

Corsi di aggiornamento

Progettiamo insieme

Teoria e pratica della progettazione strutturale

4. Progetto di edifici con pareti

09 - Analisi e giudizio sulla struttura

Spoletto

17-18 e 24-25 giugno 2016

Aurelio Ghersi

Determinazione della risposta strutturale

Modello numerico

- Insieme di telai piani con impalcati rigidi
- Pareti modellate con elementi monodimensionali:
 - deformabili a flessione e a taglio
 - tratti molto rigidi in corrispondenza delle travi
- È considerata la rigidezza delle pareti nel piano di minore rigidezza

Metodo di analisi

- Analisi modale con spettro di risposta
- Combinazione dei modi mediante CQC

Un mare di numeri. Come non perdersi?

Analisi modale

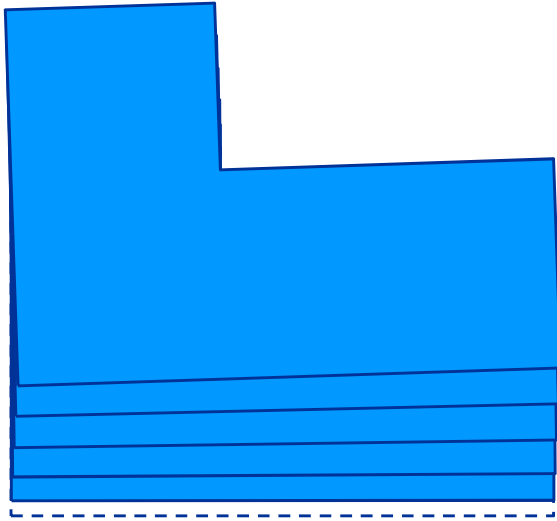
- Esaminare le deformate modali (indipendentemente dalla direzione del sisma)
 - sono disaccoppiate oppure accoppiate?
- Esaminare le masse partecipanti (per ciascuna direzione del sisma) per vedere quali modi danno maggior contributo
 - prevale un solo modo, o più di uno?
- Esaminare i periodi dei modi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

Un mare di numeri. Come non perdersi?

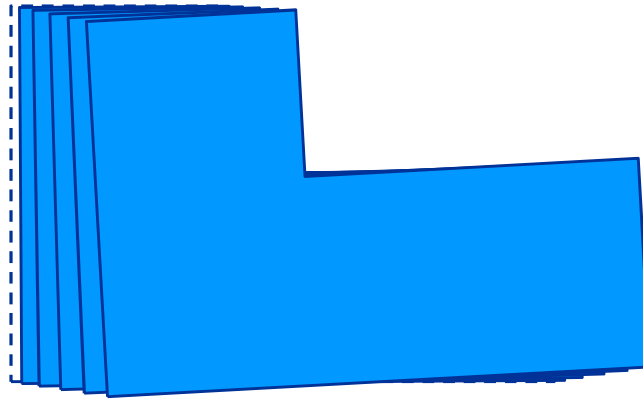
Analisi modale

- 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?

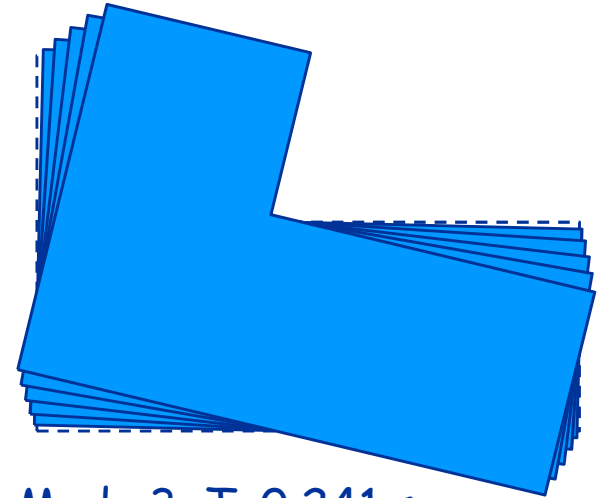
Deformate modali



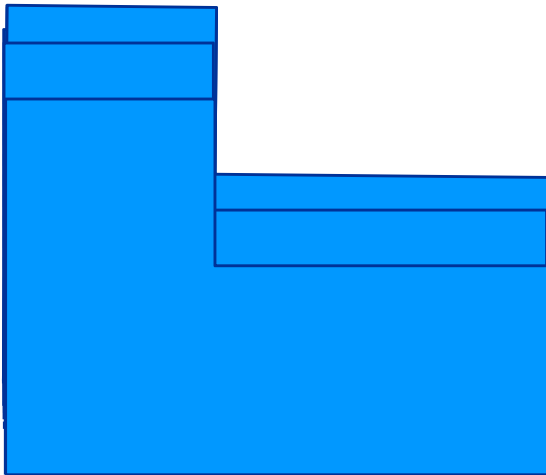
Modo 1, $T=0.355$ s



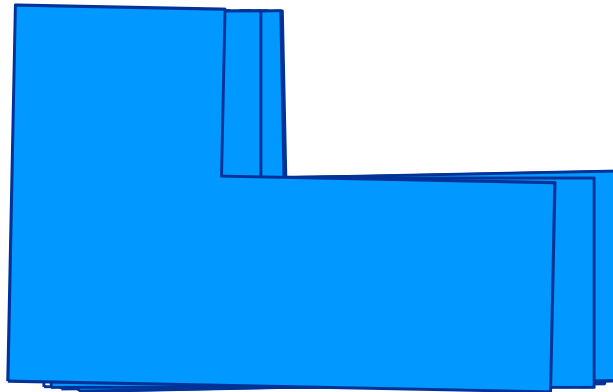
Modo 2, $T=0.318$ s



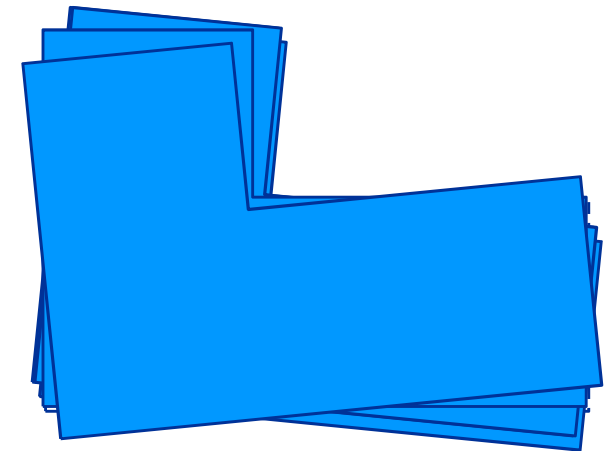
Modo 3, $T=0.241$ s



Modo 4, $T=0.079$ s

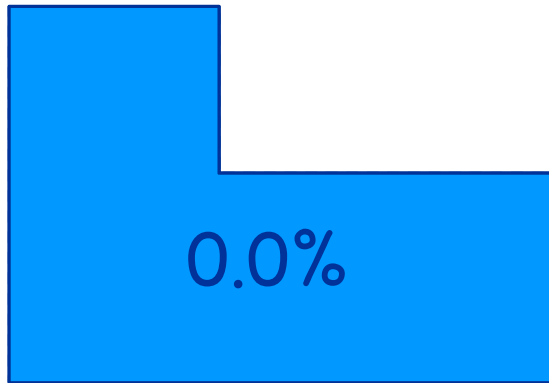


Modo 5, $T=0.071$ s

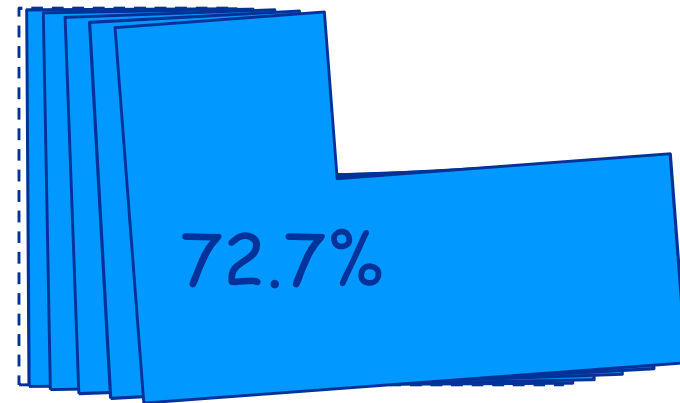


Modo 6, $T=0.051$ s

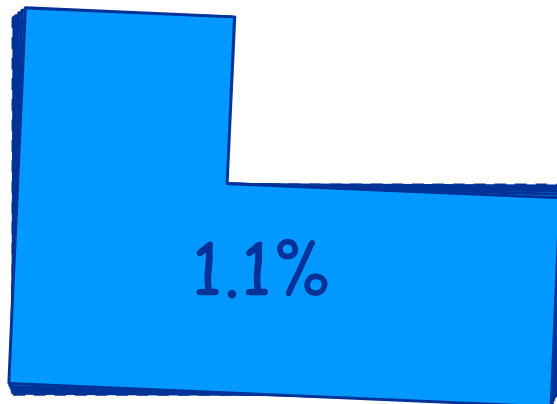
Masse partecipanti, sisma x



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



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

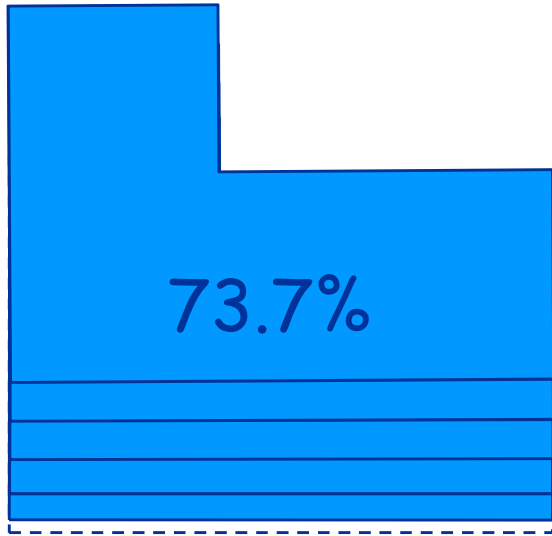


Modo 3 $T=0.241\text{ s}$

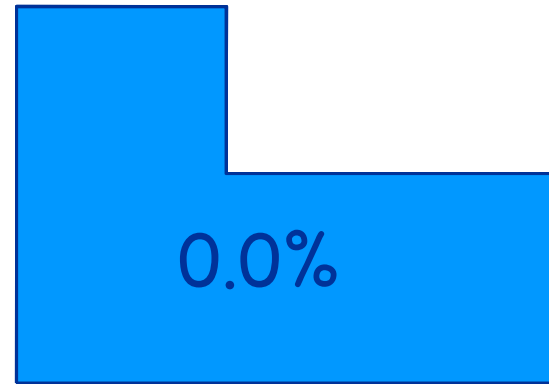
Il modo 2 è prevalente di traslazione secondo x

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

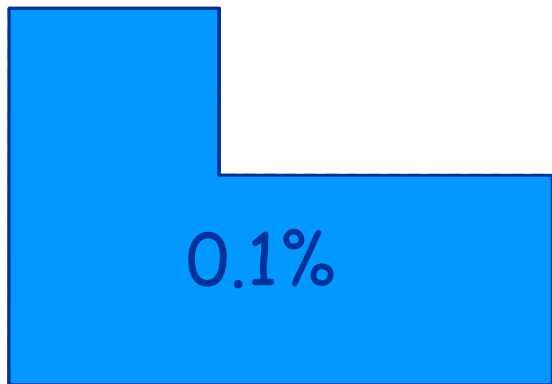
Masse partecipanti, sisma y



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



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



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

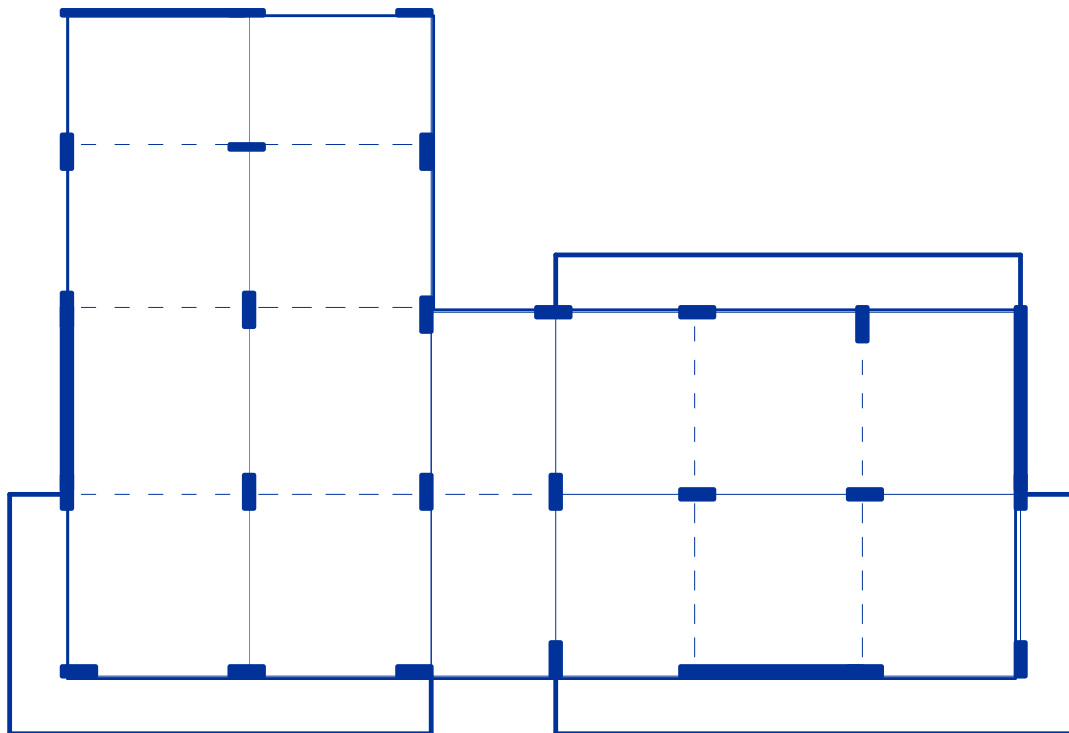
Il modo 1 di traslazione
secondo y è del tutto
disaccoppiato dagli altri due

Inviluppo modale sisma x

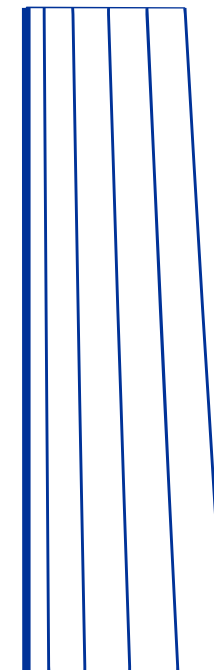
1.67



1.82



8.02

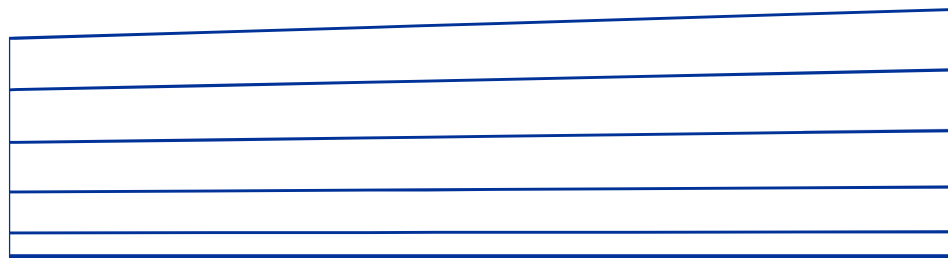


10.06

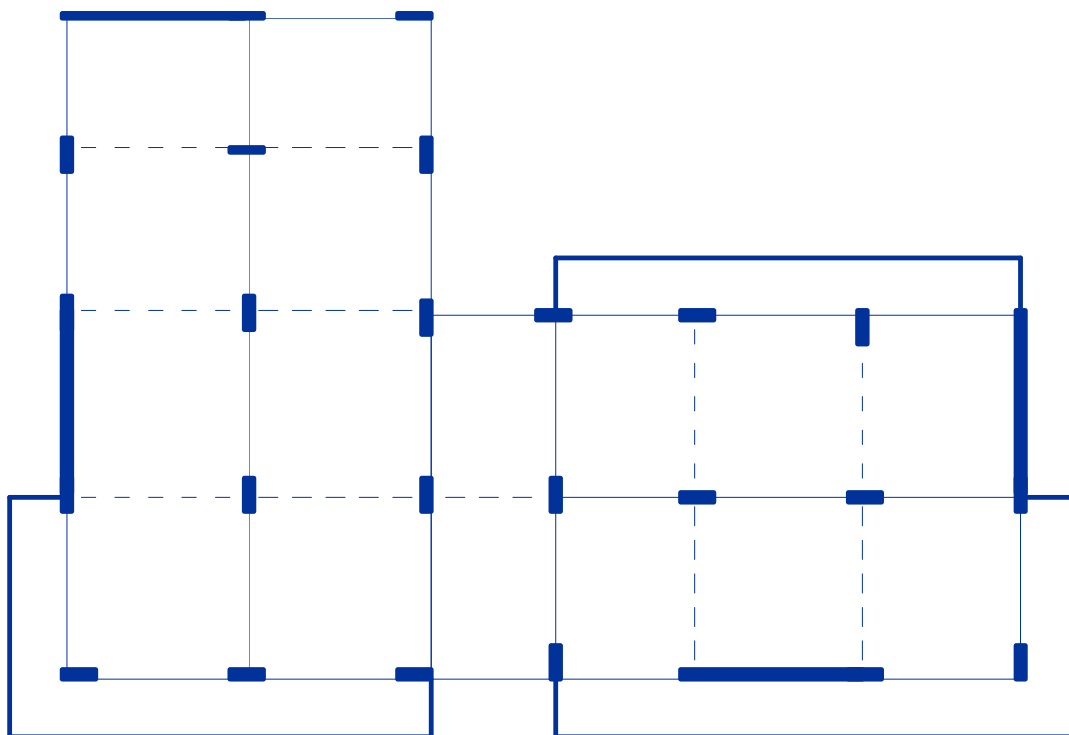
Inviluppo modale sisma y

11.10

12.57



0.65



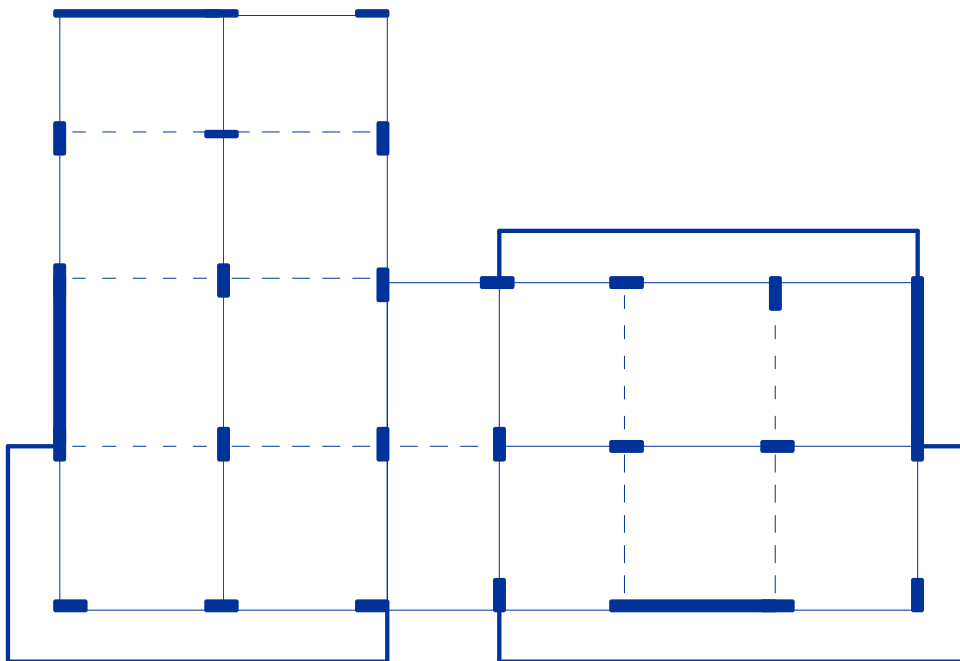
0.54

Spostamenti, inviluppo modale

Spostamenti
per sisma y

11.10

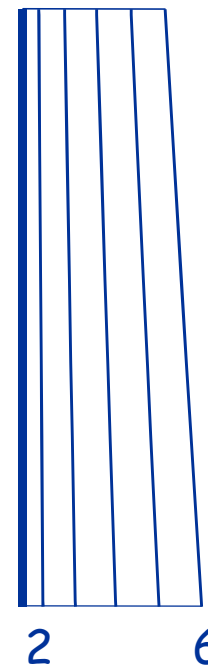
12.57



8.02

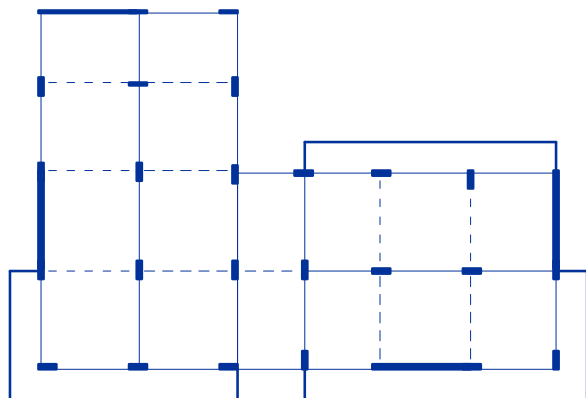
Spostamenti
per sisma x

10.06



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

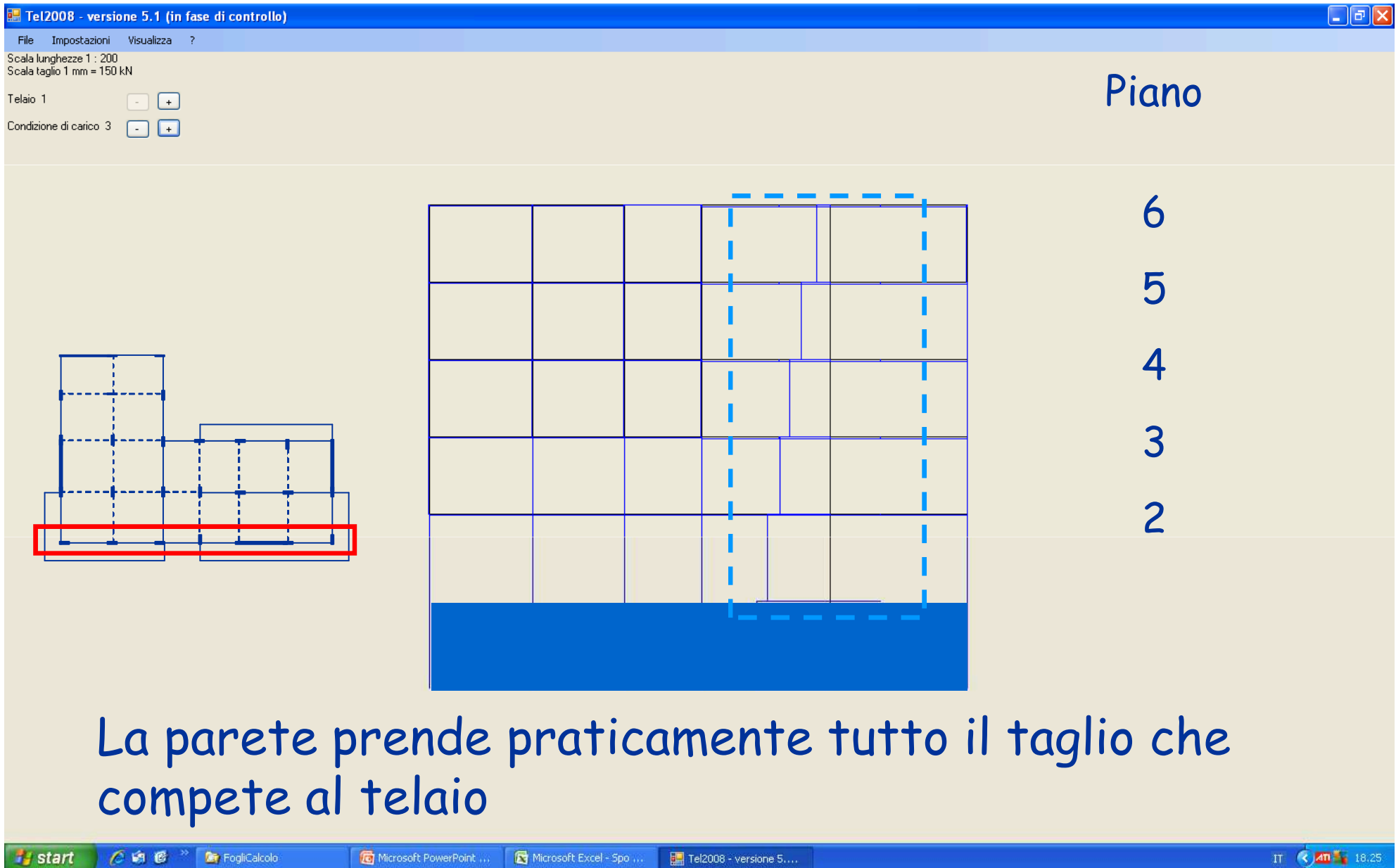
La direzione y andrebbe
irrigidita



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)

Tel2008 - versione 5.1 (in fase di controllo)

File Impostazioni Visualizza ?

Scala lunghezze 1 : 200
Scala taglio 1 mm = 150 kN

Telaio 2 - +
Condizione di carico 3 - +

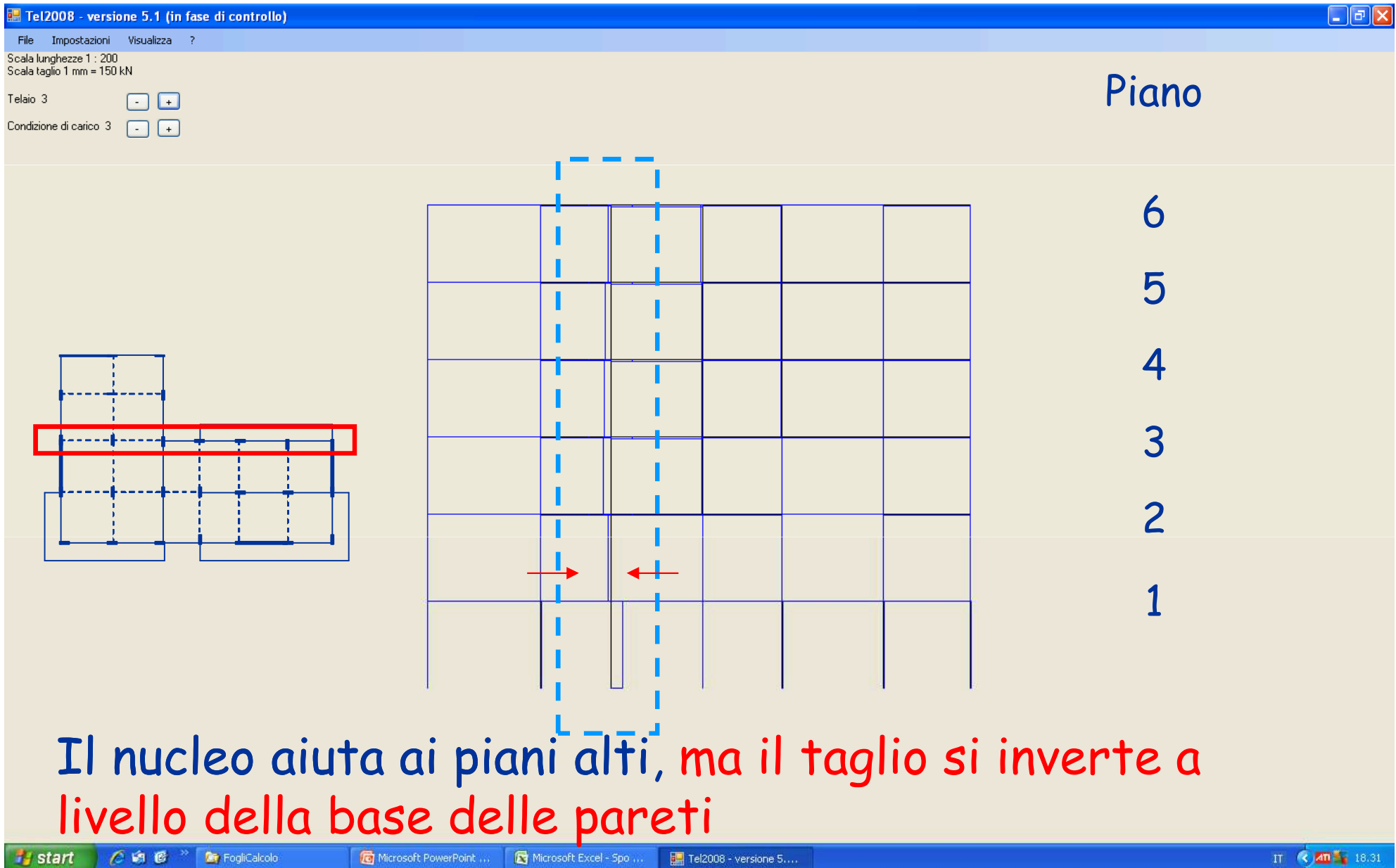
Piano

6
5
4
3
2
1

Questo telaio non porta quasi niente

start FogliCalcolo Microsoft PowerPoint ... Microsoft Excel - Spo ... Tel2008 - versione 5... IT 18:29

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



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

Tel2008 - versione 5.1 (in fase di controllo)

File Impostazioni Visualizza ?

Scala lunghezze 1 : 200
Scala taglio 1 mm = 150 kN

Telaio 4 - +
Condizione di carico 3 - +

Piano

6
5
4
3
2
1

The screenshot displays the Tel2008 software interface. On the left, a structural model of a frame is shown with a red rectangle highlighting a specific section. To the right of the model is a vertical grid with six levels, numbered 1 to 6 from bottom to top. The word 'Piano' is positioned above the grid. The software's title bar and menu bar are visible at the top, and the Windows taskbar is at the bottom.

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

Tel2008 - versione 5.1 (in fase di controllo)

File Impostazioni Visualizza ?

Scala lunghezze 1 : 200
Scala taglio 1 mm = 150 kN

Telaio 5 - +
Condizione di carico 3 - +

Piano

6
5
4
3
2

Questa parete prende meno taglio della prima (come si voleva) perché è meno rigida

start FogliCalcolo Microsoft PowerPoint ... Microsoft Excel - Spo ... Tel2008 - versione 5... IT 18:33

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%

I valori previsti
sovrastimano ovunque
quelli forniti dall'analisi

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

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

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 sovrastiva 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%

I valori previsti
sovrastimano ovunque
quelli forniti dall'analisi

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

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

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

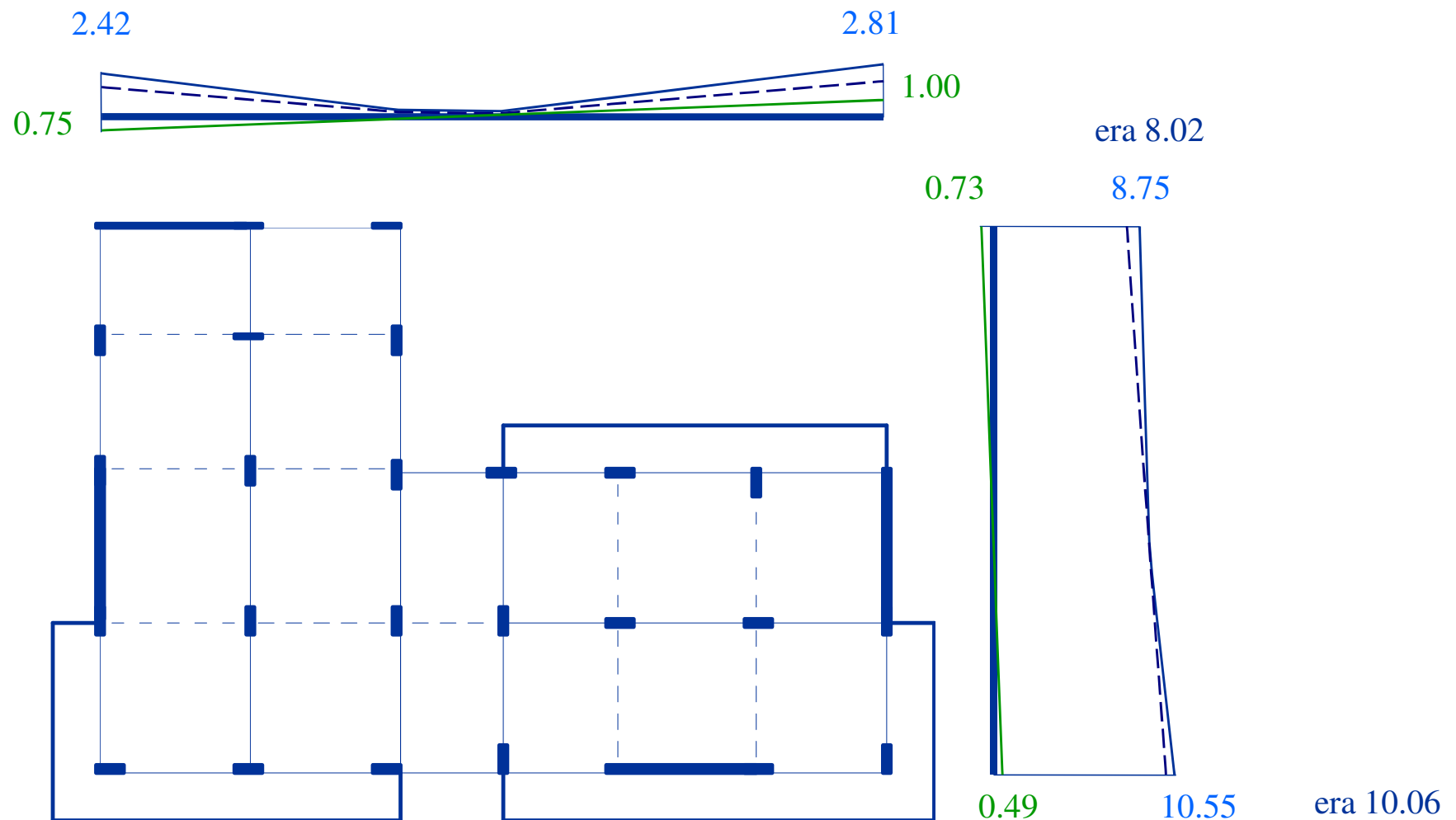
Esame dei risultati

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

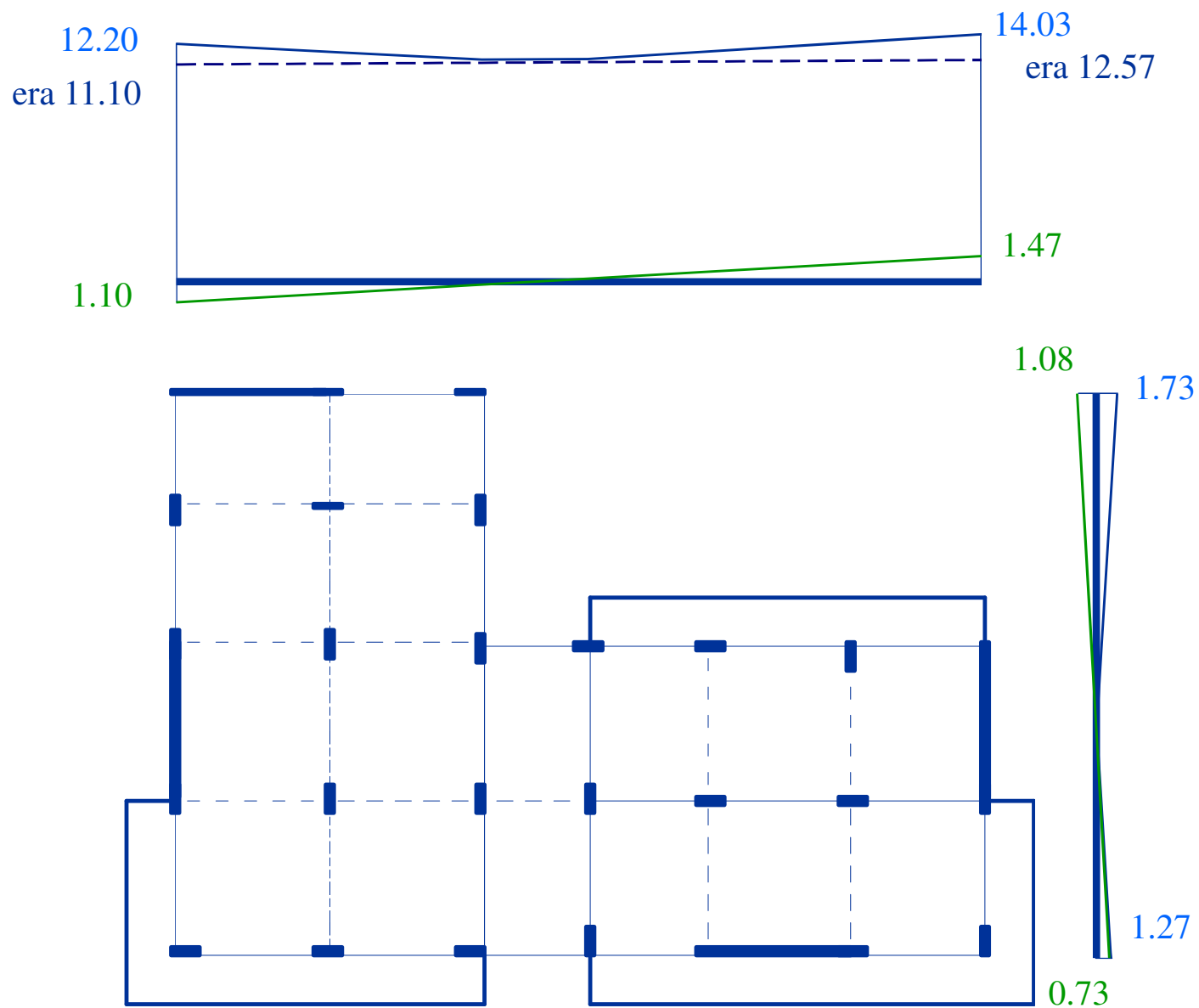
Fornisce informazioni su:

- 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

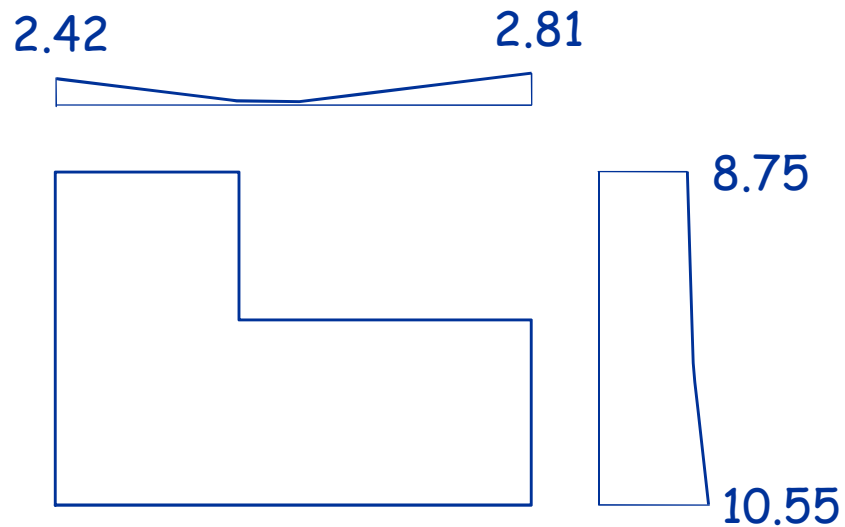
Le componenti orizzontali

“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”

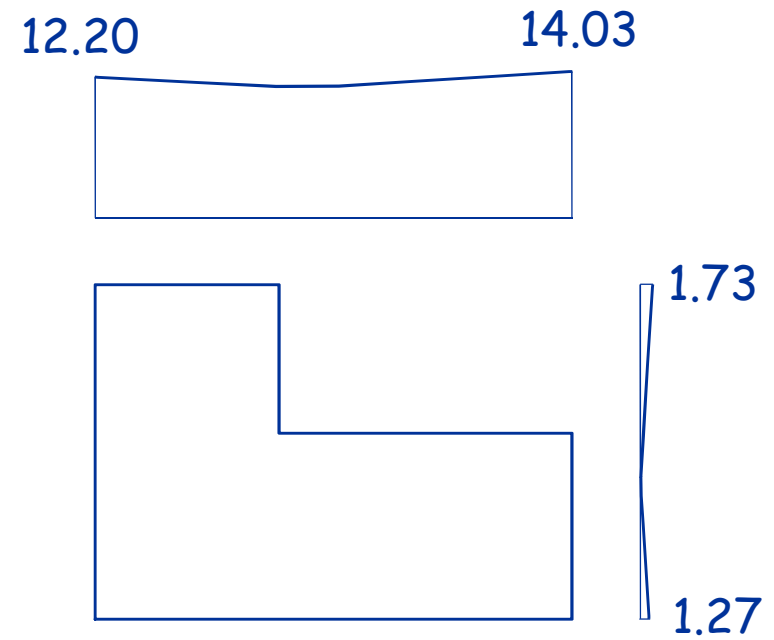
In che modo capire quanta importanza ha questa combinazione?

Ragioniamo ancora esaminando gli spostamenti

Effetto complessivo del sisma separatamente nelle due direzioni

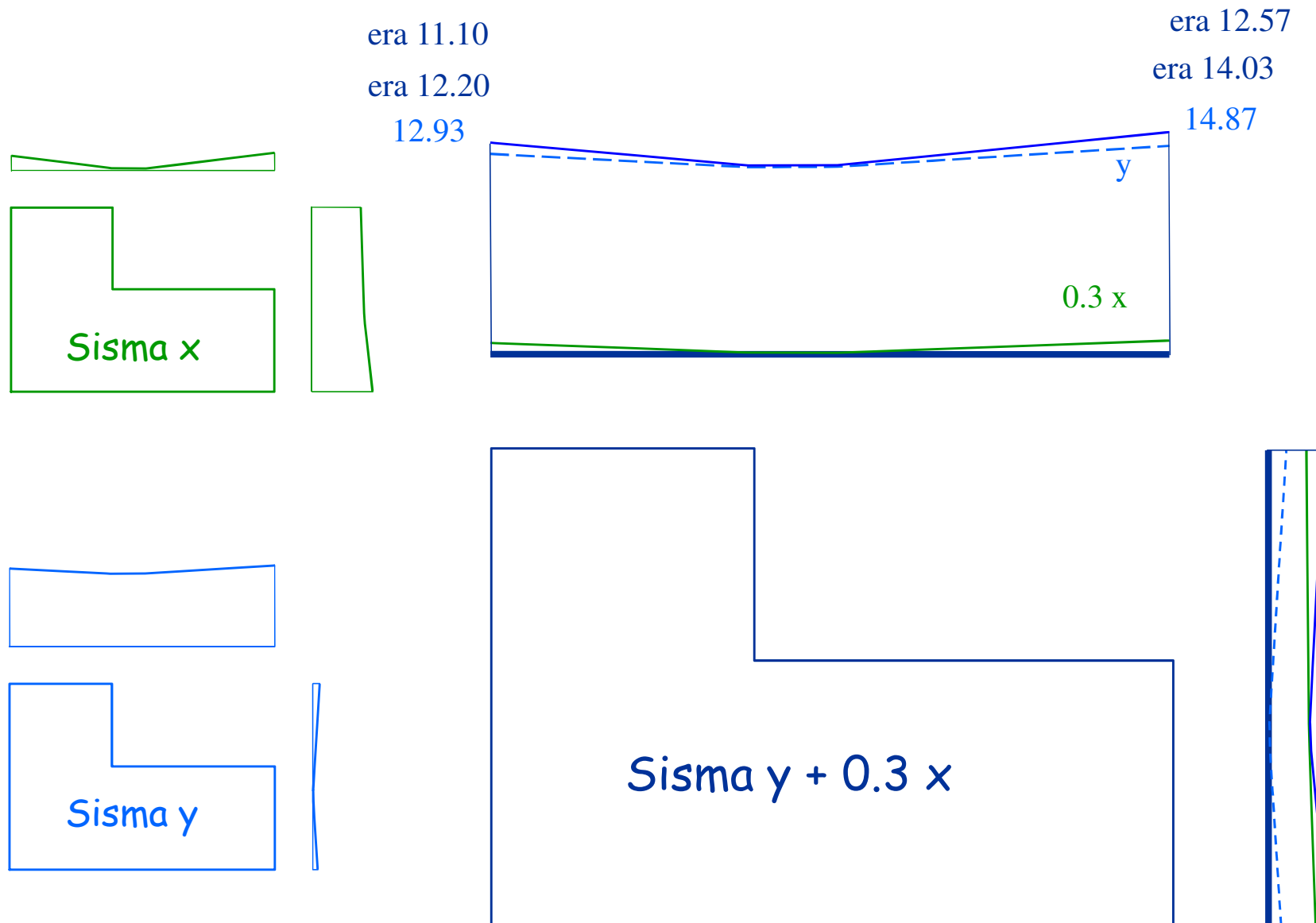


Sisma in
direzione x

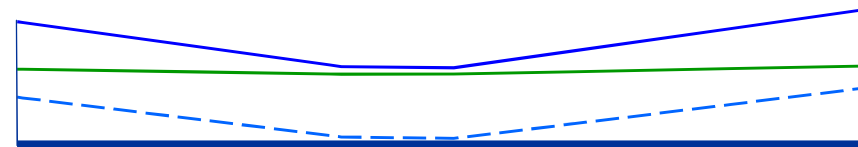
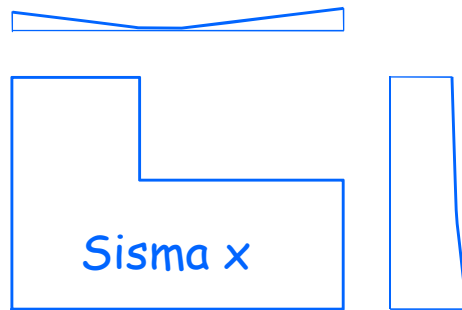


Sisma in
direzione y

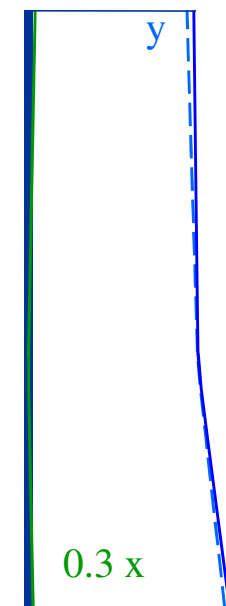
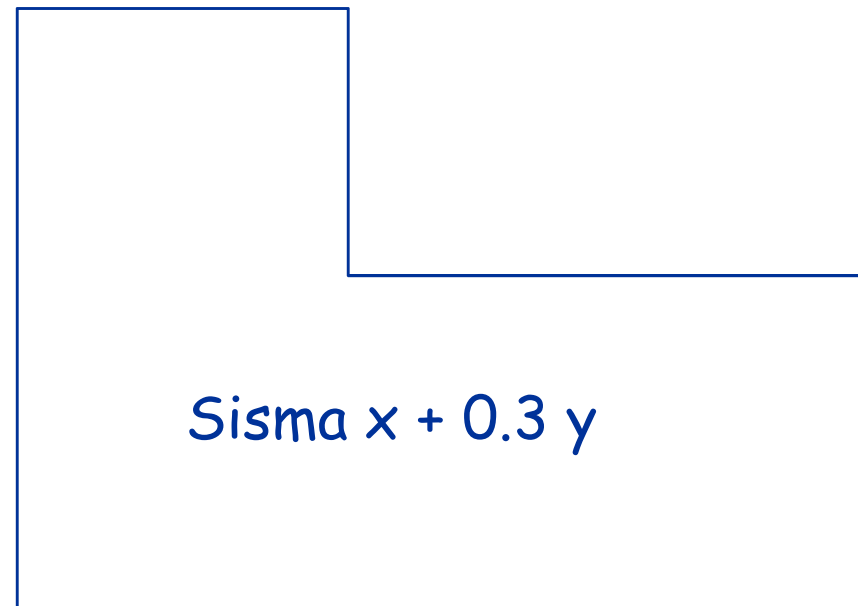
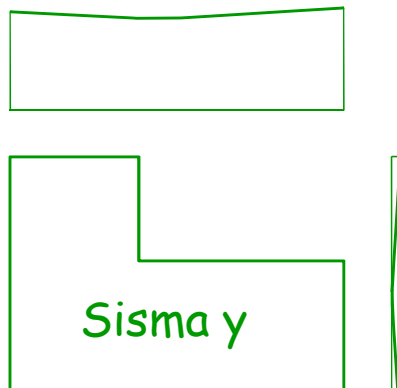
Inviluppo: sisma y + 0.3 sisma x analisi modale



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



era 8.02
era 8.75
9.27



era 10.06 era 10.55 10.93

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

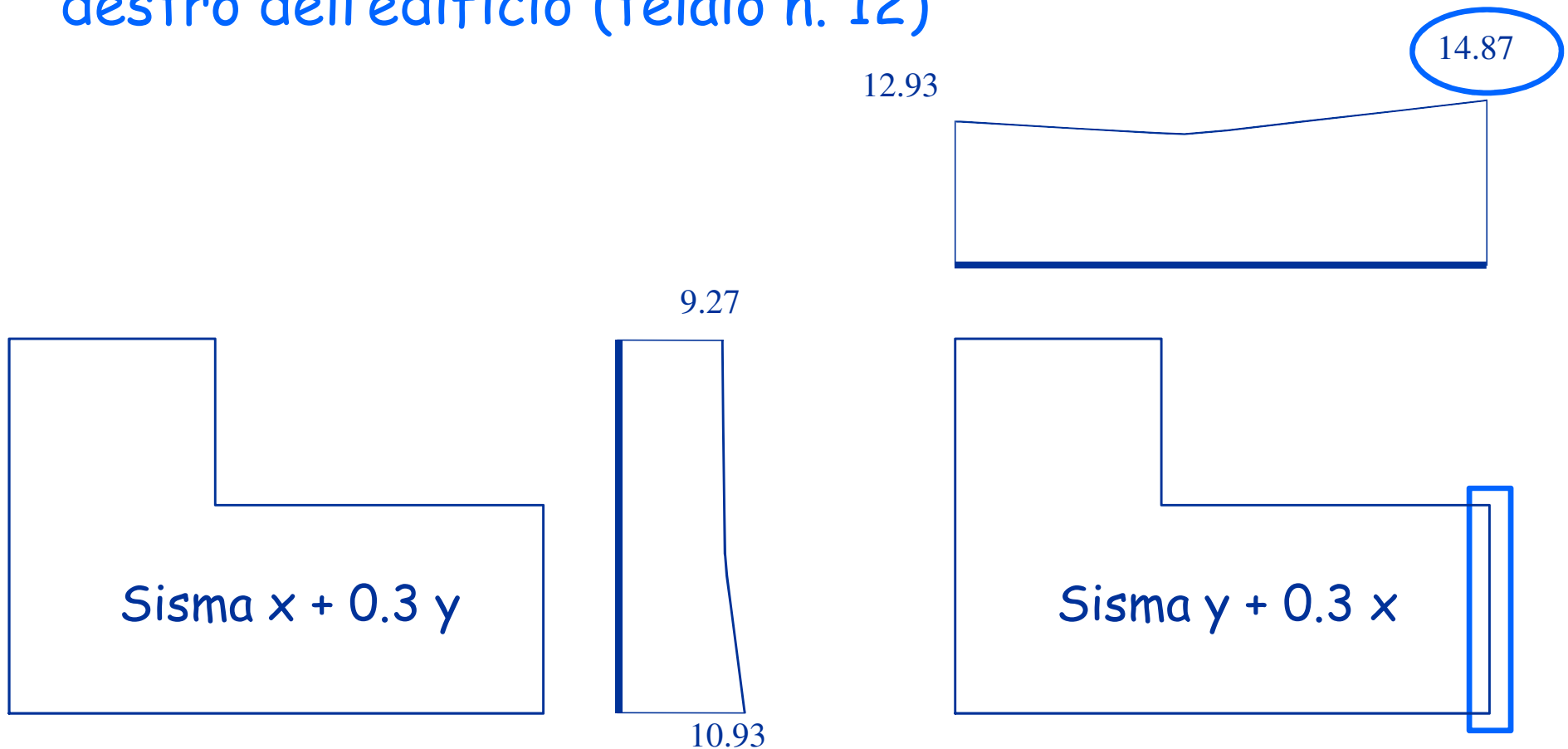
Stato limite di danno

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

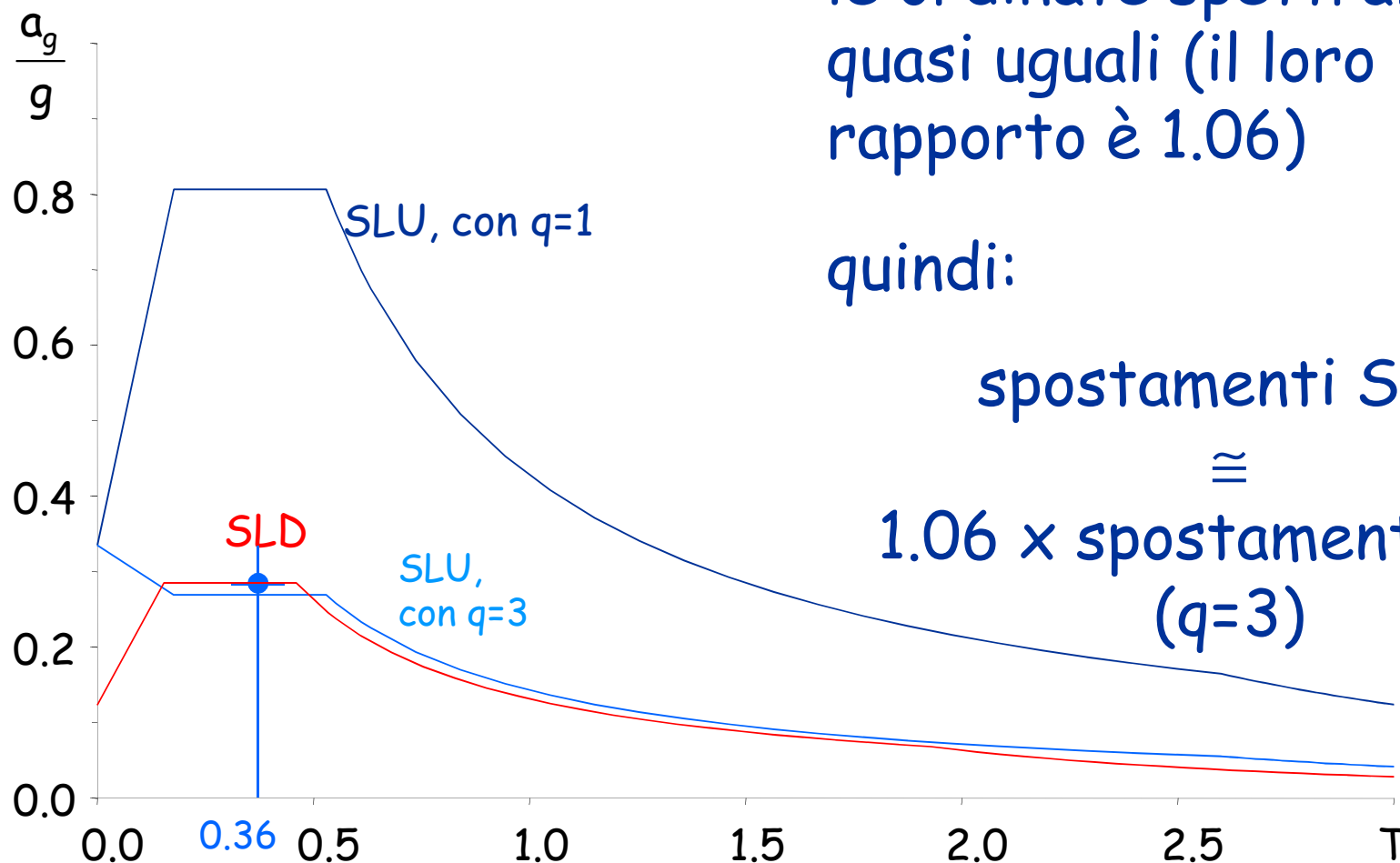
nel caso in esame, per un periodo pari a circa 0.36 s le ordinate spettrali sono quasi uguali (il loro rapporto è 1.06)

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 soddisfatta

Per l'edificio con struttura intelaiata era:
 9.6 mm
(tra II e I impalcato)