

Corso di aggiornamento  
Progettazione strutturale e  
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

**Problemi specifici nel progetto di strutture  
antisismiche con pareti in c.a.**

10 - Analisi e giudizio sulla struttura

Spoletto  
10-11 maggio 2012  
Aurelio Gheresi

# Un mare di numeri. Come non perdersi?

## Analisi modale

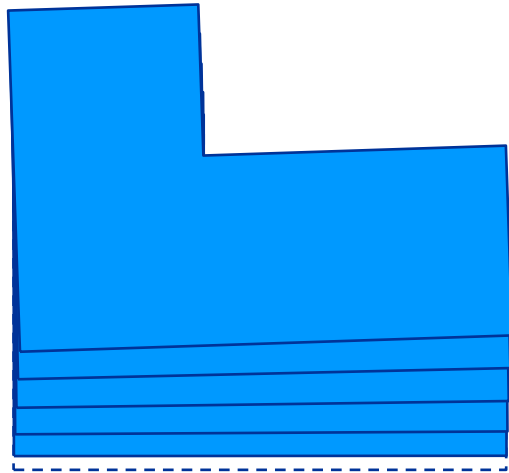
- Esaminare le deformate modali (indipendentemente dalla direzione del sisma)
  - sono disaccoppiate oppure accoppiate?
- Esaminare le masse partecipanti (per ciascuna direzione del sisma) per vedere quali modi danno maggior contributo
  - prevale un solo modo, o più di uno?
- Esaminare i periodi dei modi predominanti
  - corrispondono alle previsioni o no?

# Un mare di numeri. Come non perdersi?

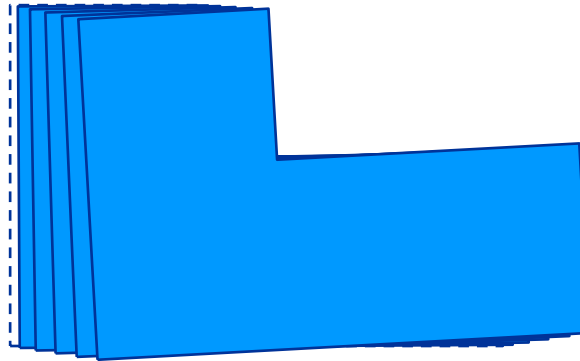
## Analisi modale

- Esaminare l'involuppo delle deformate modali, per le due direzioni del sisma
  - spostamenti analoghi nelle due direzioni o molto diversi?
  - solo traslazione, rotazione dell'impalcato modesta oppure forte?
- Esaminare il taglio nelle pareti
  - rispettano le previsioni o no?

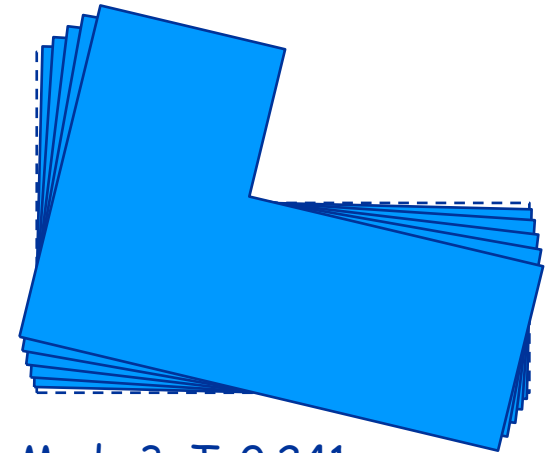
# Deformate modali



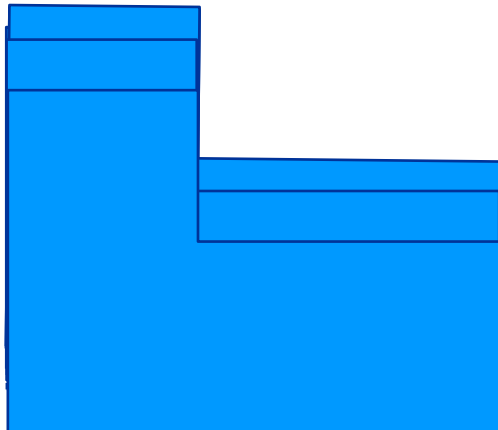
Modo 1,  $T=0.355$  s



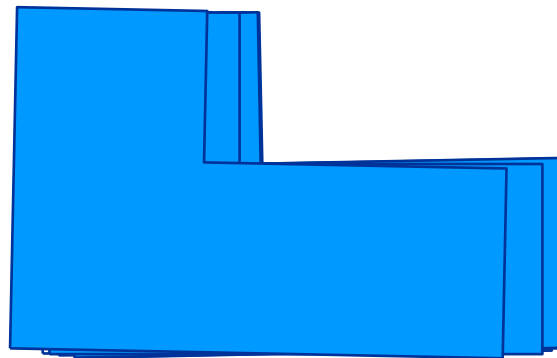
Modo 2,  $T=0.318$  s



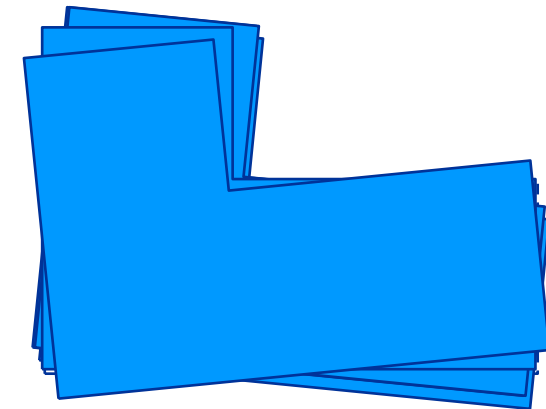
Modo 3,  $T=0.241$  s



Modo 4,  $T=0.079$  s

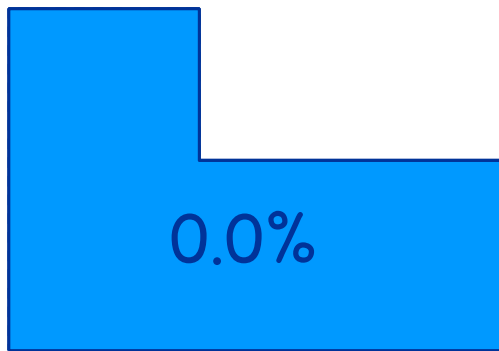


Modo 5,  $T=0.071$  s

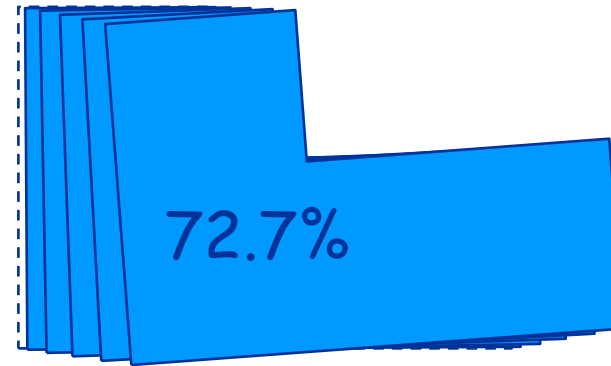


Modo 6,  $T=0.051$  s

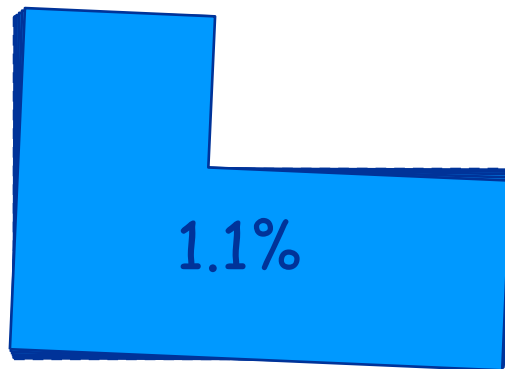
# Masse partecipanti, sisma x



Modo 1  $T=0.355\text{ s}$



Modo 2  $T=0.318\text{ s}$

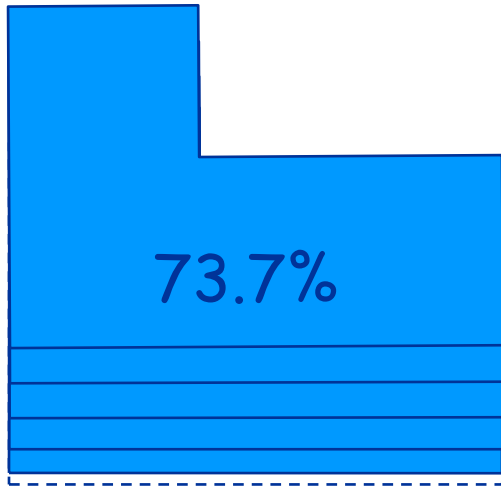


Modo 3  $T=0.241\text{ s}$

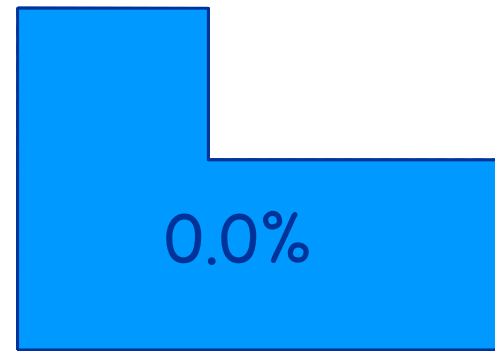
Il modo 2 è prevalente di traslazione secondo x

C'è un modesto accoppiamento tra i modi 2 e 3 (traslazione secondo x e rotazione)

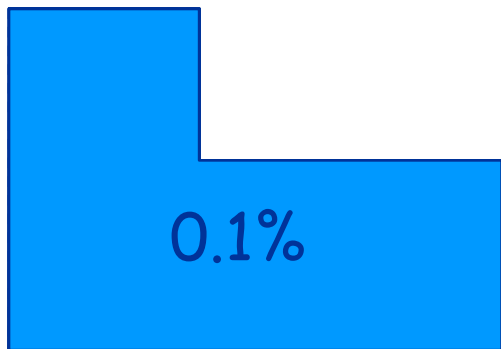
## Masse partecipanti, sisma y



Modo 1  $T=0.355\text{ s}$



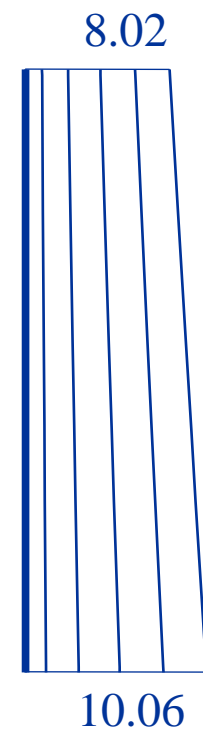
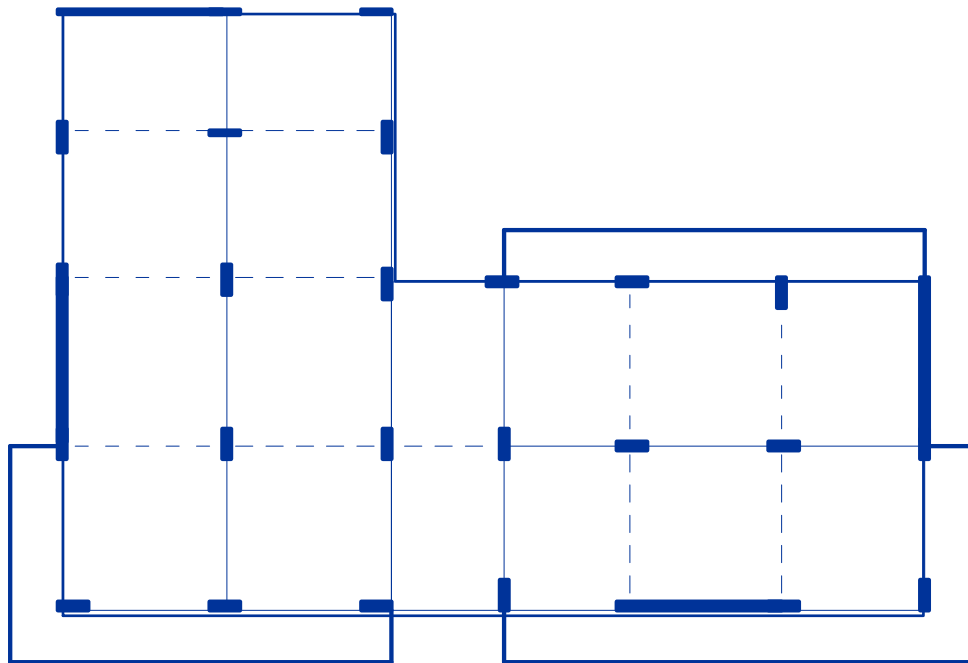
Modo 2  $T=0.318\text{ s}$



Modo 3  $T=0.241\text{ s}$

Il modo 1 di traslazione secondo y è del tutto disaccoppiato dagli altri due

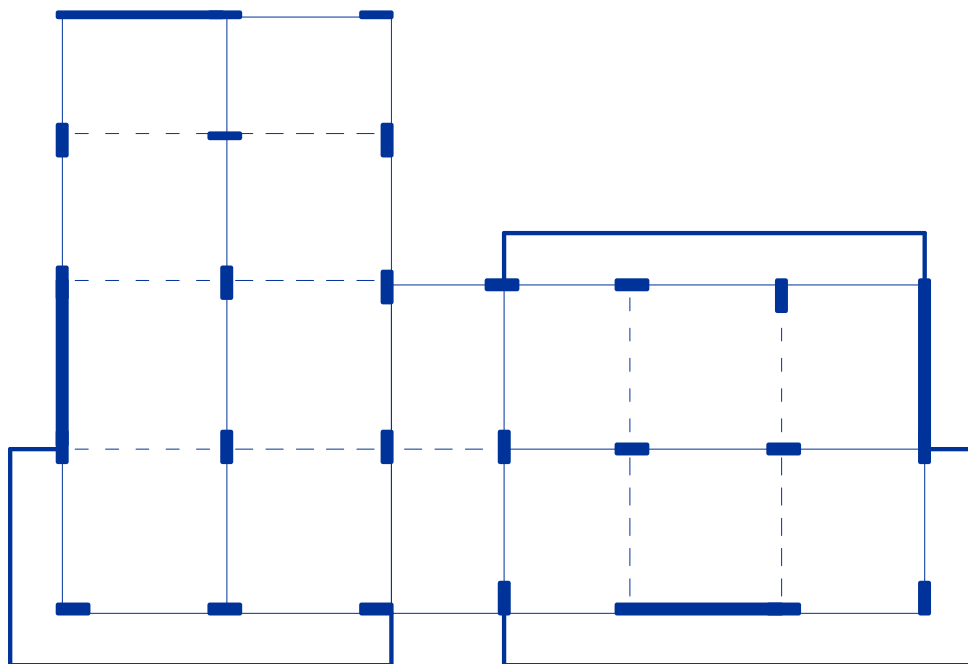
# Inviluppo modale sisma x



# Inviluppo modale sisma y

11.10

12.57



0.65

0.54



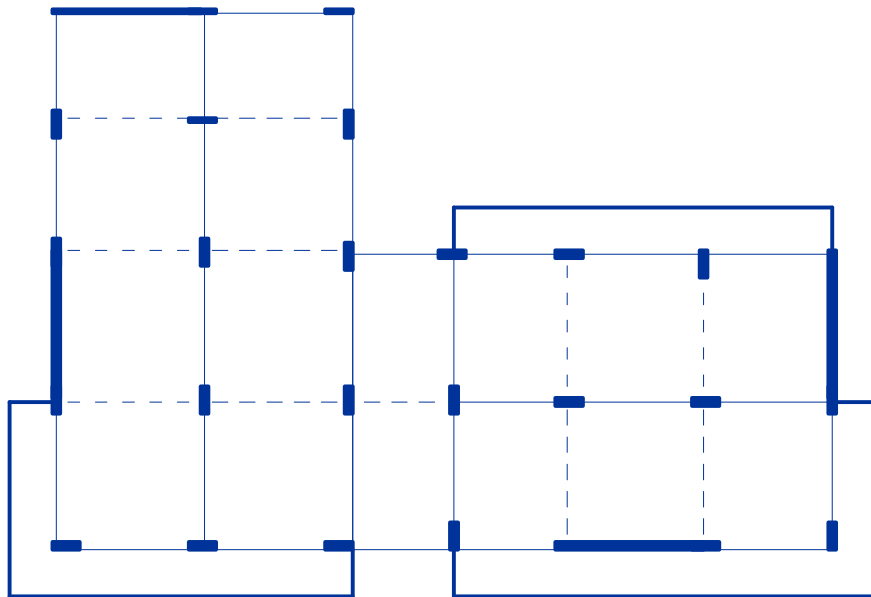


# Spostamenti, inviluppo modale

Spostamenti  
per sisma y

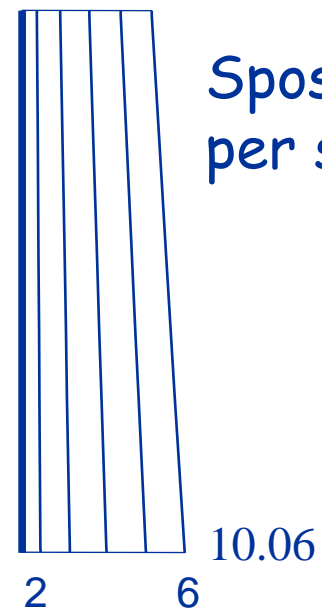
11.10

12.57



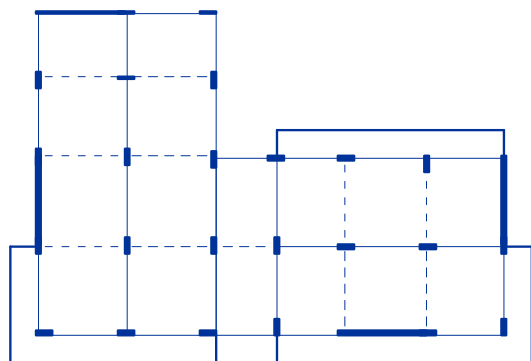
8.02

Spostamenti  
per sisma x



# Spostamenti, inviluppo modale

Spostamenti per sisma y  
uniformi  
(vicini a quelli del modo 2)



gli spostamenti massimi per  
sisma y sono maggiori di  
circa il 20% rispetto a  
quelli per sisma x

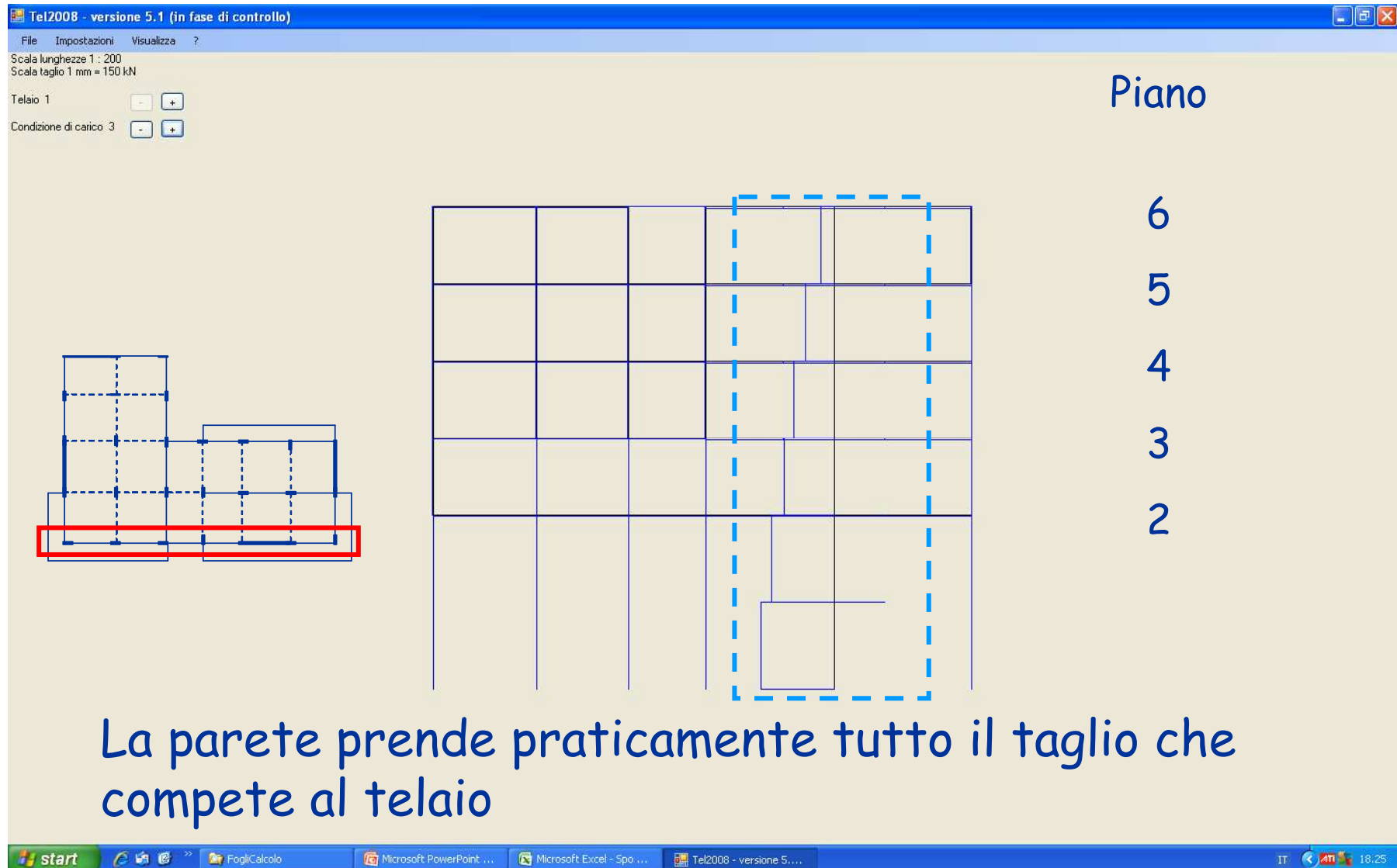
La direzione y andrebbe  
irrigidita



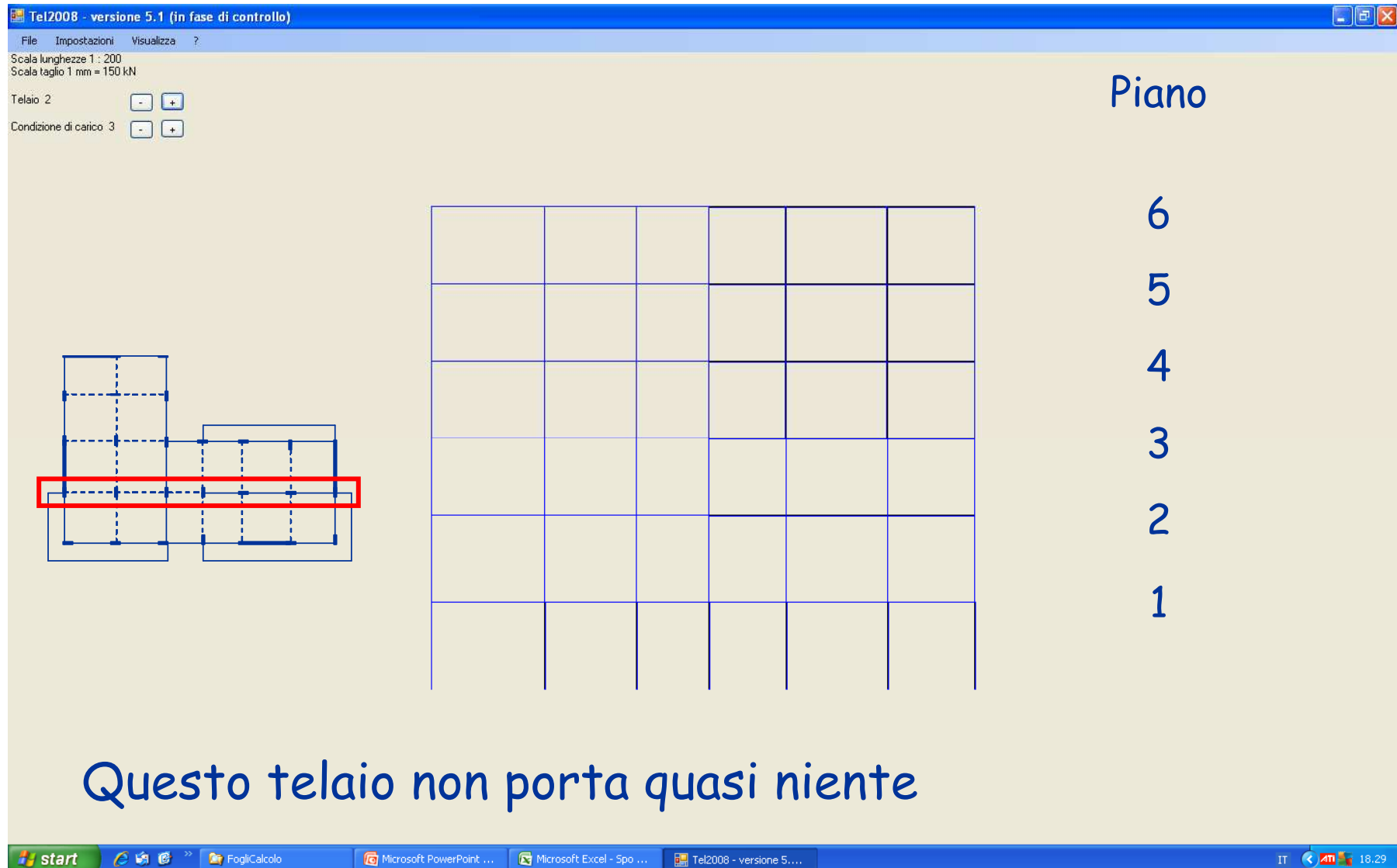
La parte inferiore  
andrebbe irrigidita

Piccola rotazione per  
sisma x (spostamenti  
dovuti ai modi 2 e 3)

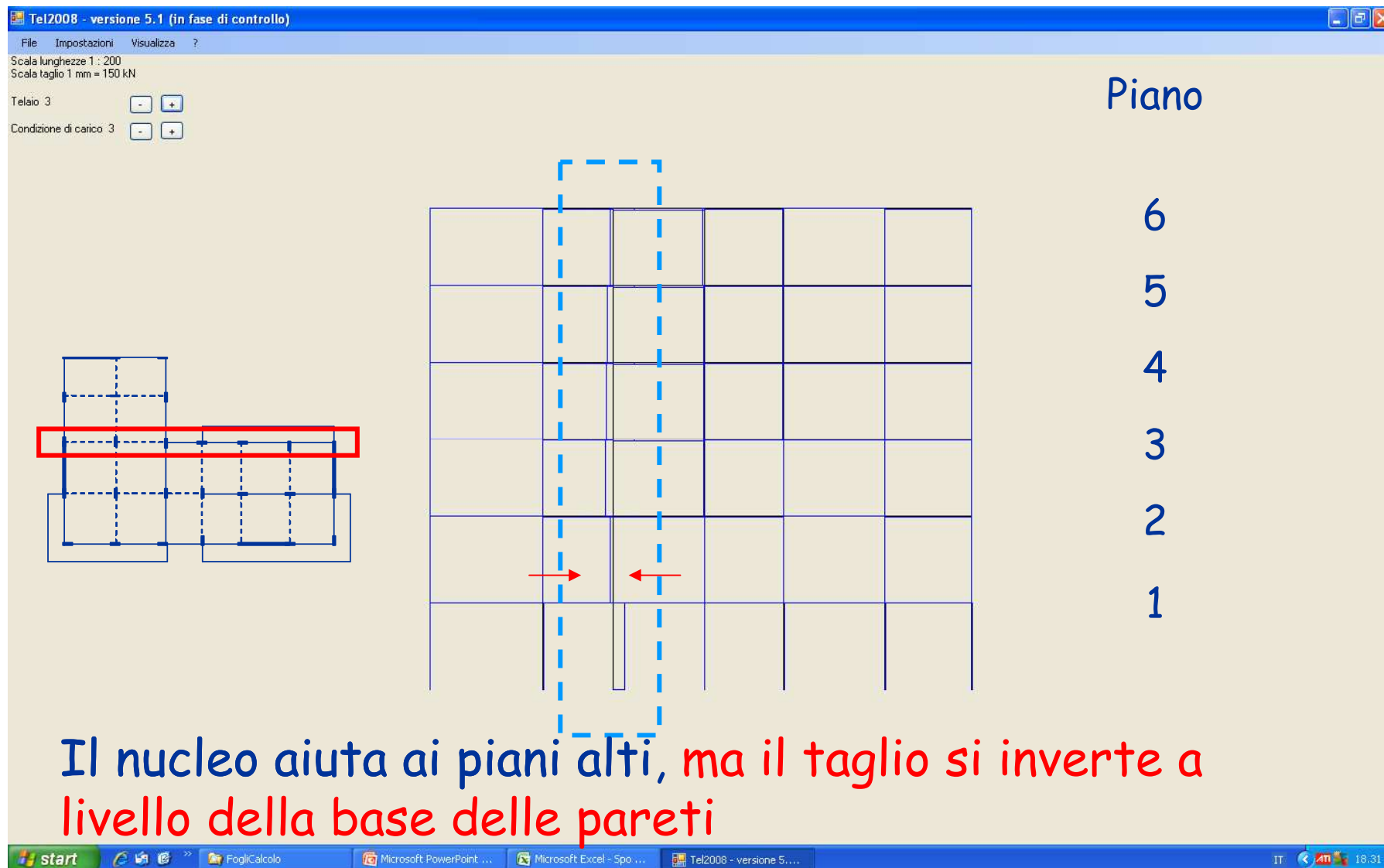
# Taglio per forze in direzione x (telai in direzione x)



# Taglio per forze in direzione x (telai in direzione x)

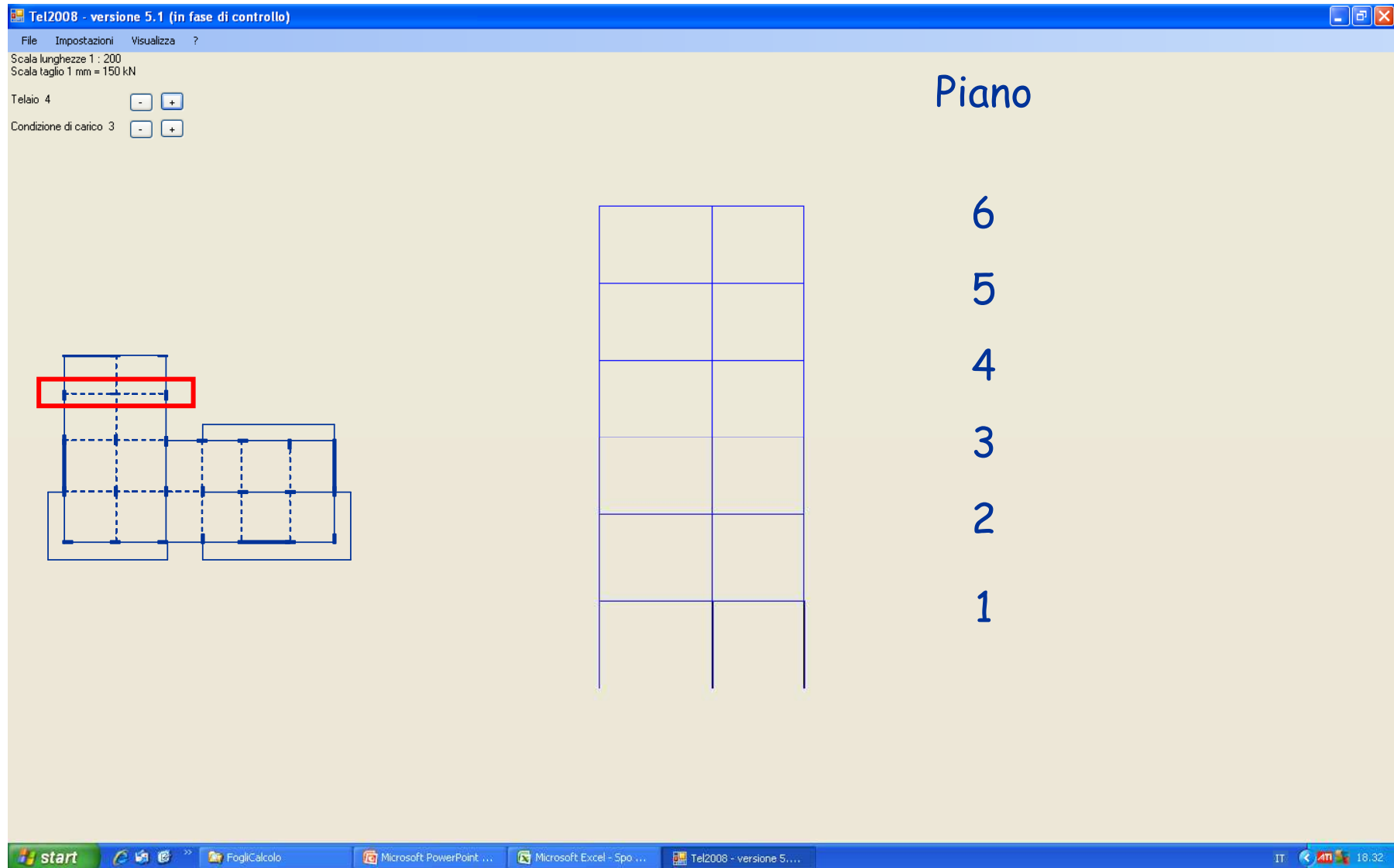


# Taglio per forze in direzione x (telai in direzione x)

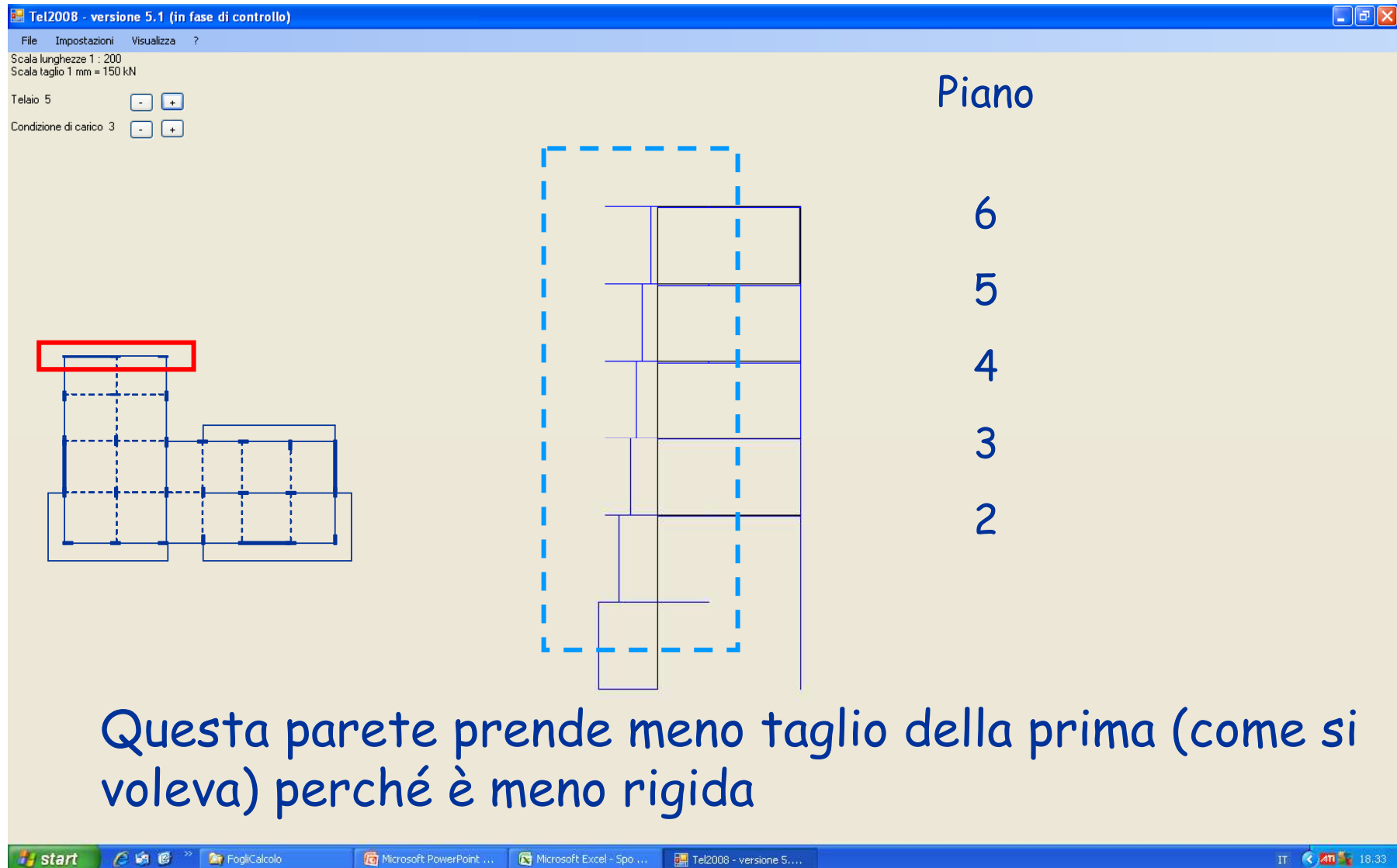


# Taglio per forze in direzione x

## (telai in direzione x)



# Taglio per forze in direzione x (telai in direzione x)



# Taglio pareti per forze in direzione x senza incremento per rotazione

Parete 1 allungata in questa direzione

Piano	Taglio previsto (kN)	Taglio effettivo (kN)
6	838.0	425.0
5	1540.1	904.9
4	2072.0	1256.2
3	2433.7	1549.7
2	2625.2	1944.7

-6%

Nota: la valutazione la massa stimata era maggiore di circa il 6%

I valori previsti  
sovrastimano ovunque  
quelli forniti dall'analisi

Alla base la differenza  
percentuale è  
relativamente modesta  
(circa del 25%)



# Taglio pareti per forze in direzione x senza incremento per rotazione

Parete 1 allungata in questa direzione

Piano	Taglio previsto (kN)	Taglio effettivo (kN)
6	787.7	425.0
5	1447.7	904.9
4	1947.7	1256.2
3	2287.7	1549.7
2	2467.7	1944.7

-6%

I valori previsti  
sovrastimano ovunque  
quelli forniti dall'analisi

Alla base la differenza  
percentuale è  
relativamente modesta  
(circa del 25%)

La sovrastima si riduce al  
20%

# Taglio pareti per forze in direzione y senza incremento per rotazione

Parete 1 allungata in questa direzione

Piano	Taglio previsto (kN)	Taglio effettivo (kN)
6	704.4	239.85
5	1294.6	583.03
4	1741.8	833.51
3	2045.8	1064.27
2	2206.8	1592.25

-6%

Nota: la valutazione la massa stimata era maggiore di circa il 6%

I valori previsti  
sovrastimano ovunque  
quelli forniti dall'analisi

Alla base la differenza  
percentuale è  
relativamente modesta  
(poco più del 25%)

# Taglio pareti per forze in direzione y senza incremento per rotazione

Parete 1 allungata in questa direzione

Piano	Taglio previsto (kN)	Taglio effettivo (kN)
6	662.1	239.85
5	1216.9	583.03
4	1637.3	833.51
3	1923.1	1064.27
2	2074.4	1592.25

I valori previsti  
sovrastimano ovunque  
quelli forniti dall'analisi

Alla base la differenza  
percentuale è  
relativamente modesta  
(poco più del 25%)

La sovrastima si riduce a  
poco più del 20%

# Modellazione delle azioni

1. Occorre tener conto delle incertezze relative alla effettiva posizione del centro di massa (i carichi variabili possono essere distribuiti in maniera non uniforme)
  - eccentricità accidentale
2. Occorre tener conto dell'effetto contemporaneo delle diverse componenti dell'azione sismica
  - criteri di combinazione delle componenti

Queste regole sostanzialmente portano un incremento di sollecitazione nei telai più esterni

Eccentricità accidentale

# Eccentricità accidentale

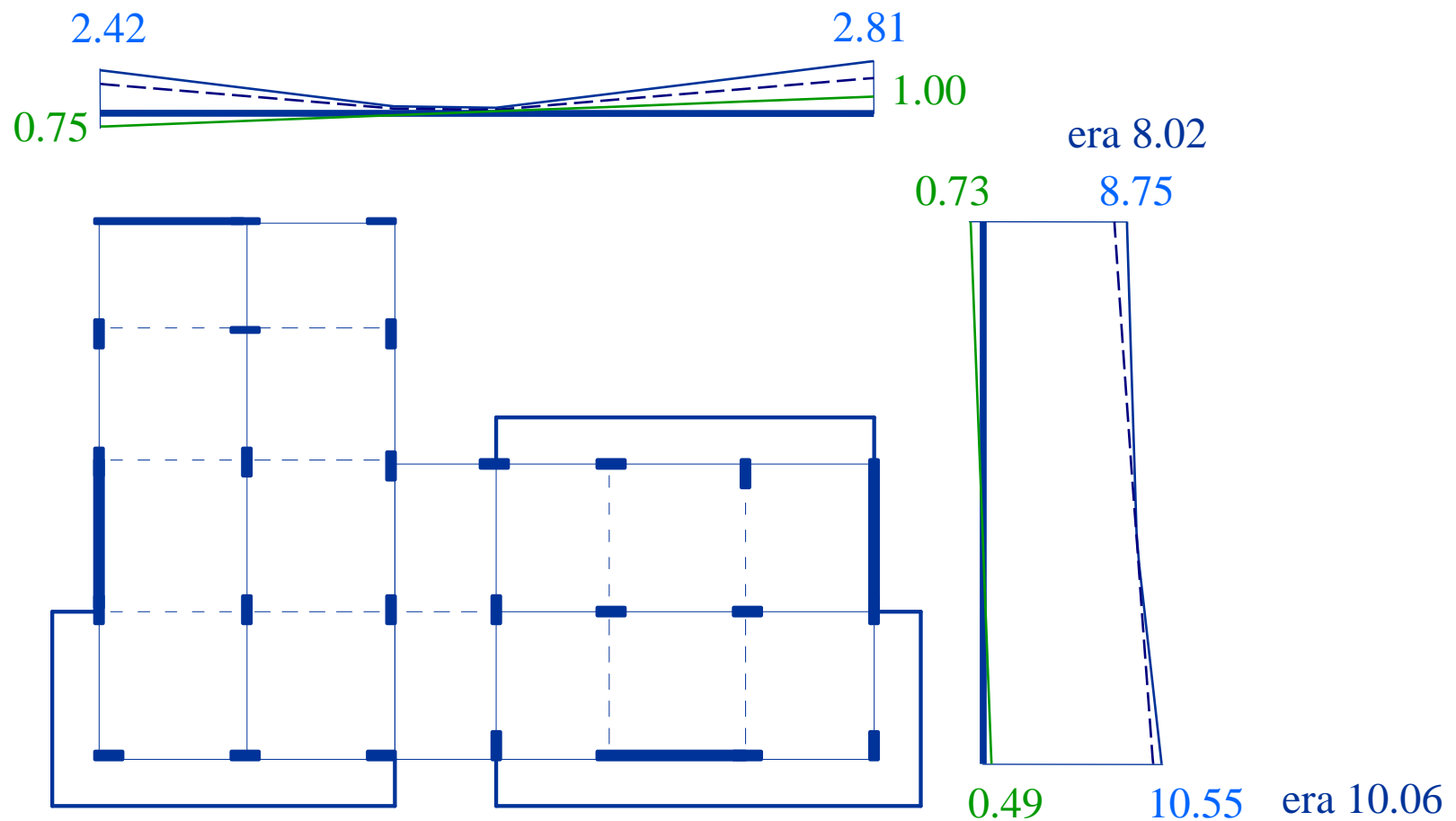
## Esame dei risultati

Esaminare per ciascuna delle due direzioni  
gli spostamenti prodotti dalle coppie e confrontarli con  
quelli prodotti dalle forze

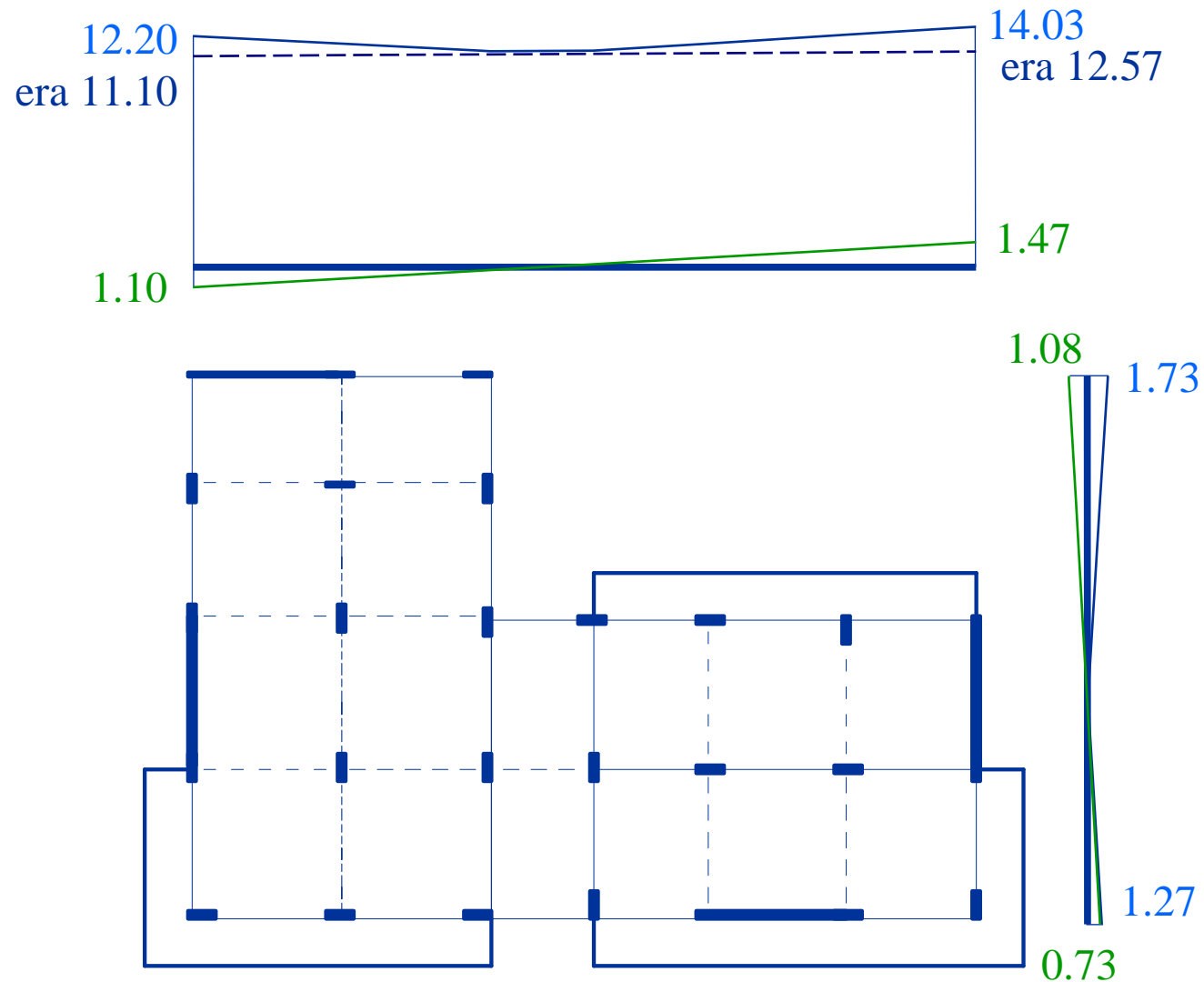
Fornisce informazioni su:

- rigidezza torsionale
- Affidabilità del predimensionamento

# Spostamenti per forze e coppie direzione x (analisi modale)



# Spostamenti per forze e coppie direzione y (analisi modale)





## Spostamenti per forze e coppie considerazioni

- L'incremento va dal 5% (inf) al 10% (sup) nel caso di azioni in direzione x
- L'incremento è del 10% (sin e des) nel caso di azioni in direzione y

Incrementi di spostamento così contenuti sono indice di una struttura dotata di una buona rigidezza torsionale

Nota. Per la struttura intelaiata il massimo incremento era circa il 20%

Combinazione delle azioni  
nelle due direzioni

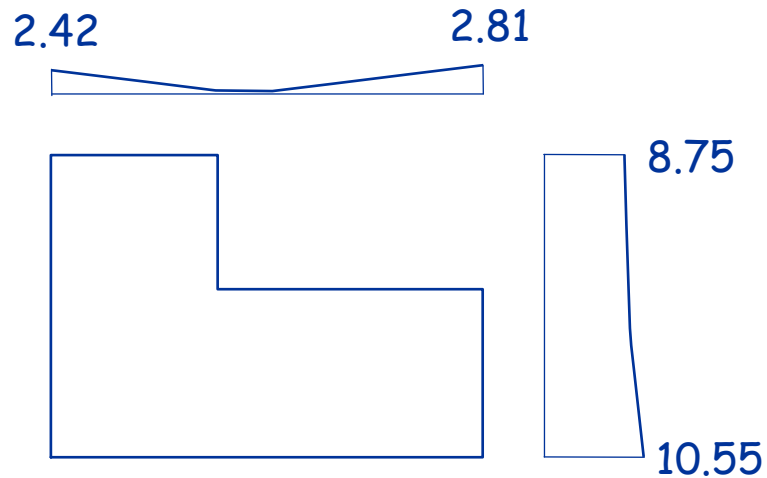
# Le componenti orizzontali

“I valori massimi della risposta ottenuti da ciascuna delle due azioni orizzontali applicate separatamente potranno essere combinati sommando, ai massimi ottenuti per l'azione applicata in una direzione, il 30% dei massimi ottenuti per l'azione applicata nell'altra direzione”

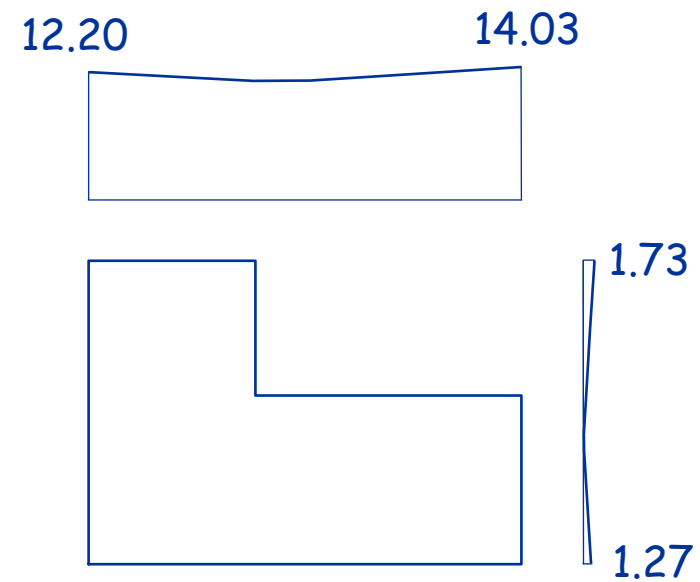
In che modo capire quanta importanza ha questa combinazione?

Ragioniamo ancora esaminando gli spostamenti

# Effetto complessivo del sisma separatamente nelle due direzioni

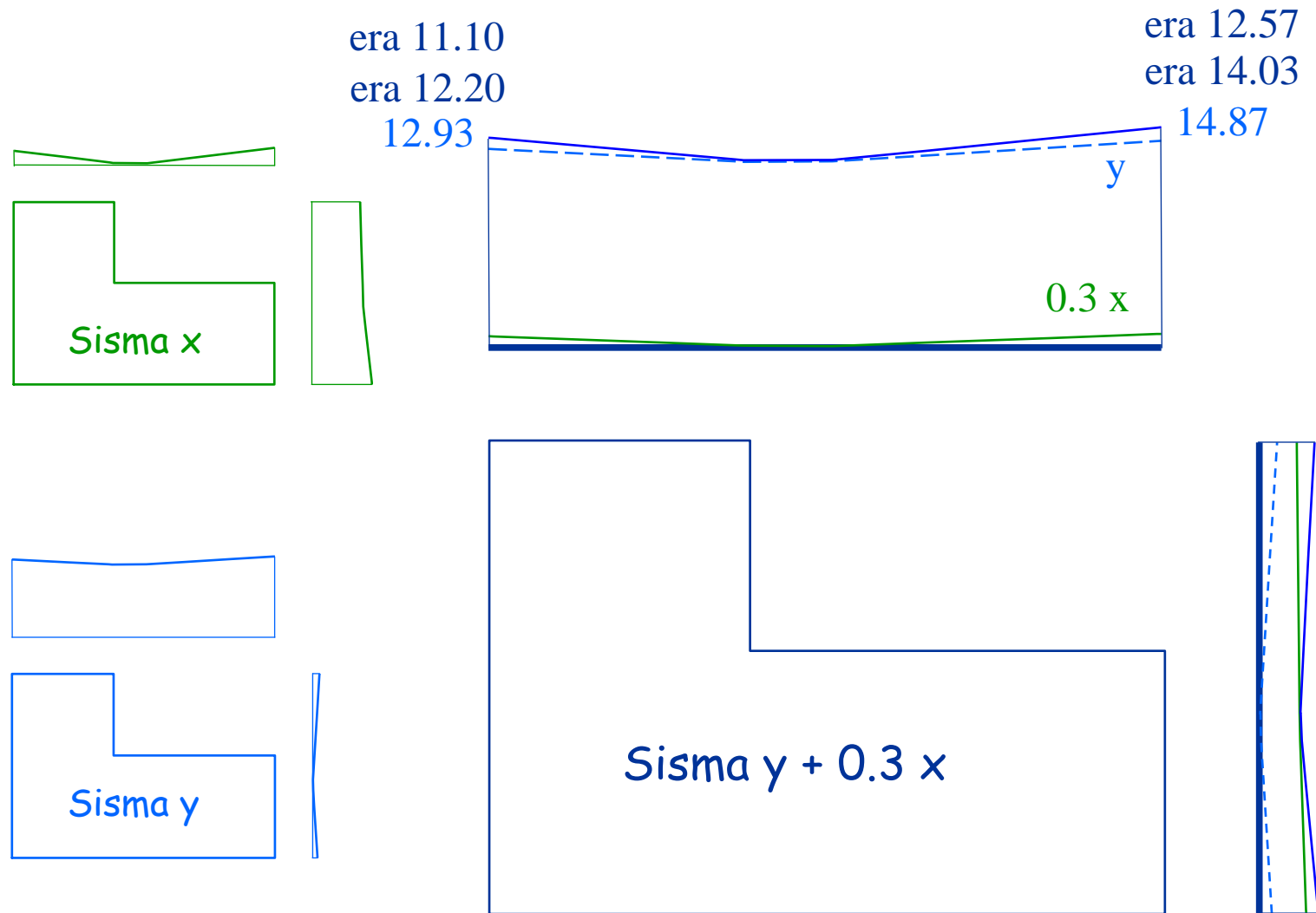


Sisma in  
direzione x

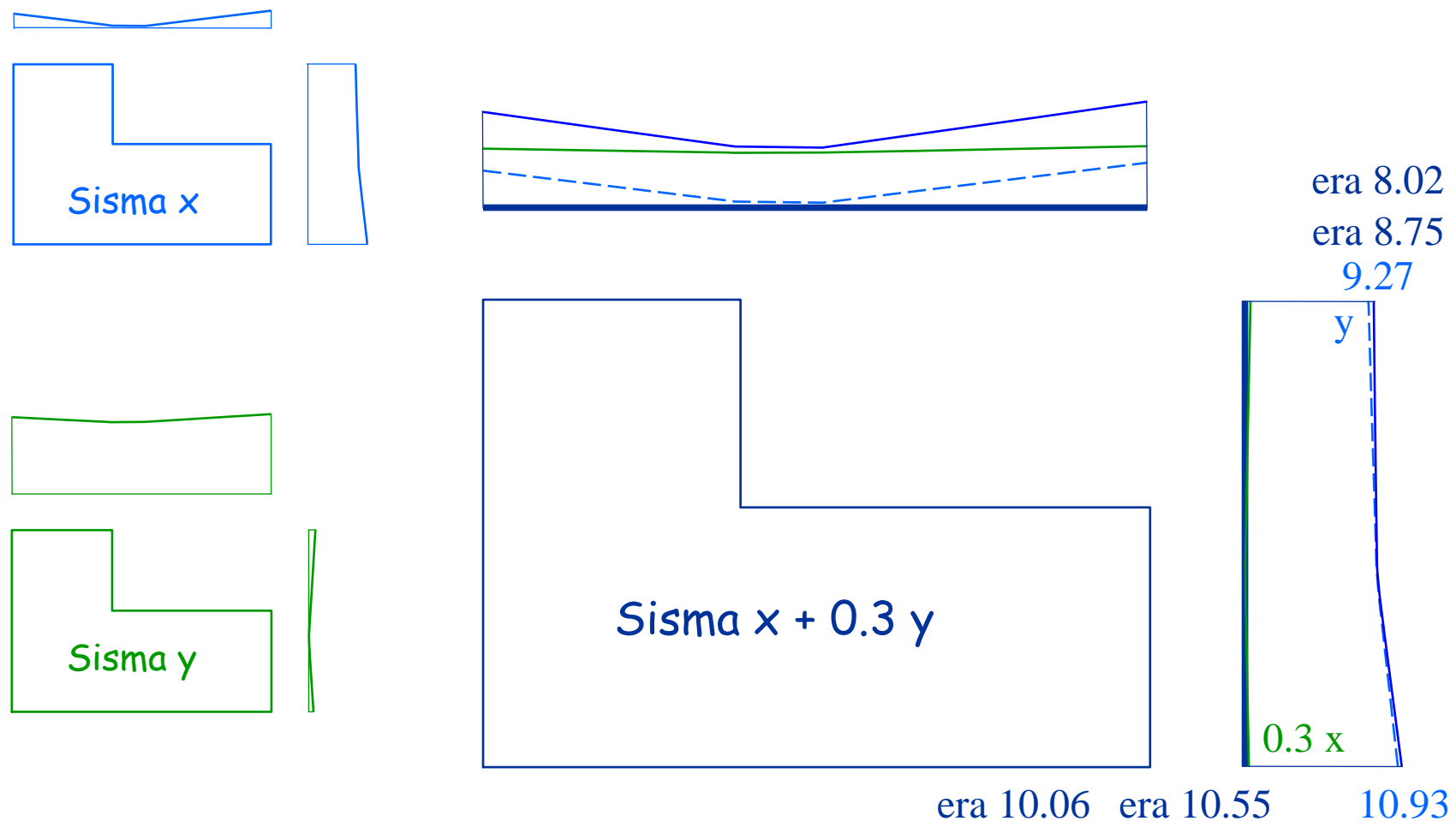


Sisma in  
direzione y

# Inviluppo: sisma y + 0.3 sisma x analisi modale



# Inviluppo: $\text{sisma } x + 0.3 \text{ sisma } y$ analisi modale



Commenti

# Effetto complessivo

di eccentricità accidentale e combinazione x-y

Pareti (vale anche per le travi):

- le pareti centrali (nucleo ascensore) ne risentono in misura minima
- le pareti di estremità hanno, rispetto allo schema con sole forze, un incremento sensibile di caratteristiche di sollecitazione, ma sempre inferiore al 15% nel caso in esame

Nota. Per le travi della struttura intelaiata era il 30% e più



# Effetto complessivo

di eccentricità accidentale e combinazione  $x$   $y$

Pilastri:

- i pilastri nella parte centrale dell'edificio non hanno variazioni rilevanti delle caratteristiche di sollecitazione massima, ma devono essere verificati a pressoflessione deviata con momenti trasversali pari a circa il 30% del massimo
- i pilastri perimetrali hanno un incremento di caratteristiche di sollecitazione fino a circa il 15%, ed inoltre devono essere verificati a pressoflessione deviata con momenti trasversali fino a circa il 40% del massimo

Nota. Per i pilastri della struttura intelaiata arrivava al 60%

# Giudizio complessivo

prima di passare ad una verifica dettagliata

Rispetto alla stima iniziale, fatta in fase di dimensionamento:

- la previsione dell'effetto di forze statiche era abbastanza corretta; la sovrastima delle sollecitazioni è dovuta:
  - sopravvalutazione della massa
  - aver trascurato i telai
  - uso dell'analisi modale anziché l'analisi statica
- l'effetto dell'eccentricità accidentale e la contemporanea presenza delle due componenti del sisma è appena più gravosa del previsto

# Il dimensionamento iniziale è accettabile?

Probabilmente sì,  
la sovrastima delle forze (del 25%) compensa ampiamente la leggera sottostima degli effetti di eccentricità accidentale e azione contemporanea delle due componenti del sisma (15% anziché 10%)

Se la risposta fosse stata negativa, si doveva ritornare al dimensionamento, per correggere le carenze evidenziate

Stato limite di danno

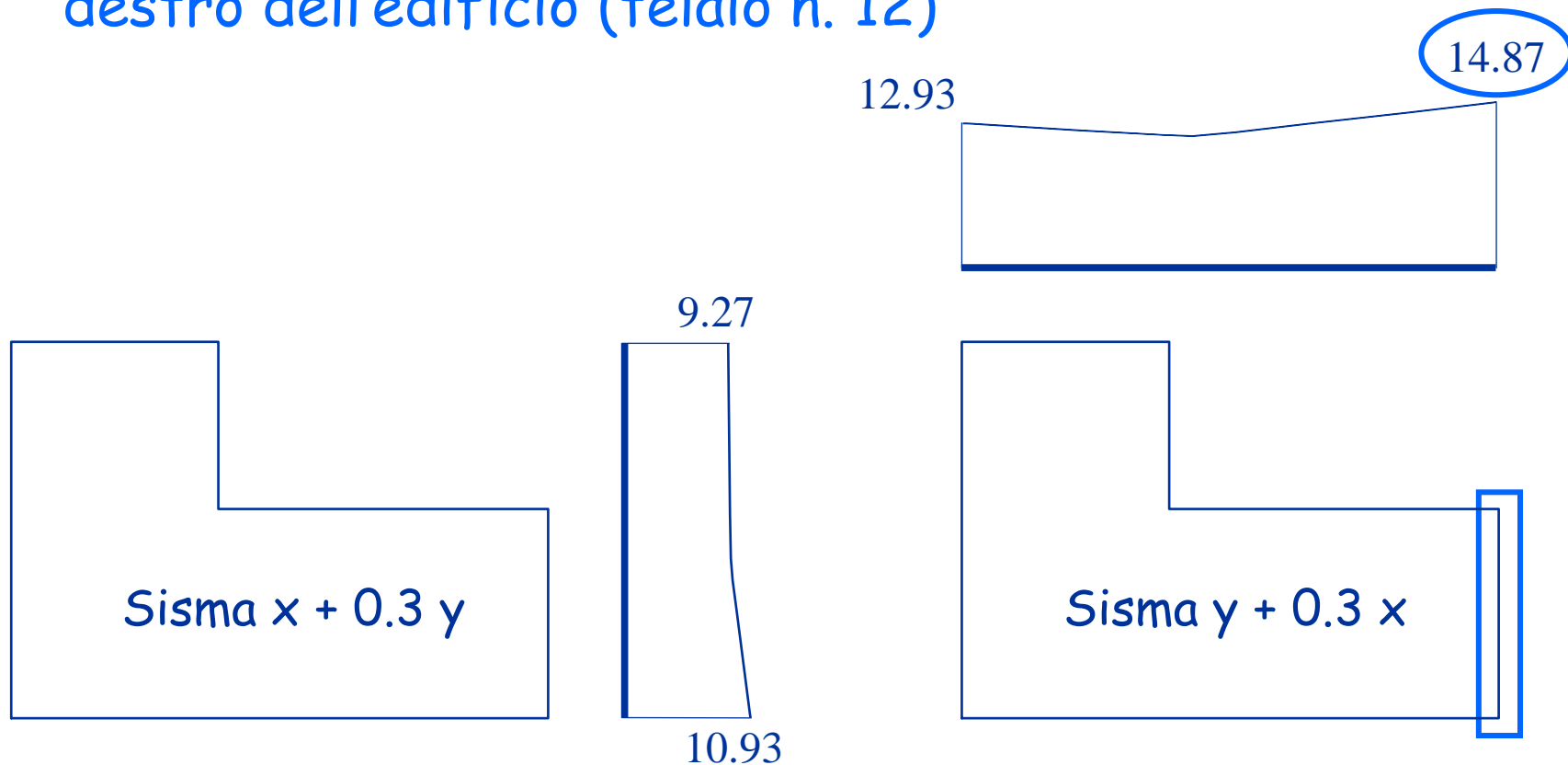
# Stato limite di danno

Prima di passare alla definizione delle armature, è opportuno controllare gli spostamenti per lo stato limite di danno

Occorrerebbe ripetere tutto il calcolo, usando gli spettri relativi allo SLD, ma può essere più semplice valutare gli spostamenti a partire da quelli per lo SLV, tenendo conto della differenza di ordinata dei relativi spettri

# Spostamenti

L'edificio è più flessibile in direzione y ed il telaio che subisce i massimi spostamenti è quello sul lato destro dell'edificio (telaio n. 12)



# Spostamento d'interpiano per SLV telaio n. 12

Il massimo spostamento d'interpiano si riscontra al  
quinto piano

Piano	Fx	Fy	M(Fx)	M(Fy)	SismaX	SismaY	Y+0.3X
6	0.438	3.053	0.246	0.362	0.684	3.415	3.620
5	0.443	3.076	0.245	0.36	0.688	3.436	3.642
4	0.41	2.851	0.224	0.329	0.634	3.180	3.370
3	0.325	2.269	0.175	0.257	0.500	2.526	2.676
2	0.185	1.309	0.094	0.138	0.279	1.447	1.531

$$\text{SismaX} = Fx + M(Fx)$$

$$\text{SismaY} = Fy + M(Fy)$$

$$\text{Sisma} = \text{SismaY} + 0.3 \text{ SismaX}$$

# Spettri per SLU e SLD

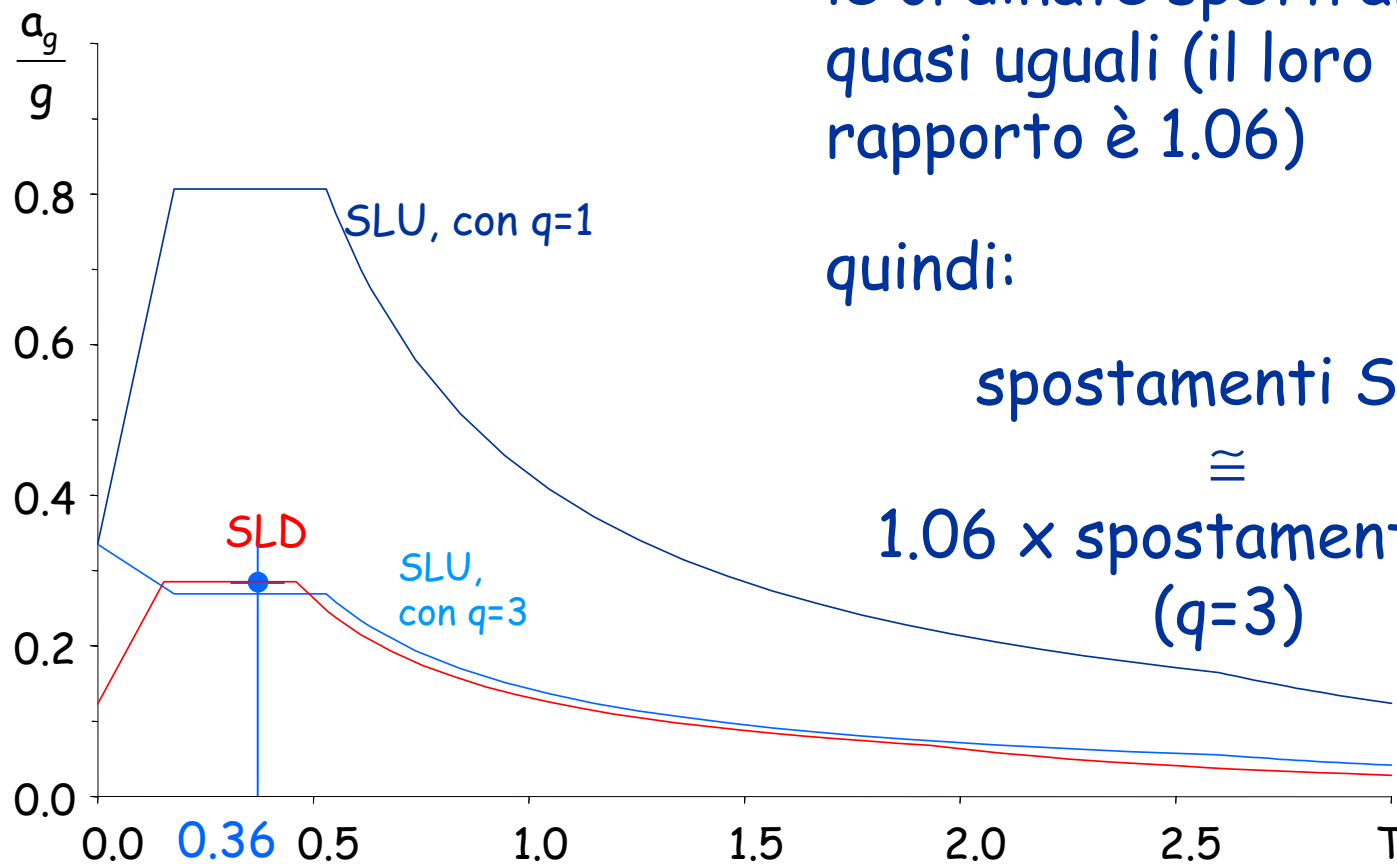
nel caso in esame, per un periodo pari a circa 0.36 s le ordinate spettrali sono quasi uguali (il loro rapporto è 1.06)

quindi:

spostamenti SLD

$\cong$

1.06 x spostamenti SLU  
(q=3)





# Verifica spostamenti per SLD

Spostamento relativo accettabile:  $0.005 h$

Nel caso in esame:  $0.005 \times 3200 = 16 \text{ mm}$

Spostamento relativo massimo,  
fornito dall'analisi:  $1.06 \times 3.6 = 3.9 \text{ mm}$   
(al penultimo piano)

La verifica è ampiamente soddisfatto

Per l'edificio con struttura intelaiata era:  
 $9.6 \text{ mm}$   
(tra II e I impalcato)