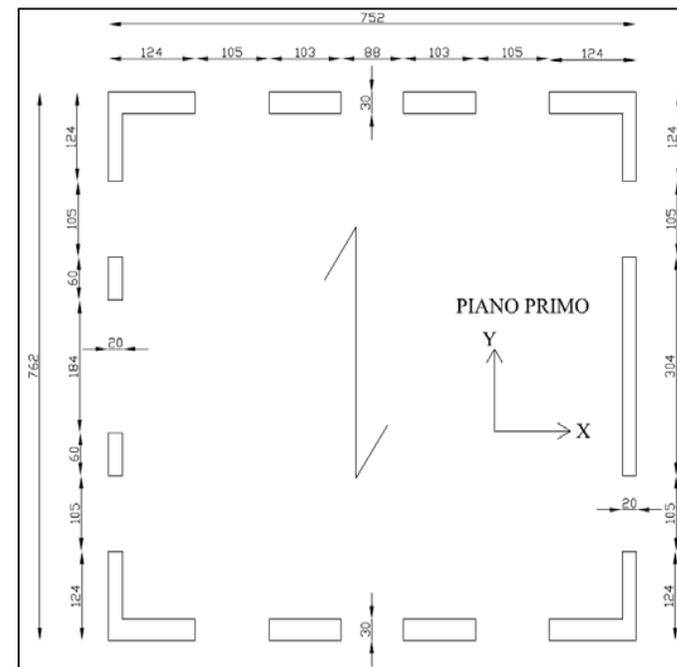
# Confronto fra risultati sperimentali, analisi limite e programmi commerciali



## EDIFICIO TESTATO AL GEORGIA TECH (2006)



Altezza di interpiano: 3.60 cm



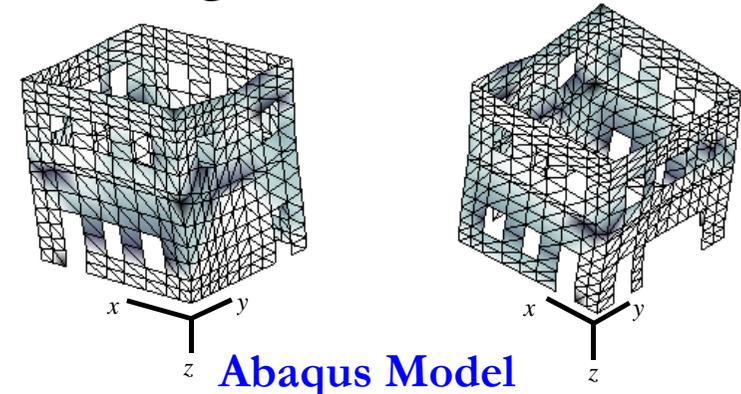
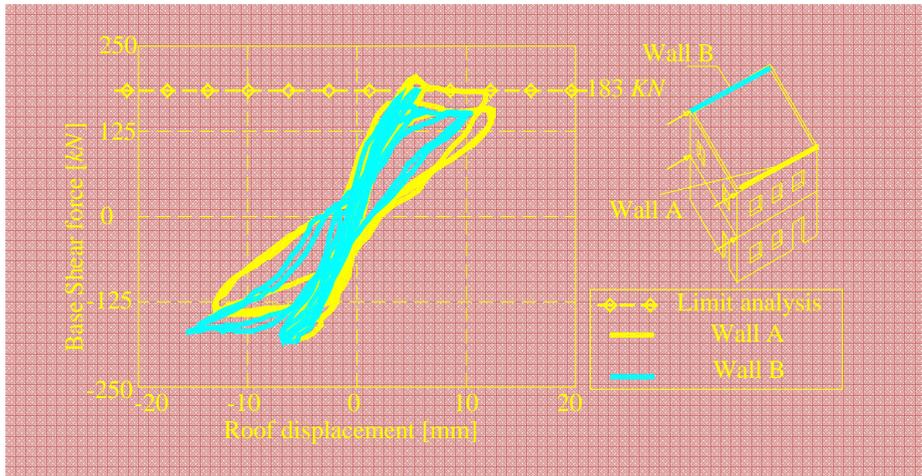
Altezza di interpiano: 3.54 cm

Spessore pareti:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Direzione X: 30 cm} \\ \text{Direzione Y: 20 cm} \end{array} \right.$

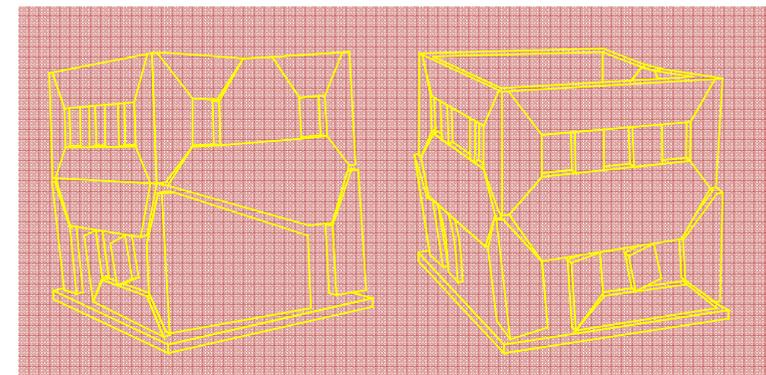
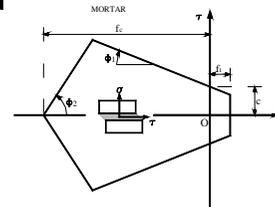
# Confronto fra risultati sperimentali, analisi limite e programmi commerciali

**EDIFICIO TESTATO AL GEORGIA TECH (2006): RISULTATI** Milani, Lourenço, Tralli

*Eng. Structures 2007*



- Edificio testato da Tianyi Yi et al. [2006]. Confronto tra curve sperimentali forza-spostamento e carico di collasso ottenuto con l'analisi limite.
- Il confronto con la deformata a collasso ottenuta con elementi contatto (ABAQUS) mostra l'accuratezza dei risultati ottenuti con il modello micro-meccanico proposto

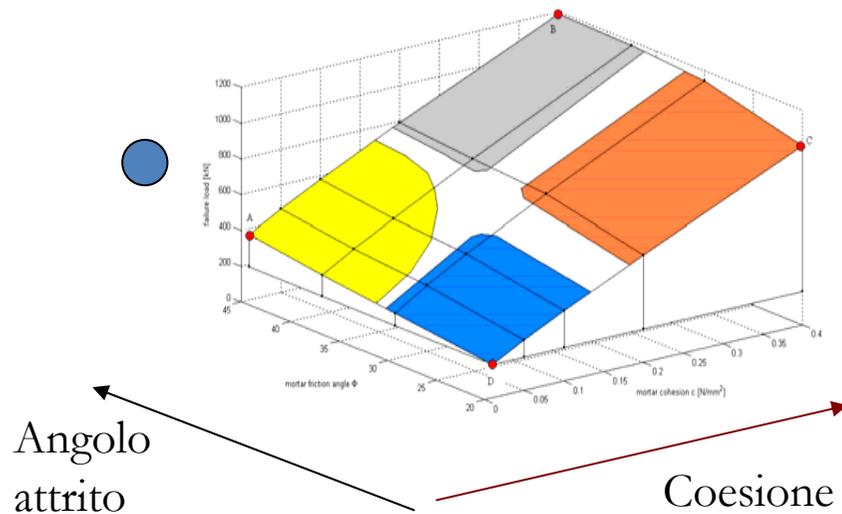


Proprietà meccaniche assunte per i giunti di malta

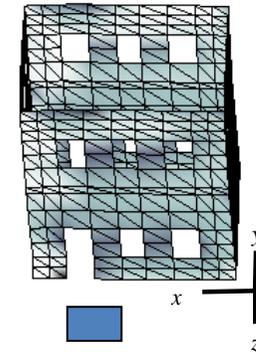
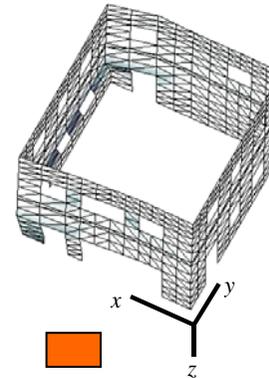
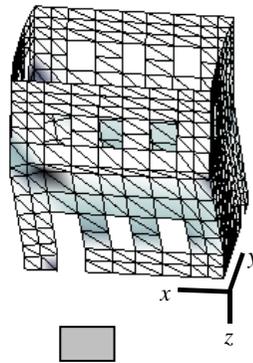
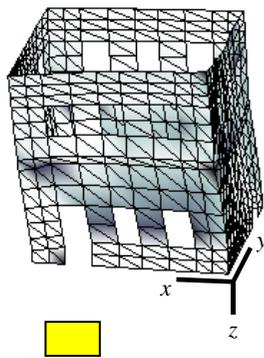
$$c=0.01 \text{ MPa} \quad \Phi=45^\circ \quad f_c=5 \text{ MPa}$$

# Confronto fra risultati sperimentali, analisi limite e programmi commerciali

## EDIFICIO TESTATO AL GEORGIA TECH (2006): ANALISI DI SENSITIVITÀ



- Per la malta: giunti di malta ridotti a interfacce con una superficie di crisi tipo Lourenço Rots [1997] linearizzata. Si sono fatti variare angolo di attrito e coesione della malta in un intervallo molto ampio.
- Si manifestano diversi meccanismi di collasso per diversi valori di coesione e angolo di attrito (si confronti il patch in figura)



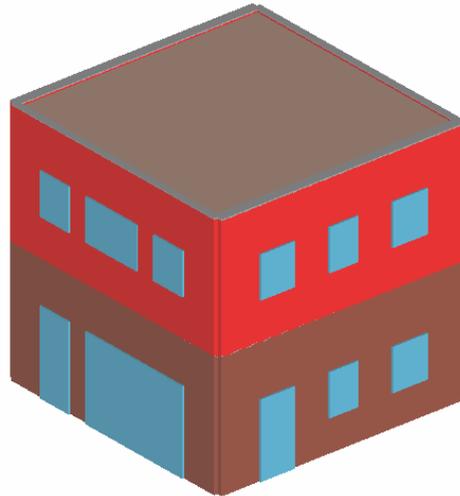
# Confronto fra risultati sperimentali, analisi limite e programmi commerciali



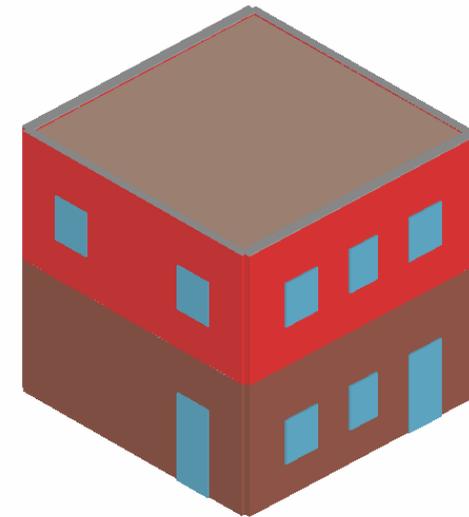
## Comparazione di Analisi Pushover eseguite su edifici in muratura

<b>Scheda comparativa n°</b>	6
<b>Scuola</b>	Edificio Test da letteratura con prove sperimentali
<b>Autori articolo</b>	Tianyi Yi, Franklin L. Moon, Roberto T. Leon, Lawrence F. Kahn
<b>Pubblicazione</b>	Journal of Structural Engineering, vol. 132, N° 5, May 1, 2006
<b>N° piani fuori terra</b>	2

•Vista Sud-Est



•Vista Nord-Ovest





# Confronto fra risultati sperimentali, analisi limite e programmi commerciali

## Carichi introdotti

Tipologia	Permanente (kN/m <sup>2</sup> )	Accidentale (kN/m <sup>2</sup> )
Solaio di piano	0.15	0.00
Copertura	0.15	0.00

## Materiali

$f_m$	4.1	MPa
E	6900	MPa
G	2760	MPa
$\tau_0$	0.2	MPa
w	22.19	kN/m <sup>3</sup>

•Murature di piano terra

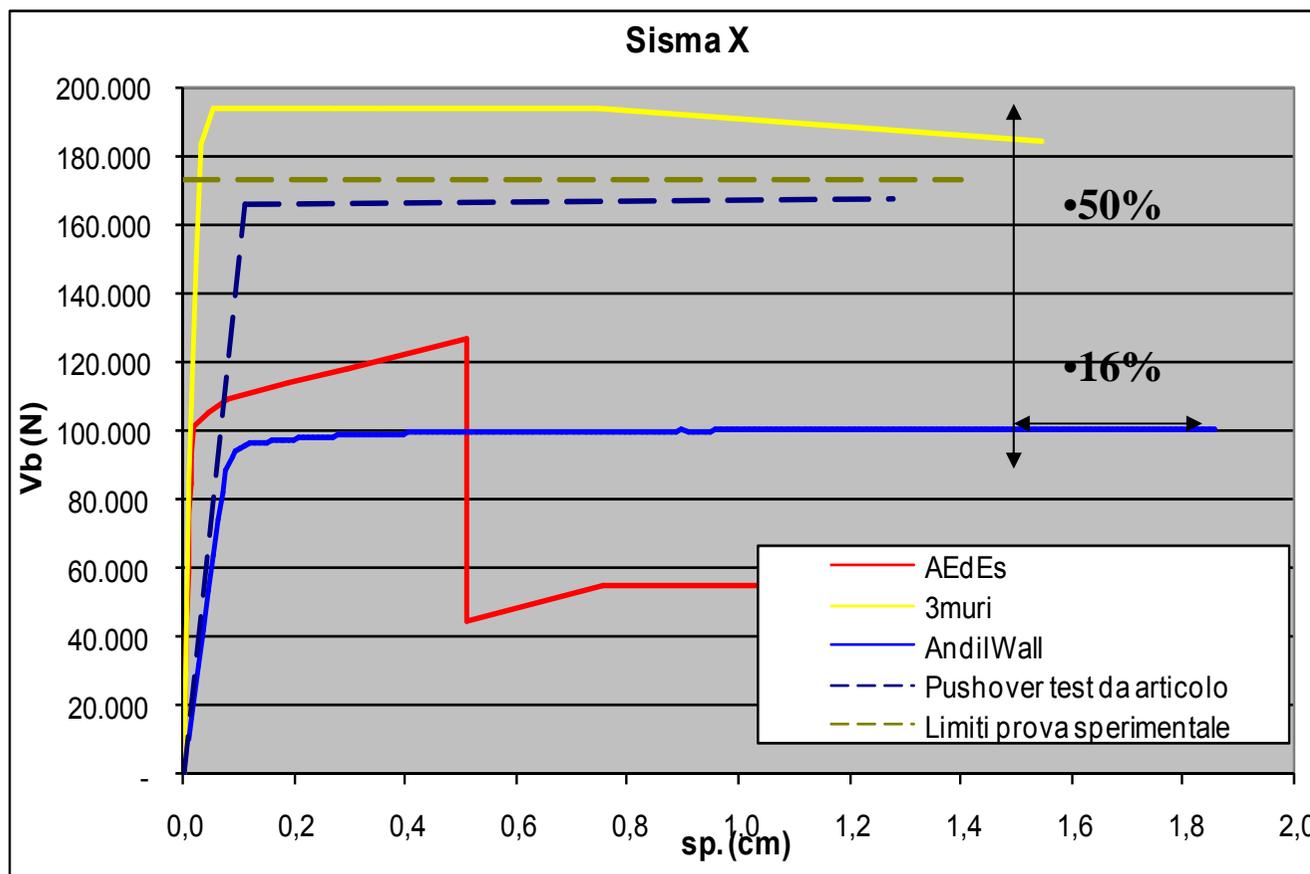
$f_m$	2.5	MPa
E	6900	MPa
G	2760	MPa
$\tau_0$	0.2	MPa
w	22.19	kN/m <sup>3</sup>

•Murature di piano primo

# Confronto fra risultati sperimentali, analisi limite e programmi commerciali



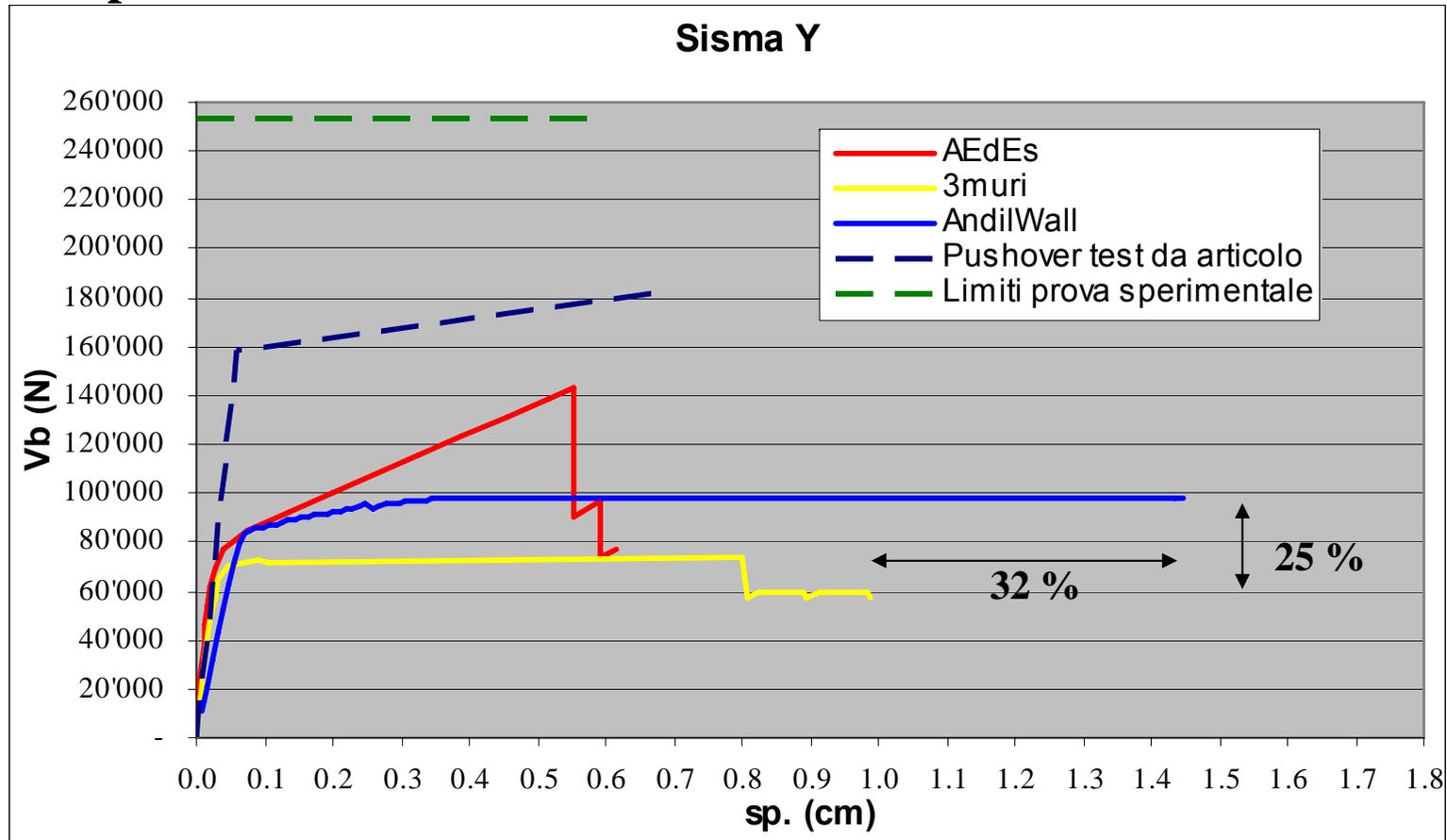
## Curve di capacità



La curva di capacità ottenuta da 3MURI si avvicina ai limiti della prova sperimentale

# Confronto fra risultati sperimentali, analisi limite e programmi commerciali

## Curve di capacità



In direzione Y nessun software si avvicina ai limiti della prova sperimentale.