

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

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

8 - Risoluzione degli schemi base e giudizio sulla struttura

Spoletto  
3-4 febbraio 2011  
Edoardo M. Marino

# Processo progettuale

- ✓ 1. Concezione generale della struttura, nel rispetto di principi base di buona progettazione
- ✓ 2. Impostazione della carpenteria dell'edificio
- ✓ 3. Dimensionamento delle sezioni e verifica di massima della struttura
- in corso 4. Analisi strutturale dettagliata e verifica del comportamento della struttura
- 5. Definizione delle armature ed elaborati grafici

## 4. Analisi strutturale: fasi di lavoro

- ✓ 4.1. Definizione dei carichi unitari
- ✓ 4.2. Valutazione dei carichi sulle travi
- ✓ 4.3. Valutazione delle masse di piano
- ✓ 4.4. Valutazione delle forze orizzontali (nel caso di analisi statica)
- ✓ 4.5. Definizione del modello della struttura
- 4.6. Risoluzione degli schemi base

# Giudicare gli schemi base e le combinazioni di carico

Carichi verticali:

siamo già abituati ad esaminarli e giudicarli

Forze orizzontali:

- Valutare ipotesi su ripartizione taglio
- Comportamento ottenuto

Discutere poi:

- effetto dell'eccentricità accidentale
- combinazione delle azioni nelle due direzioni

# Un mare di numeri. Come non perdersi?

## Analisi modale

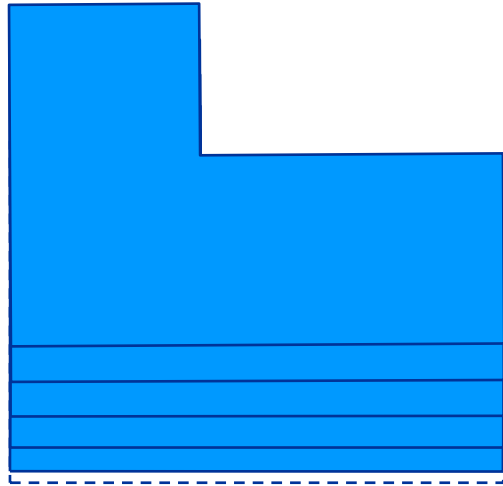
- Esaminare le deformate modali (indipendentemente dalla direzione del sisma)
  - sono disaccoppiate oppure accoppiate?
- Esaminare le masse partecipanti (per ciascuna direzione del sisma) per vedere quali modi danno maggior contributo
  - prevale un solo modo, o più di uno?
- Esaminare i periodi dei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

# Un mare di numeri. Come non perdersi?

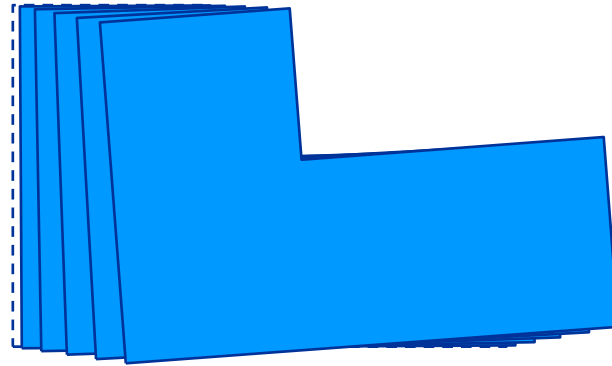
## Analisi modale

- 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?

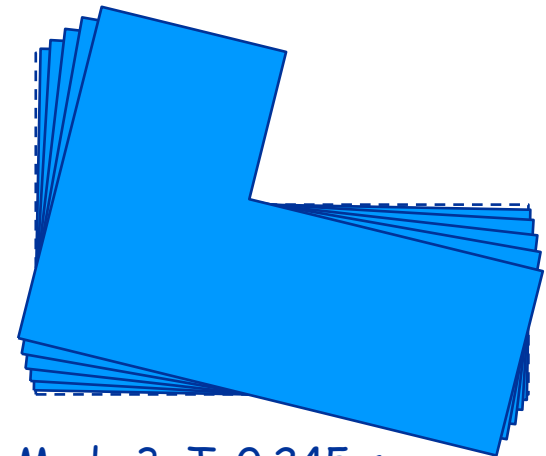
# Deformate modali



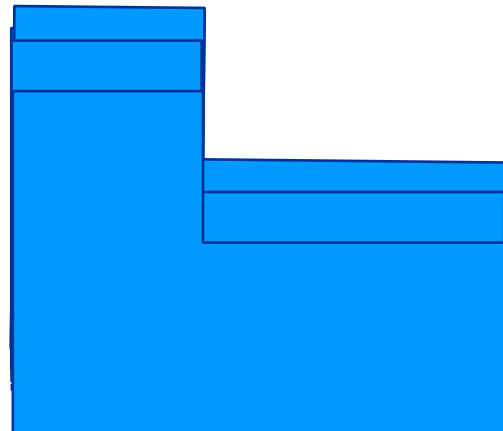
Modo 1,  $T=0.371$  s



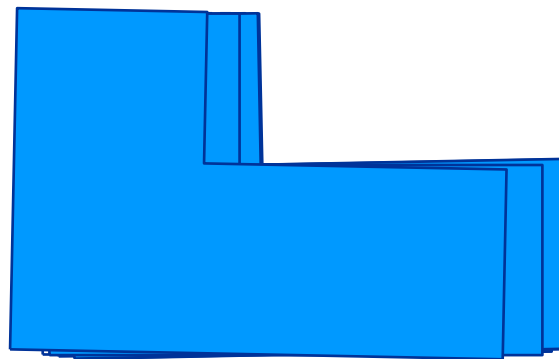
Modo 2,  $T=0.322$  s



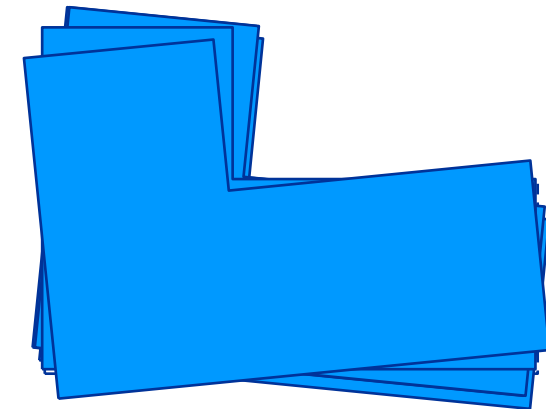
Modo 3,  $T=0.245$  s



Modo 4,  $T=0.067$  s

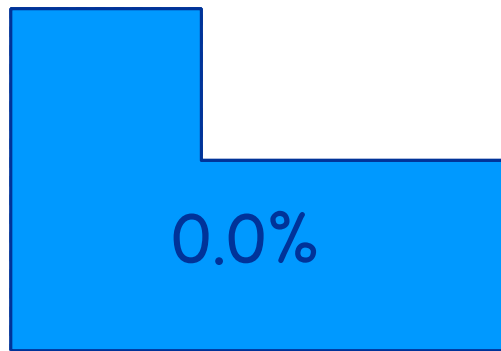


Modo 5,  $T=0.057$  s

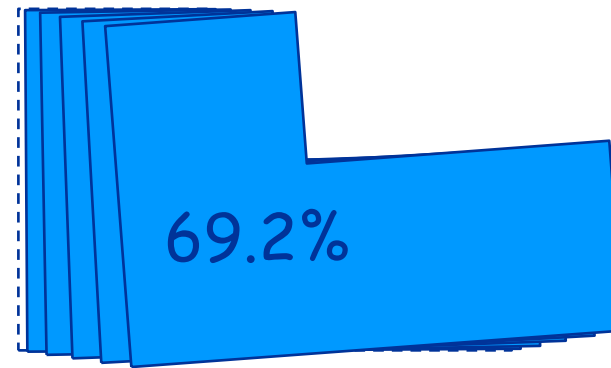


Modo 6,  $T=0.042$  s

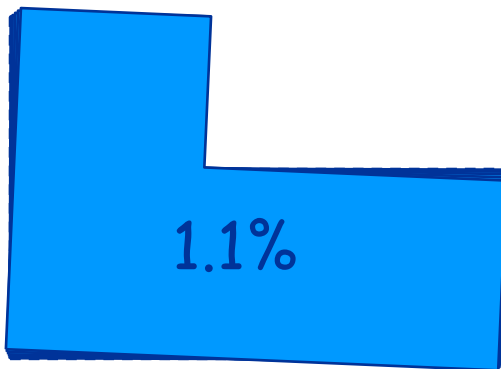
# Masse partecipanti, sisma x



Modo 1  $T=0.371\text{ s}$



Modo 2  $T=0.322\text{ s}$



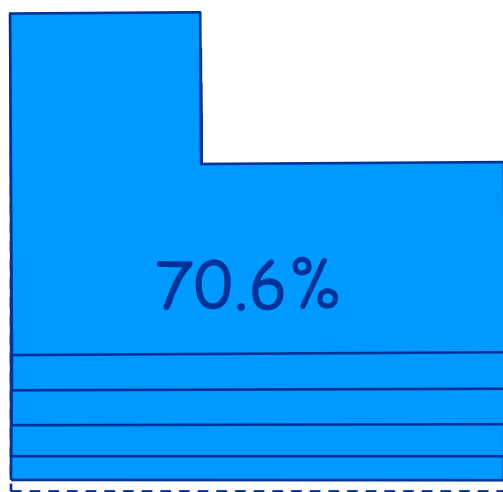
Modo 3  $T=0.245\text{ s}$

Il modo 2 è prevalente di traslazione secondo x

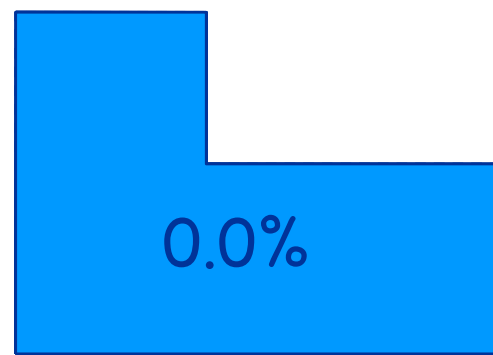
C'è un modesto accoppiamento tra i modi 2 e 3 (traslazione secondo x e rotazione)



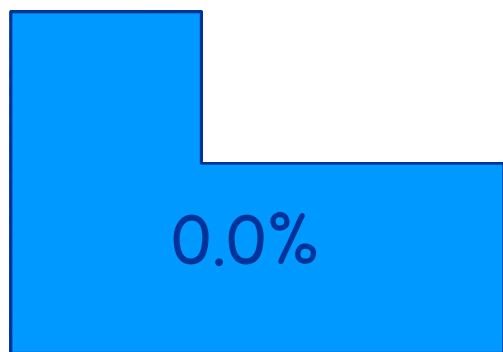
## Masse partecipanti, sisma y



Modo 1       $T=0.371 \text{ s}$



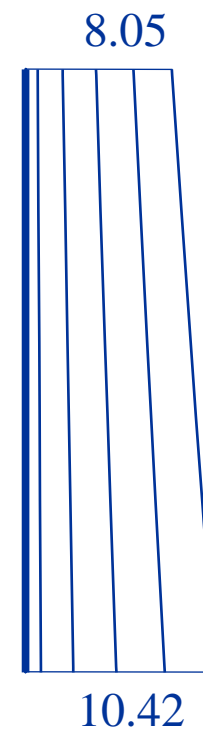
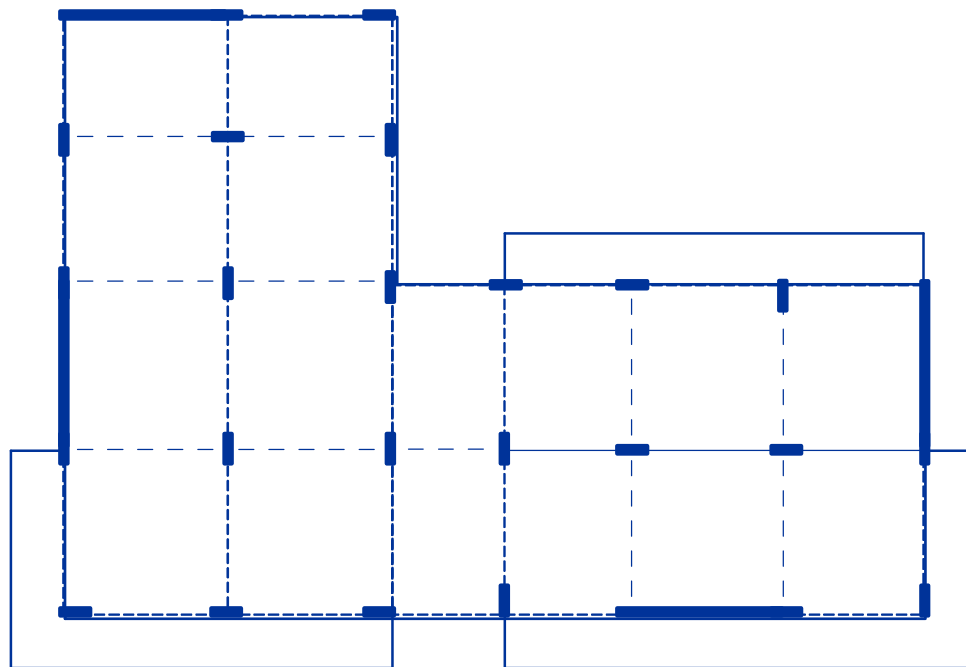
Modo 2       $T=0.322 \text{ s}$



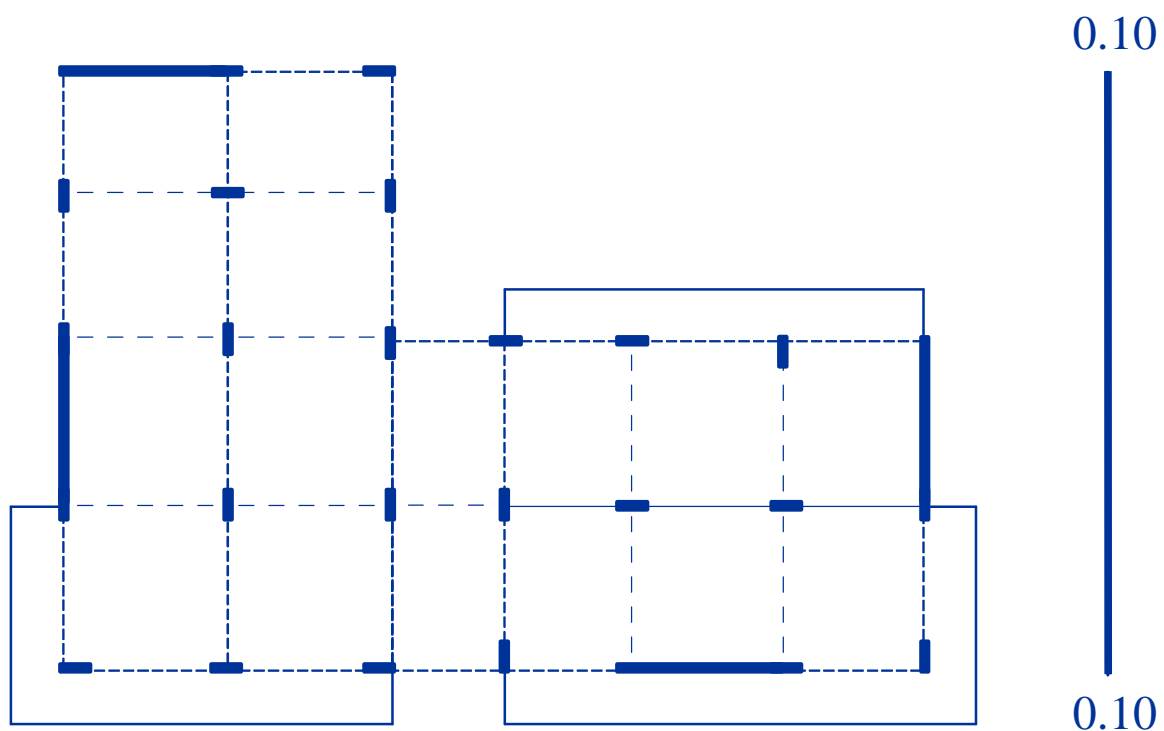
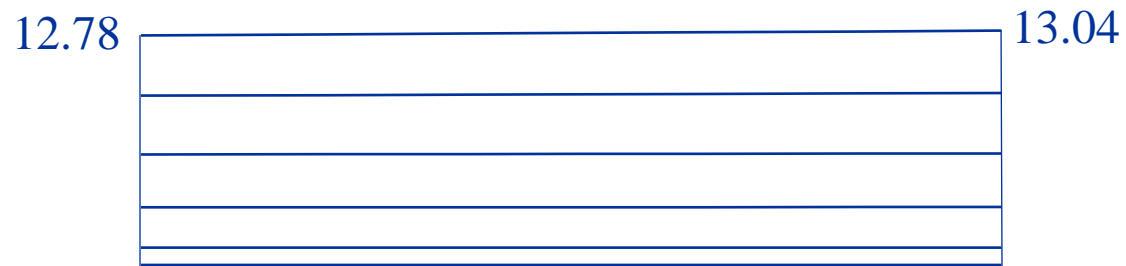
Modo 3       $T=0.245 \text{ s}$

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

# Inviluppo modale sisma x

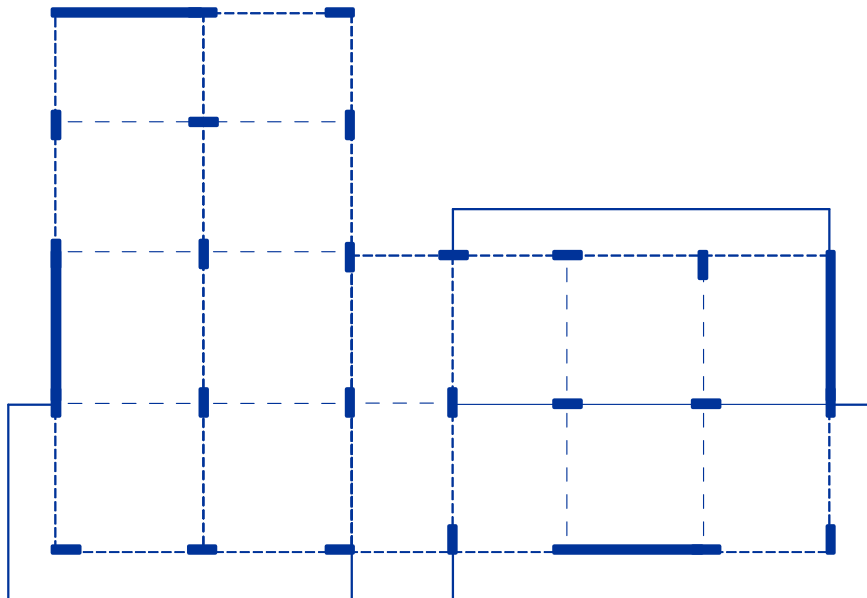
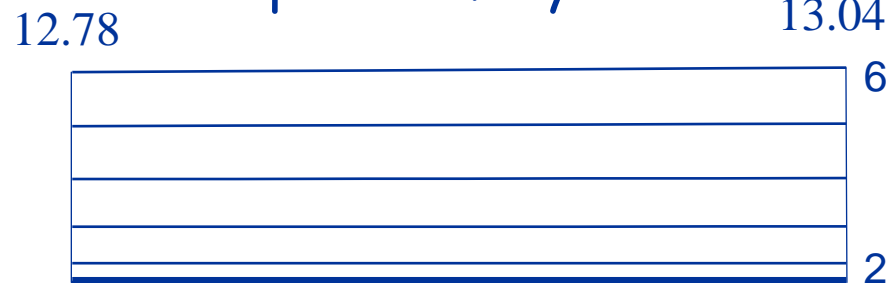


# Inviluppo modale sisma y



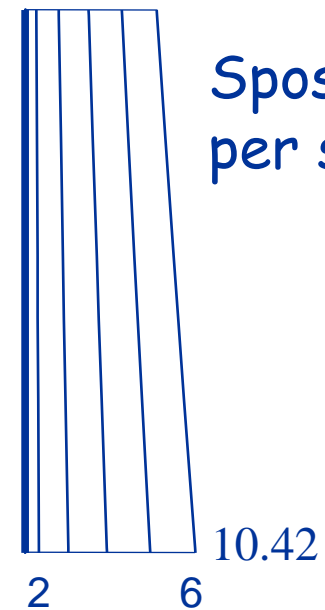
# Spostamenti, inviluppo modale

Spostamenti  
per sisma y



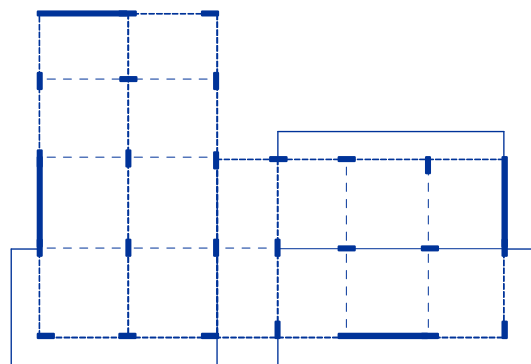
8.05

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 50% rispetto a  
quelli per sisma x

8.05

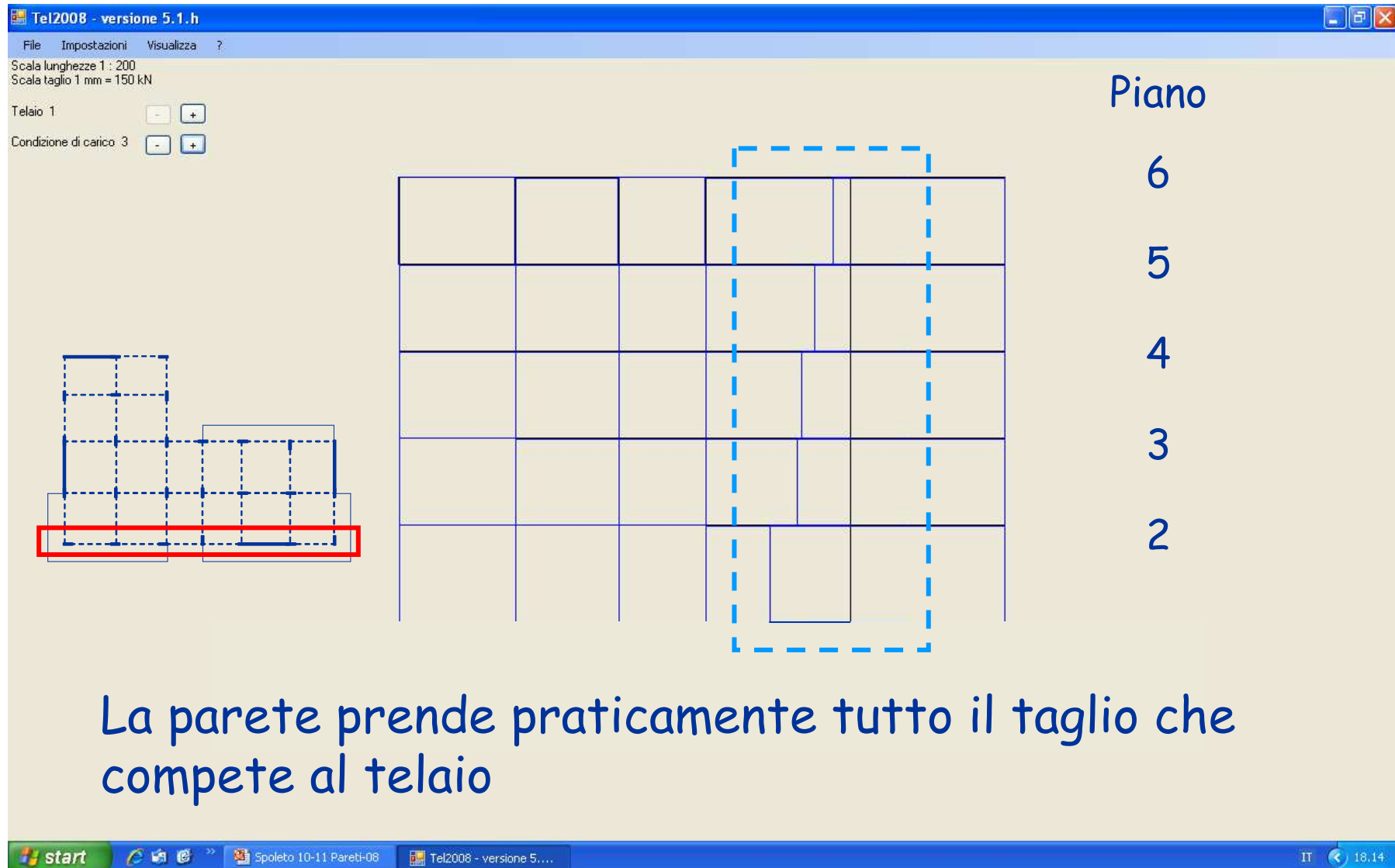


La parte superiore  
andrebbe irrigidita

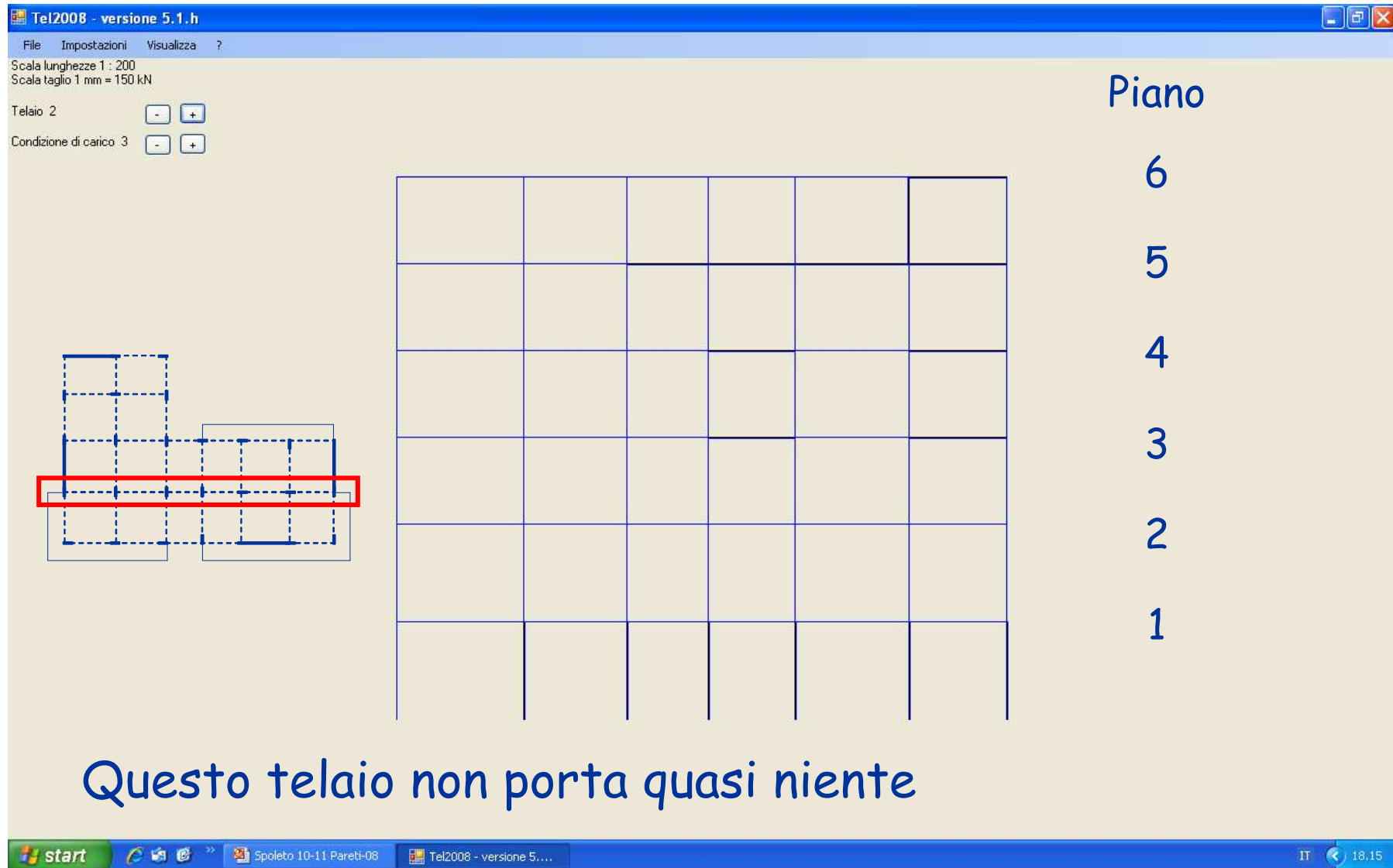


Piccola rotazione per  
sisma x (spostamenti  
dovuti ai modi 2 e 3)

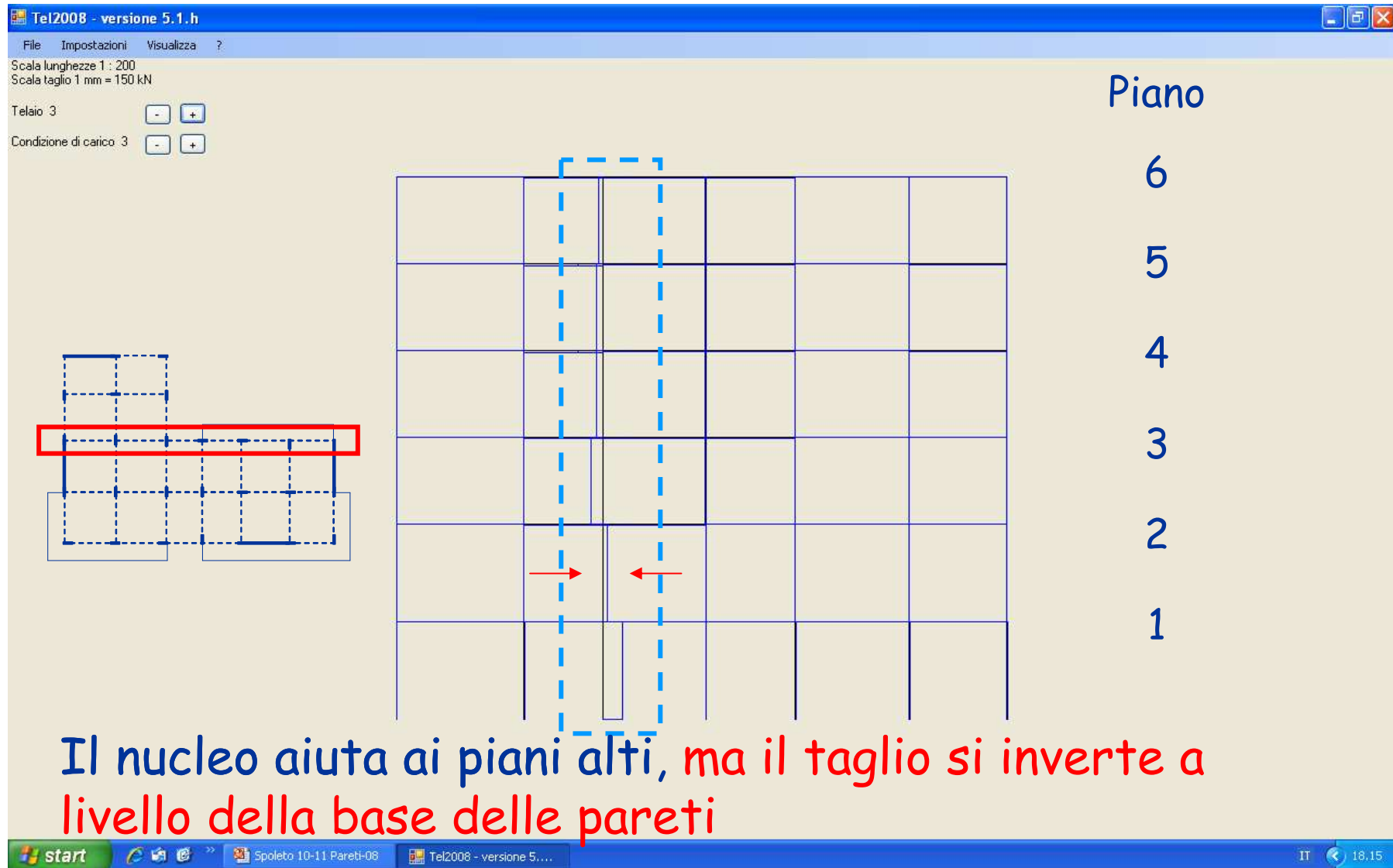
# Taglio per forze in direzione x (telai in direzione x)



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



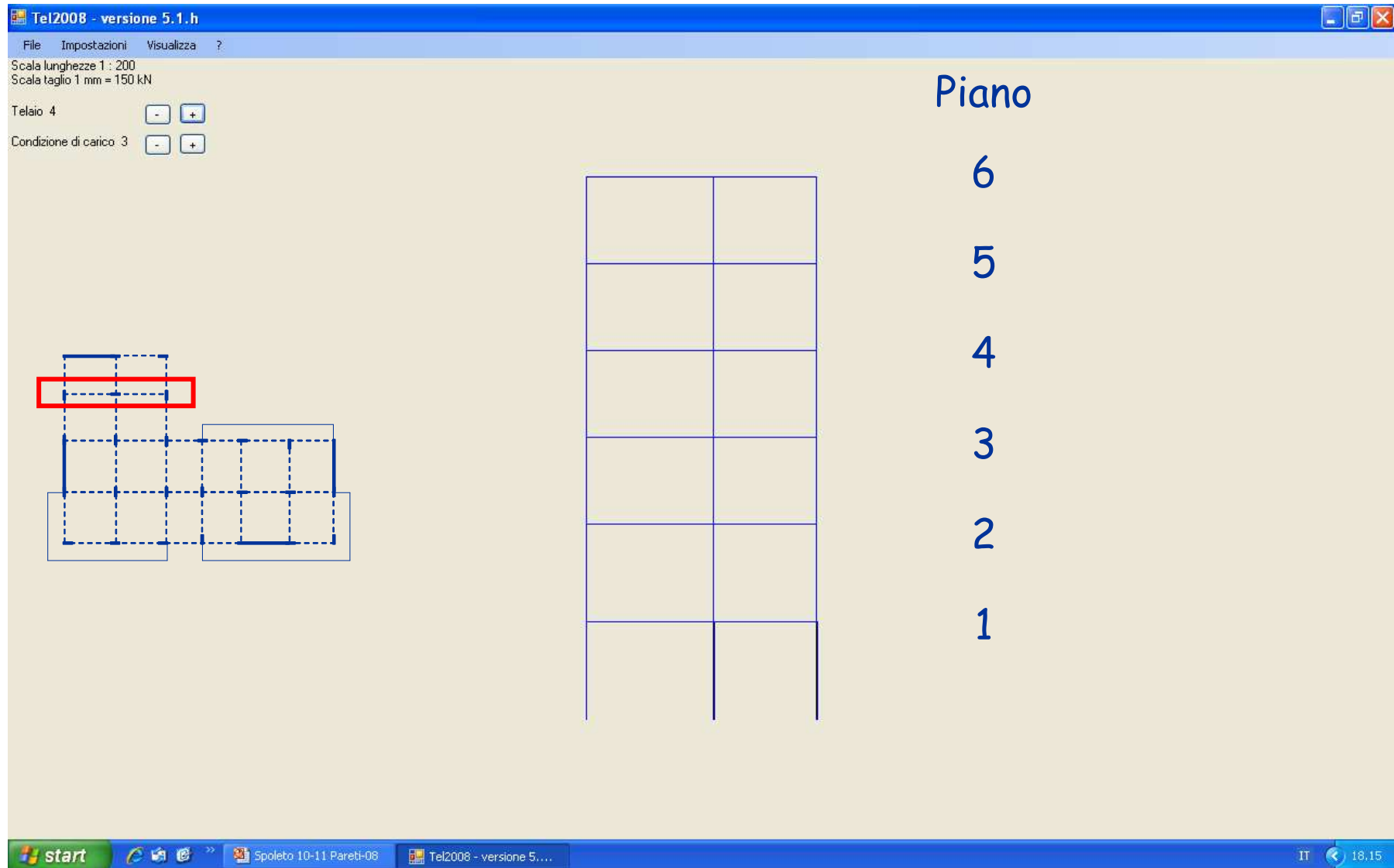
# Taglio per forze in direzione x (telai in direzione x)





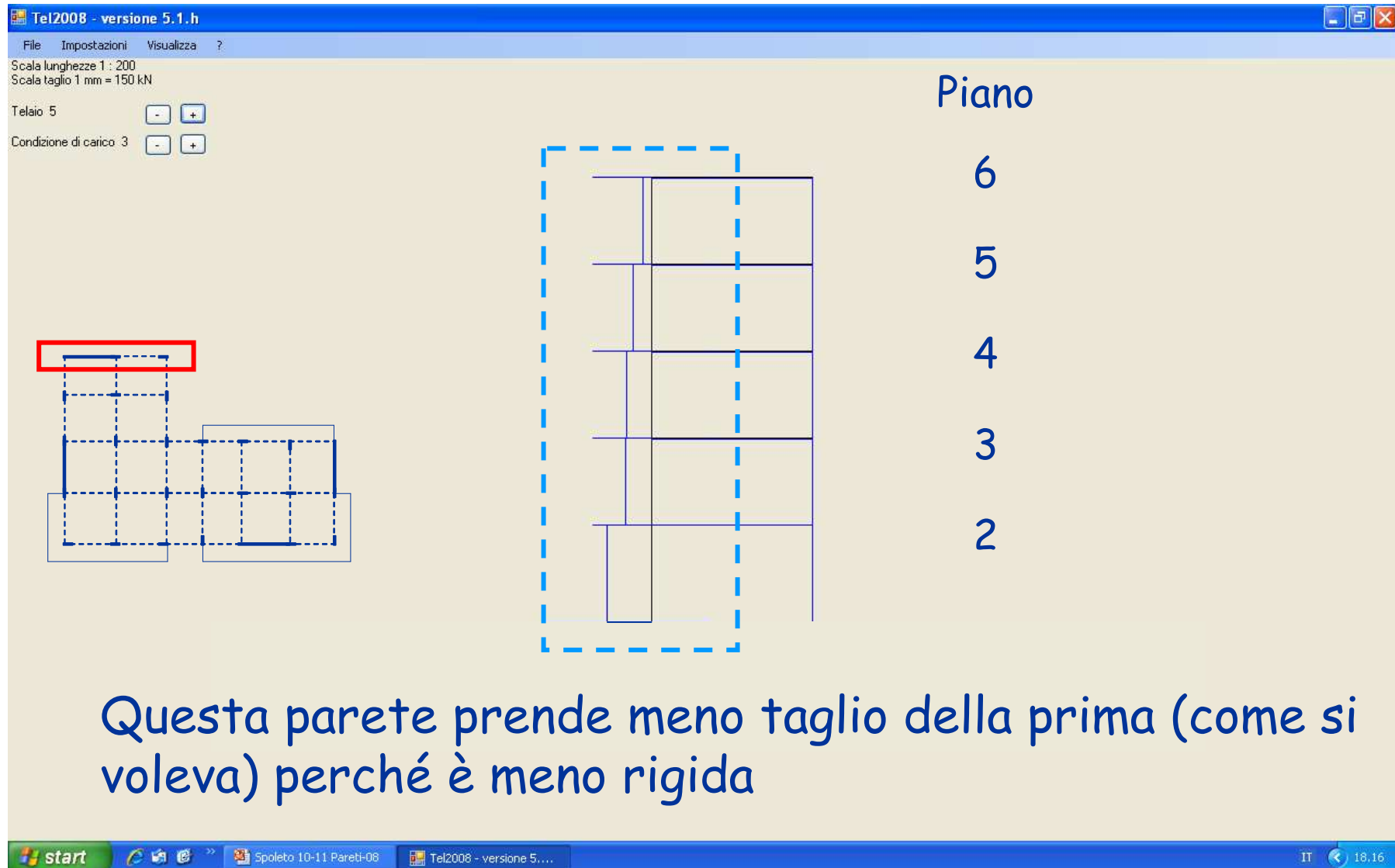
# Taglio per forze in direzione x

(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	474.5
5	1540.1	990.5
4	2072.0	1363.1
3	2433.7	1465.3
2	2625.2	2210.1

-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  
(meno del 20%)

# 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	474.5
5	1447.7	990.5
4	1947.7	1363.1
3	2287.7	1465.3
2	2467.7	2210.1

-6%

I valori previsti  
sovrastimano ovunque  
quelli forniti dall'analisi

Alla base la differenza  
percentuale è  
relativamente modesta  
(meno del 20%)

La sovrastima si riduce al  
10% ed è dovuta all'uso  
dell'analisi modale

# 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	298.6
5	1294.6	675.1
4	1741.8	969.6
3	2045.8	946.4
2	2206.8	1861.2

-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  
(meno del 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	662.1	298.6
5	1216.9	675.1
4	1637.3	969.6
3	1923.1	946.4
2	2074.4	1861.2

I valori previsti  
sovrastimano ovunque  
quelli forniti dall'analisi

Alla base la differenza  
percentuale è  
relativamente modesta  
(meno del 20%)

La sovrastima si riduce al  
10% ed è dovuta all'uso  
dell'analisi modale

# Taglio pareti per forze in direzione x analisi statica

Parete 1 allungata in questa direzione

Piano	Taglio previsto (kN)	Taglio effettivo (kN)
6	787.7	326.5
5	1447.7	956.7
4	1947.7	1431.3
3	2287.7	1570.1
2	2467.7	2461.2

La stima del taglio alla base coincide con il risultato dell'analisi statica.

# Taglio pareti per forze in direzione y analisi statica

Parete 1 allungata in questa direzione

Piano	Taglio previsto (kN)	Taglio effettivo (kN)
6	662.1	187.5
5	1216.9	676.1
4	1637.3	1058.5
3	1923.1	1057.5
2	2074.4	2124.2

La stima del taglio alla base coincide con il risultato dell'analisi statica.



# 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

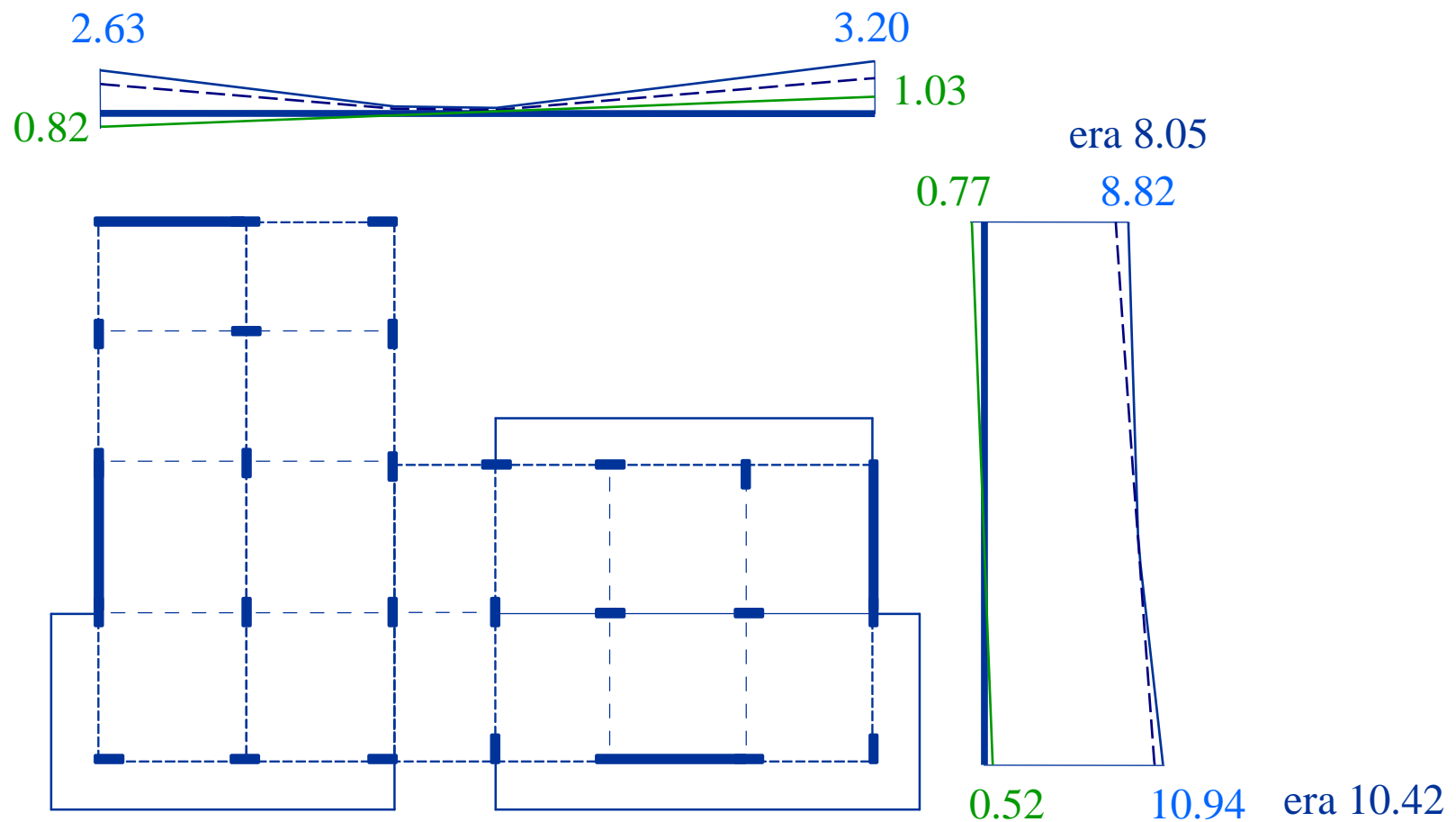
Eccentricità accidentale

# Eccentricità accidentale

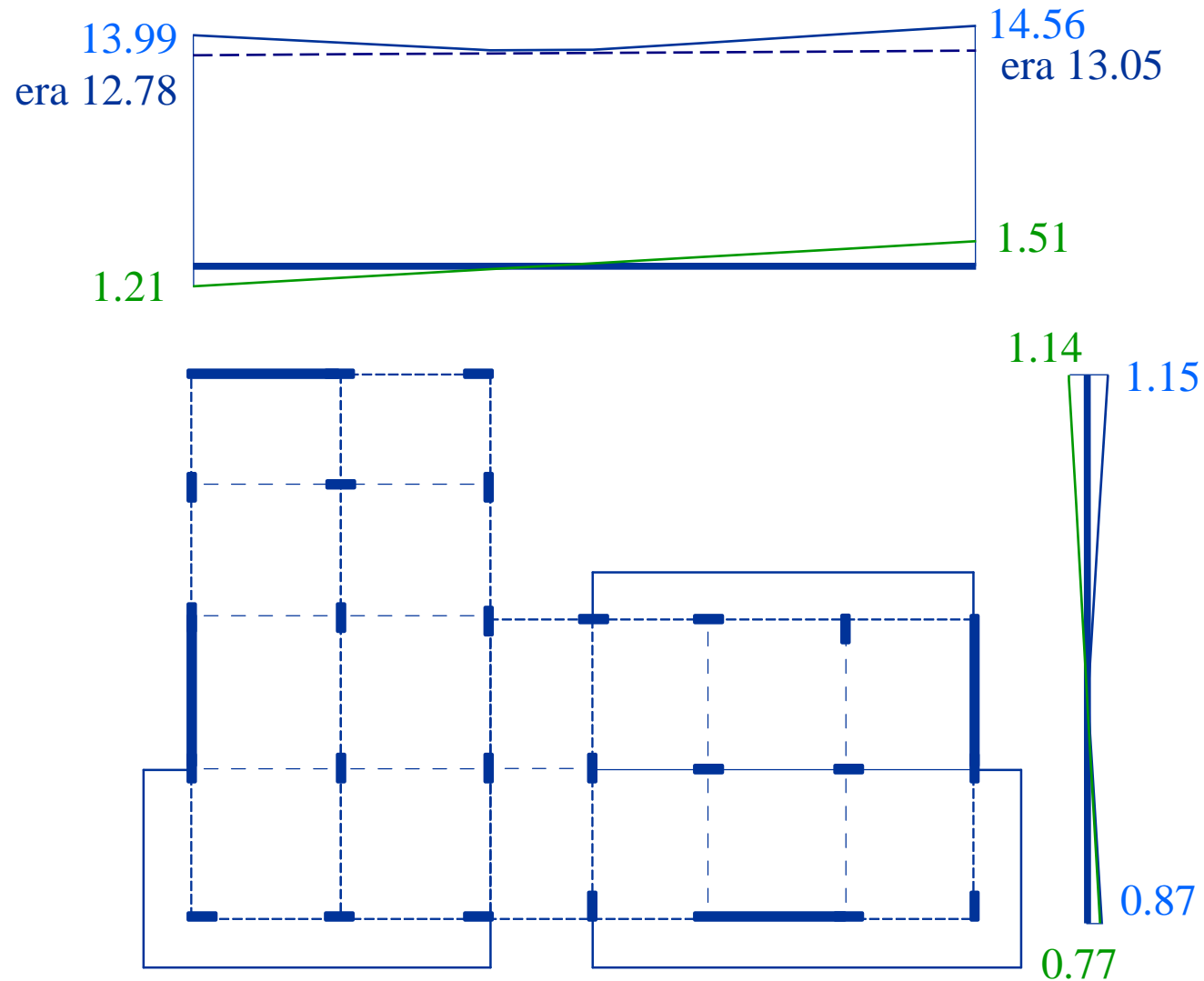
## Esame dei risultati

- Esaminare per ciascuna delle due direzioni gli spostamenti prodotti dalle coppie e confrontarli con quelli prodotti dalle forze
  - l'effetto delle coppie è lo stesso a tutti i piani?
  - la sua entità è comparabile con quanto previsto?
- Esaminare i momenti massimi nei pilastri e nelle travi e confrontarli con quelli prodotti dalle forze
  - l'incremento dovrebbe essere analogo a quello degli spostamenti

# 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
- Le coppie provocano un incremento di spostamento particolarmente identico a tutti i piani
- Gli incrementi percentuali  $\delta$  possono essere stimati con l'espressione semplificata con opportuni valori di k
$$\delta = k \frac{x}{L_e}$$
- Nel caso in esame: k=0.14 per dir.x, k=0.21 per dir.y
- La formula è suggerita anche dalle NTC 08, ma con k=0.6

# Caratteristiche della sollecitazione per forze e coppie

- L'incremento percentuale di sollecitazione dovuto alle coppie è lo stesso di quanto riscontrato per gli spostamenti:
  - dal 5% (inf) al 10% (sup) nel caso di azioni in direzione  $x$
  - del 10% (sin e des) nel caso di azioni in direzione  $y$
- L'incremento percentuale di sollecitazione può essere stimato con la stessa espressione indicata per gli spostamenti

Combinazione delle azioni  
nelle due direzioni



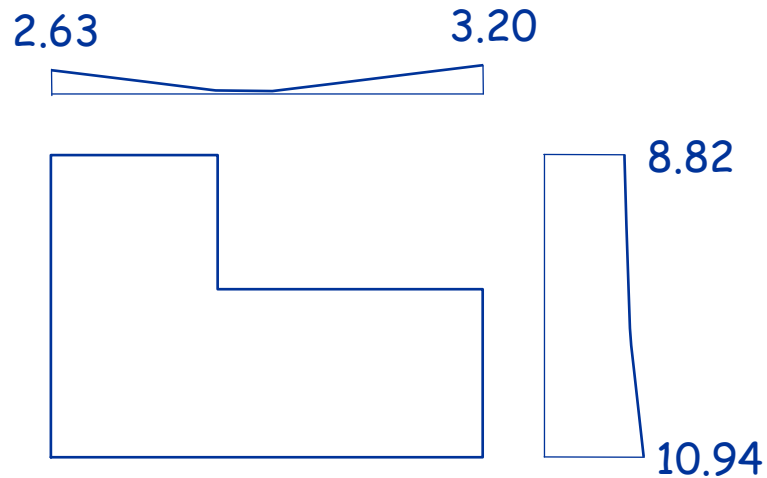
# Le componenti orizzontali

"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"

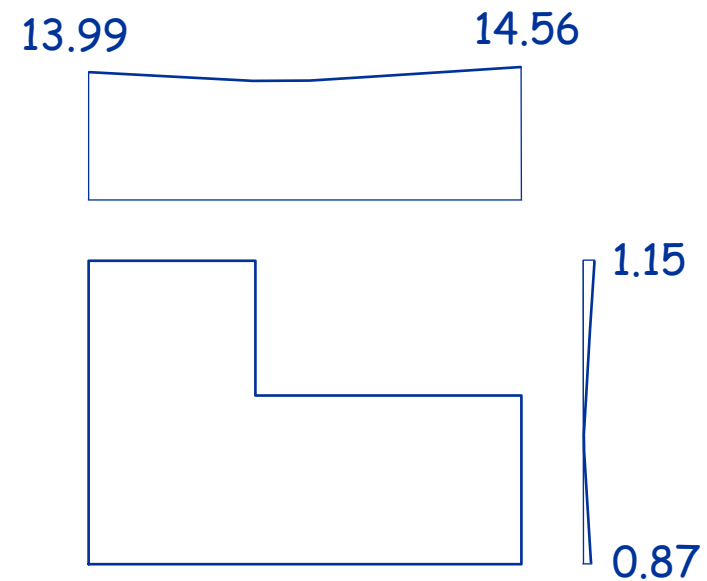
In che modo capire quanta importanza ha questa combinazione?

Ragioniamo ancora esaminando gli spostamenti

# Effetto complessivo del sisma separatamente nelle due direzioni

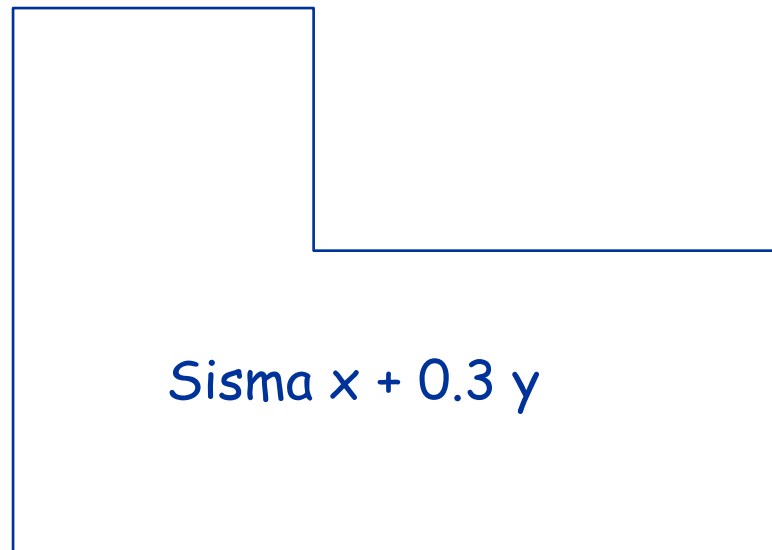
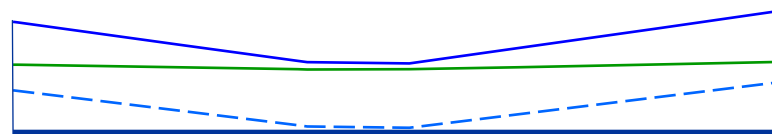
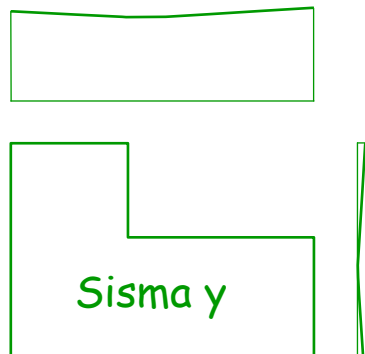
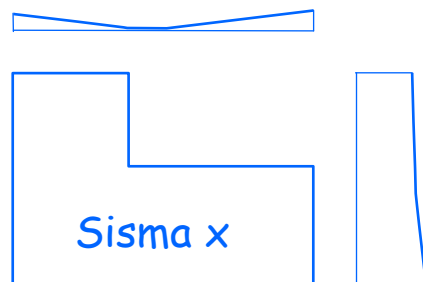


Sisma in  
direzione x



Sisma in  
direzione y

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



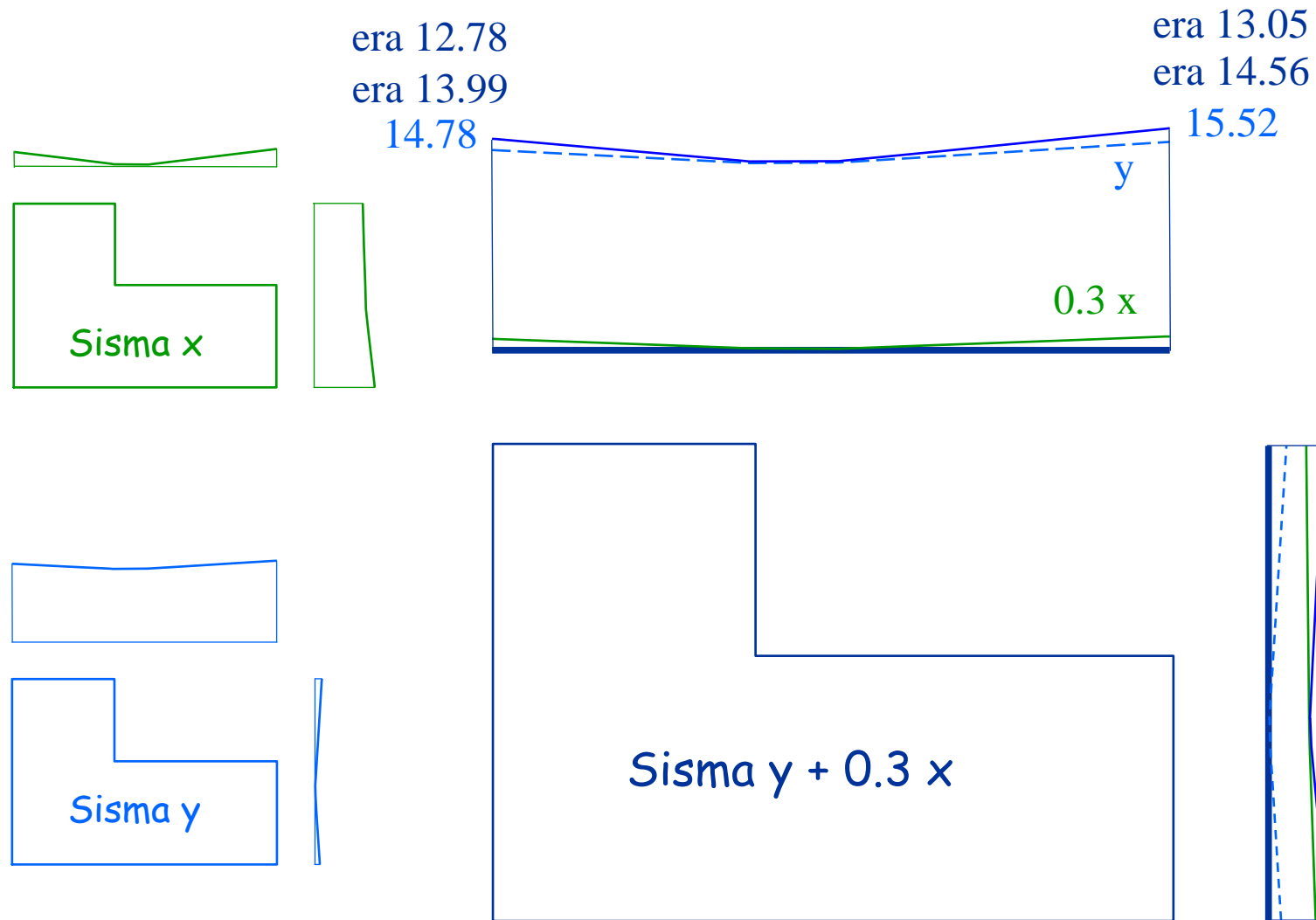
era 8.05  
era 8.82  
9.20

y

0.3 x

era 10.42 era 10.94 11.20

# Inviluppo: sisma y + 0.3 sisma x 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 20% 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 30%, 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, ma con leggera sovrastima delle sollecitazioni (dovuta alla sopravvalutazione della massa)
- 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 e la leggera sottostima  
degli effetti di eccentricità accidentale e azione  
contemporanea delle due componenti del sisma

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 SLU, tenendo conto della differenza di ordinata dei relativi spettri

# Spettri per SLU e SLD

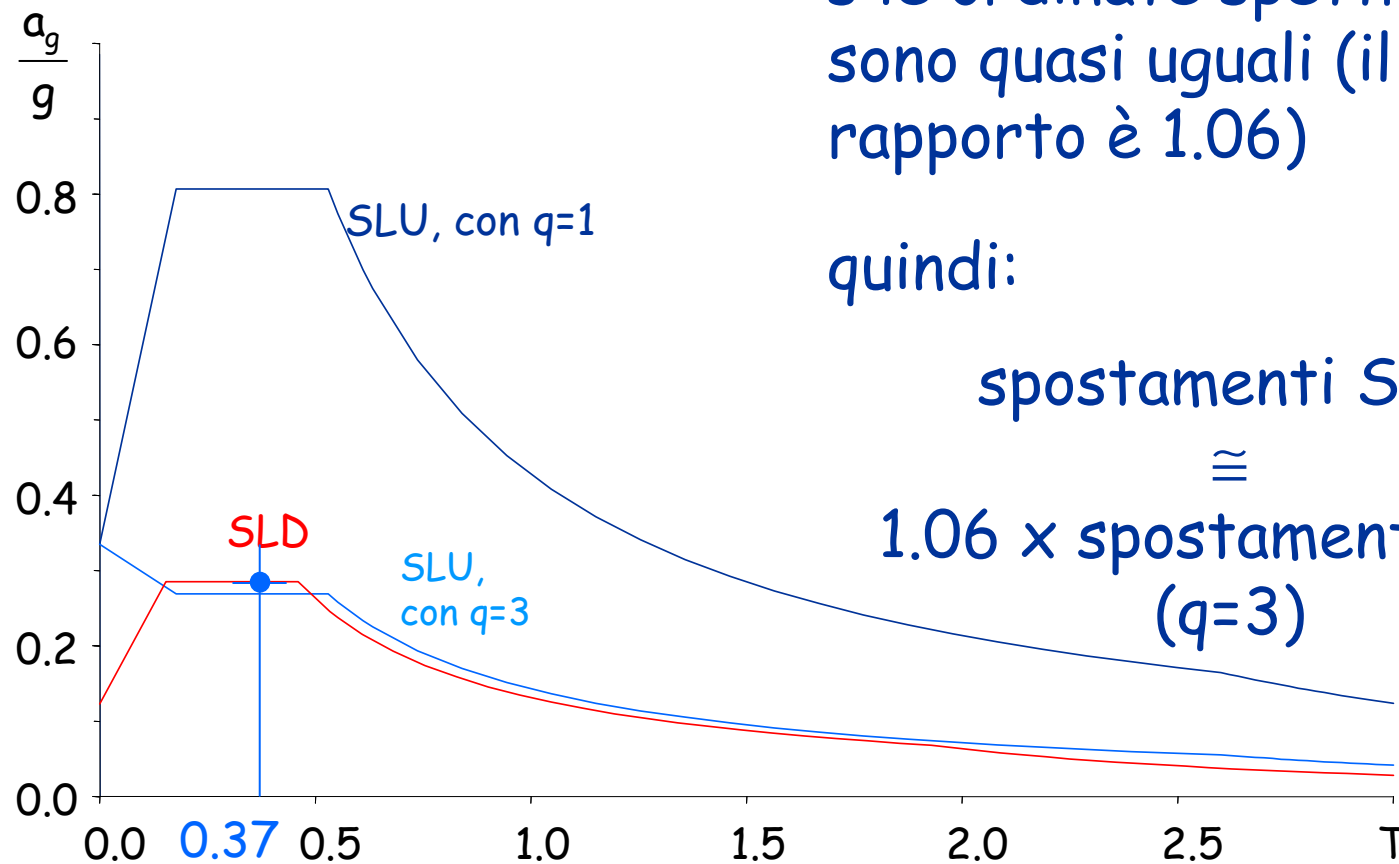
nel caso in esame, per un periodo pari a circa 0.37 s le ordinate spettrali sono quasi uguali (il loro rapporto è 1.06)

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:  $1.06 \times 4.1 = 4.3 \text{ mm}$   
(all'ultimo piano)

La verifica è ampiamente soddisfatto

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