

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

**Problemi specifici nel progetto di strutture  
antisismiche in acciaio**

5 - Analisi e giudizio sulla struttura

Spoletto  
11-12 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?

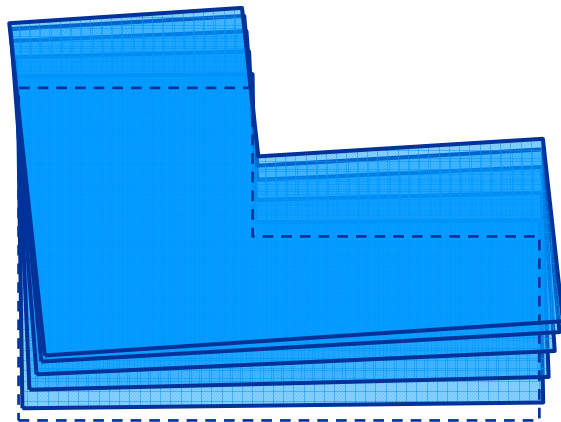
# Un mare di numeri. Come non perdersi?

## Analisi modale

- Esaminare l'inviluppo 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 le sollecitazioni sulle travi e sui pilastri
  - rispettano le previsioni o no?

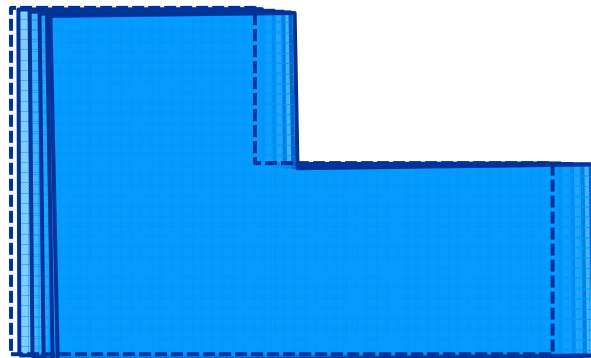
# Deformate modali

Previsto  $T=1.41\text{ s}$

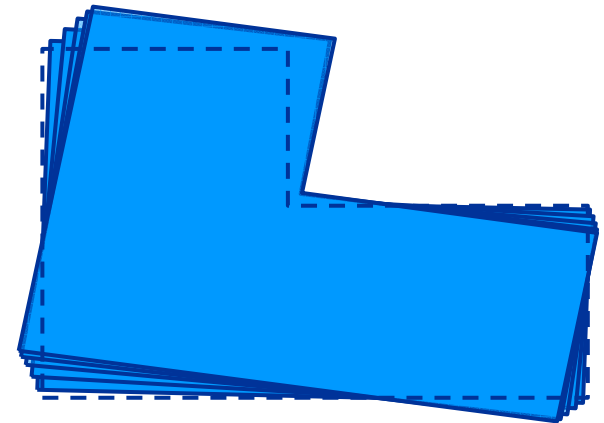


Modo 1,  $T=1.36\text{ s}$

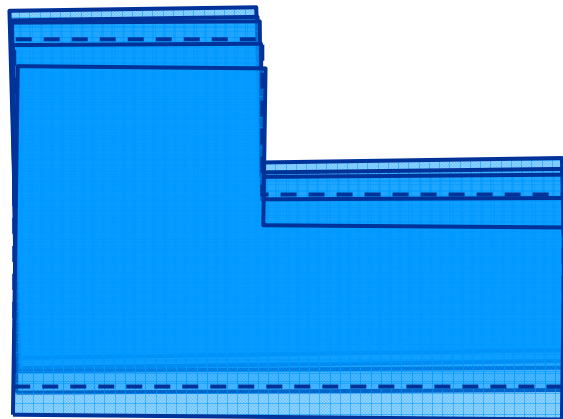
Previsto  $T=1.39\text{ s}$



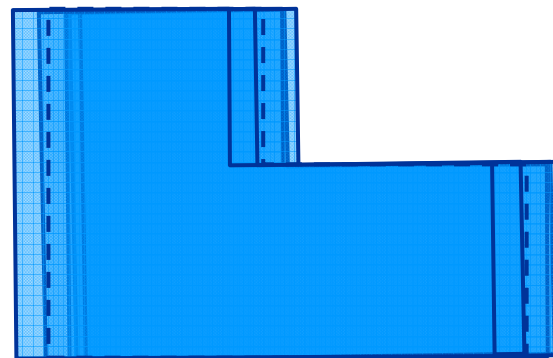
Modo 2,  $T=1.33\text{ s}$



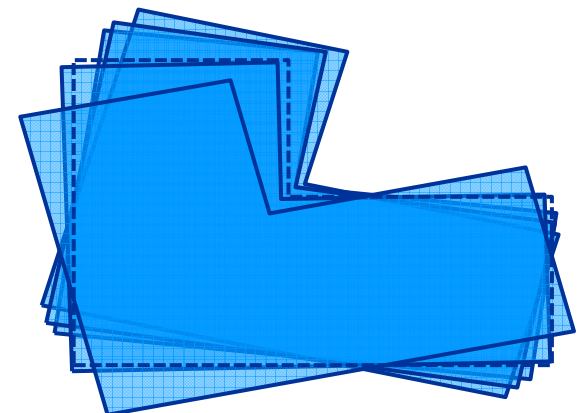
Modo 3,  $T=1.16\text{ s}$



Modo 4,  $T=0.425\text{ s}$

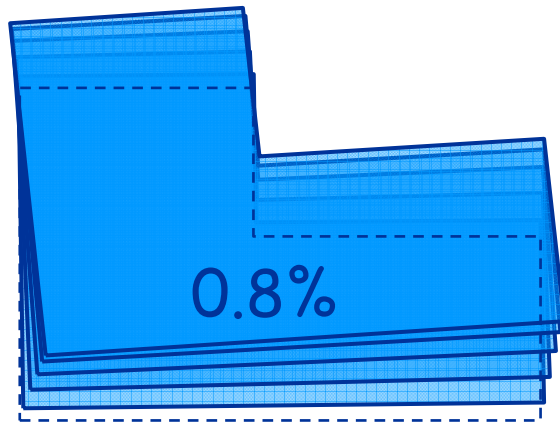


Modo 5,  $T=0.419\text{ s}$

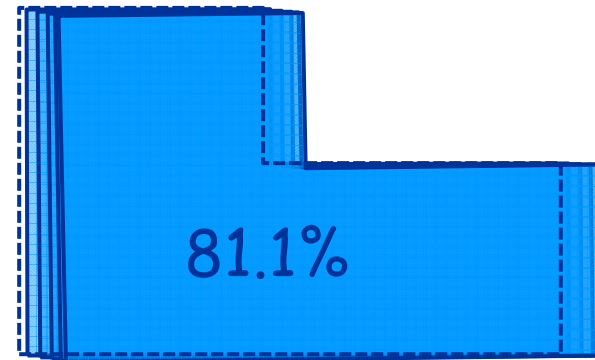


Modo 6,  $T=0.359\text{ s}$

# Masse partecipanti, sisma x

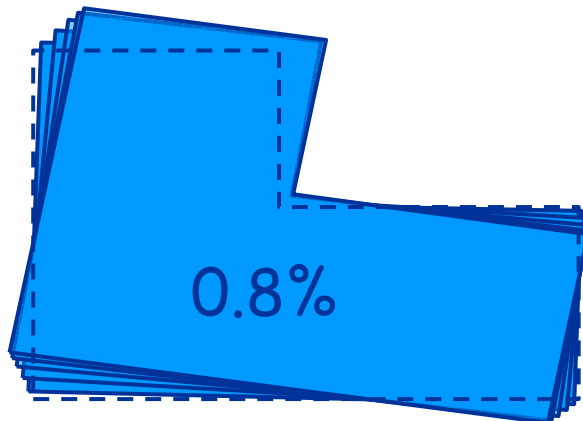


Modo 1  $T=1.36$  s



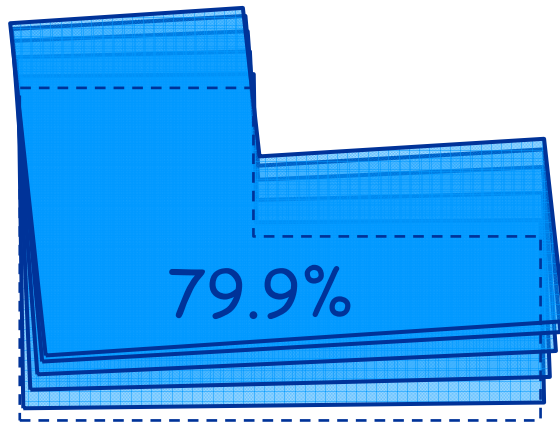
Modo 2  $T=1.16$  s

Il modo 2 è prevalente di  
traslazione secondo x



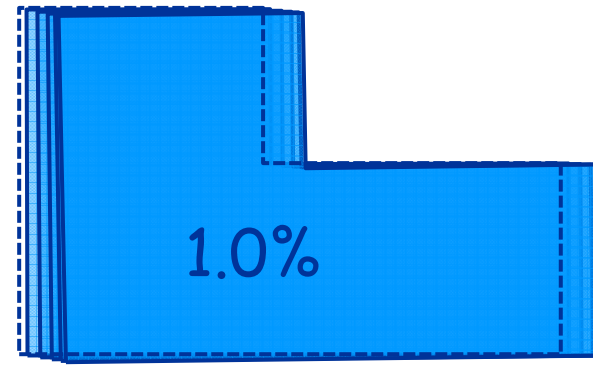
Modo 3  $T=1.16$  s

# Masse partecipanti, sisma y



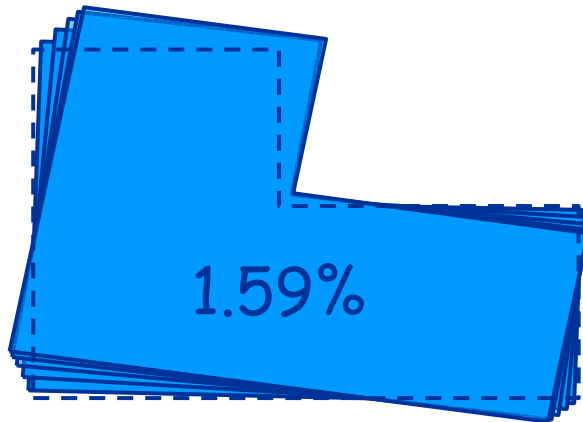
Modo 1

$T=1.36\text{ s}$



Modo 2

$T=1.33\text{ s}$



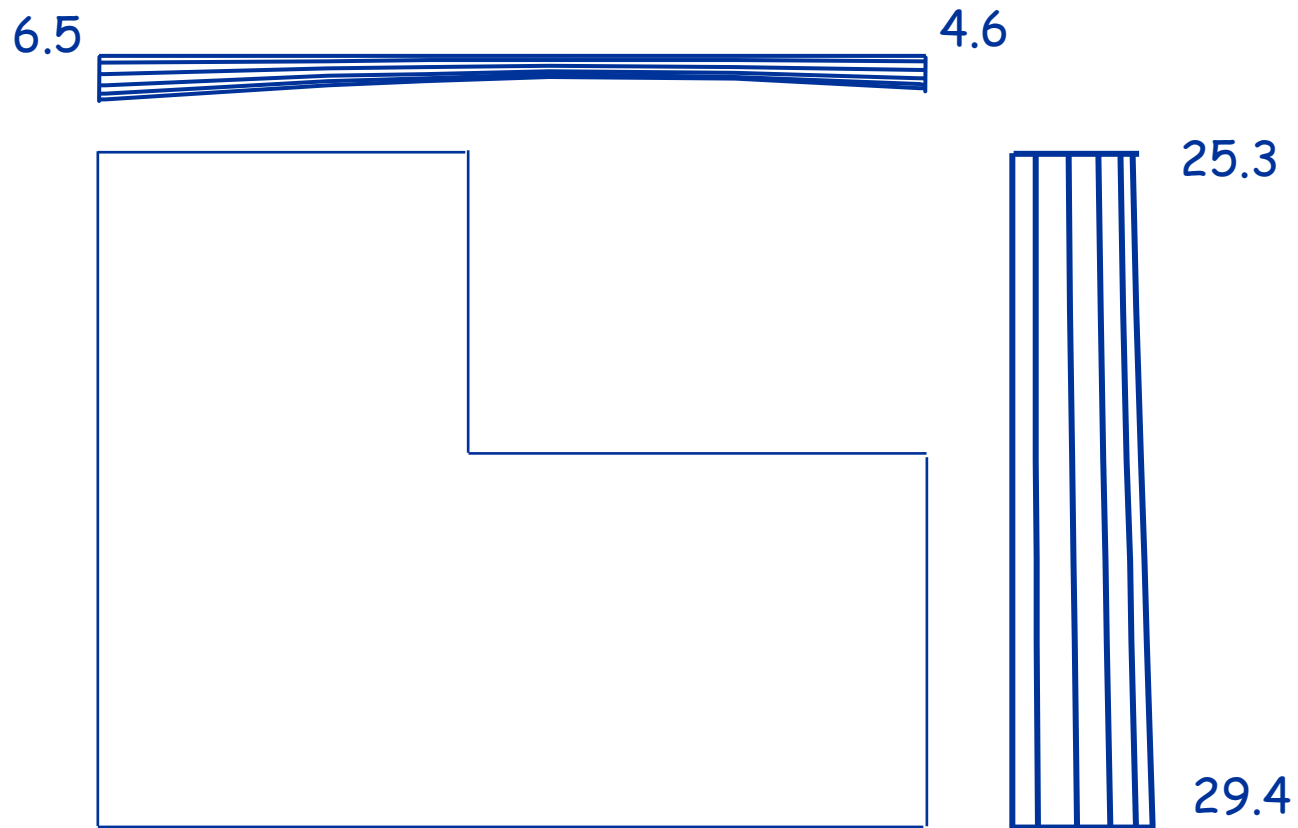
Modo 3

$T=1.16\text{ s}$

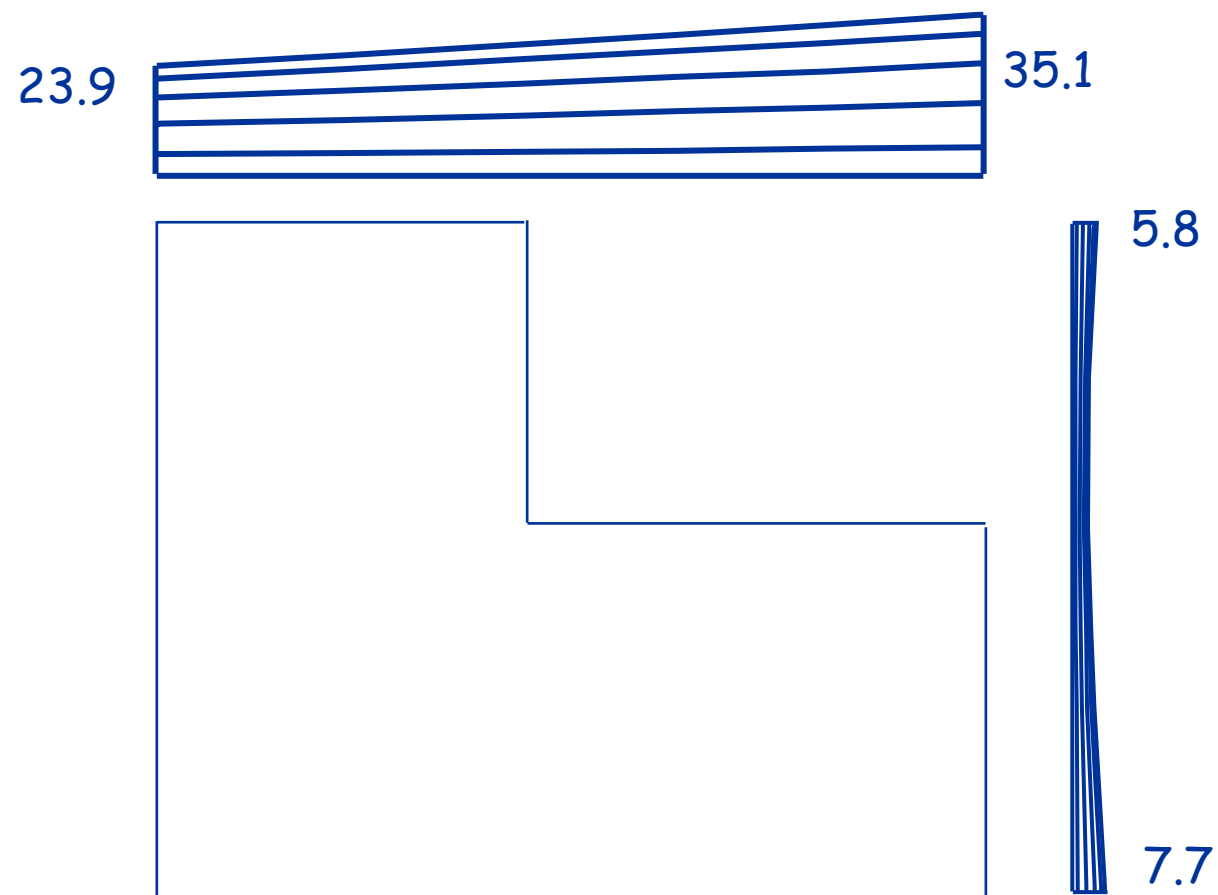
Il modo 1 è prevalente di  
traslazione secondo y

C'è un modesto accoppiamento  
con il modo 3

# Inviluppo modale sisma x



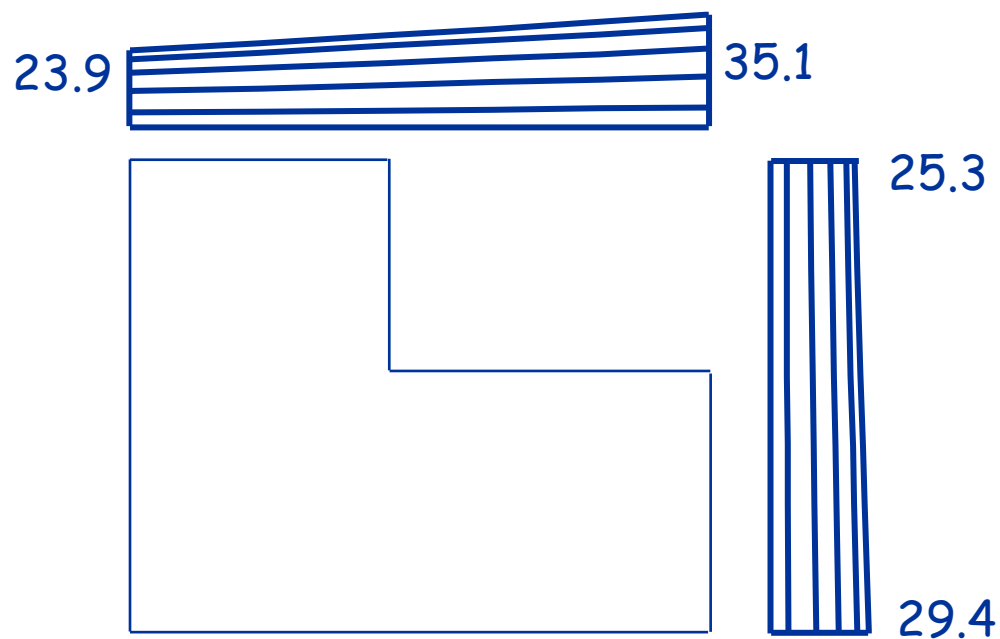
# Inviluppo modale sisma y





# Spostamenti, inviluppo modale

Piccole rotazioni per  
sisma y



gli spostamenti massimi per  
sisma y sono maggiori di  
circa il 16% rispetto a  
quelli per sisma x

La direzione y andrebbe  
irrigidita

La parte destra  
andrebbe irrigidita

Spostamenti quasi  
uniformi per sisma x

# 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

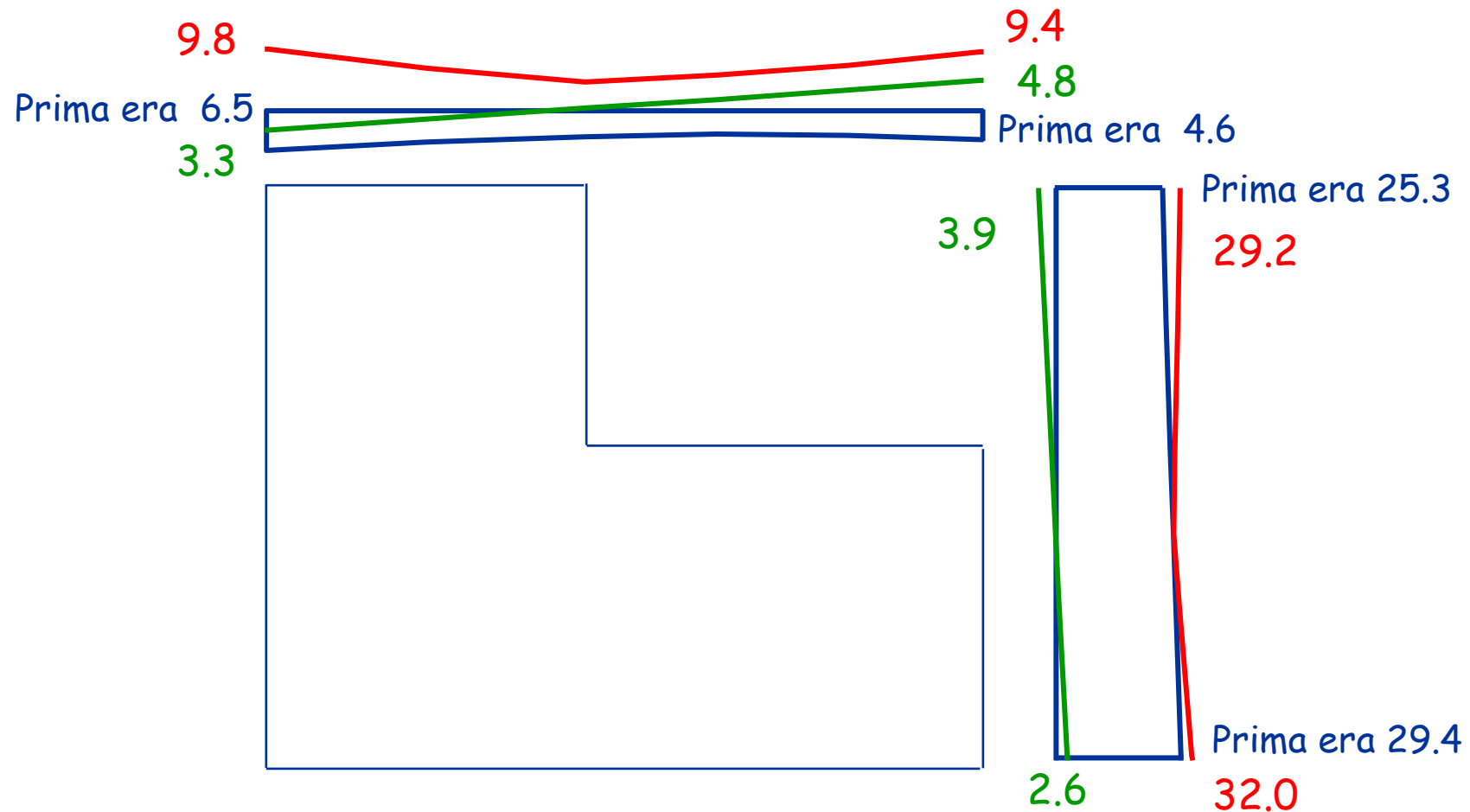
## Esame dei risultati

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

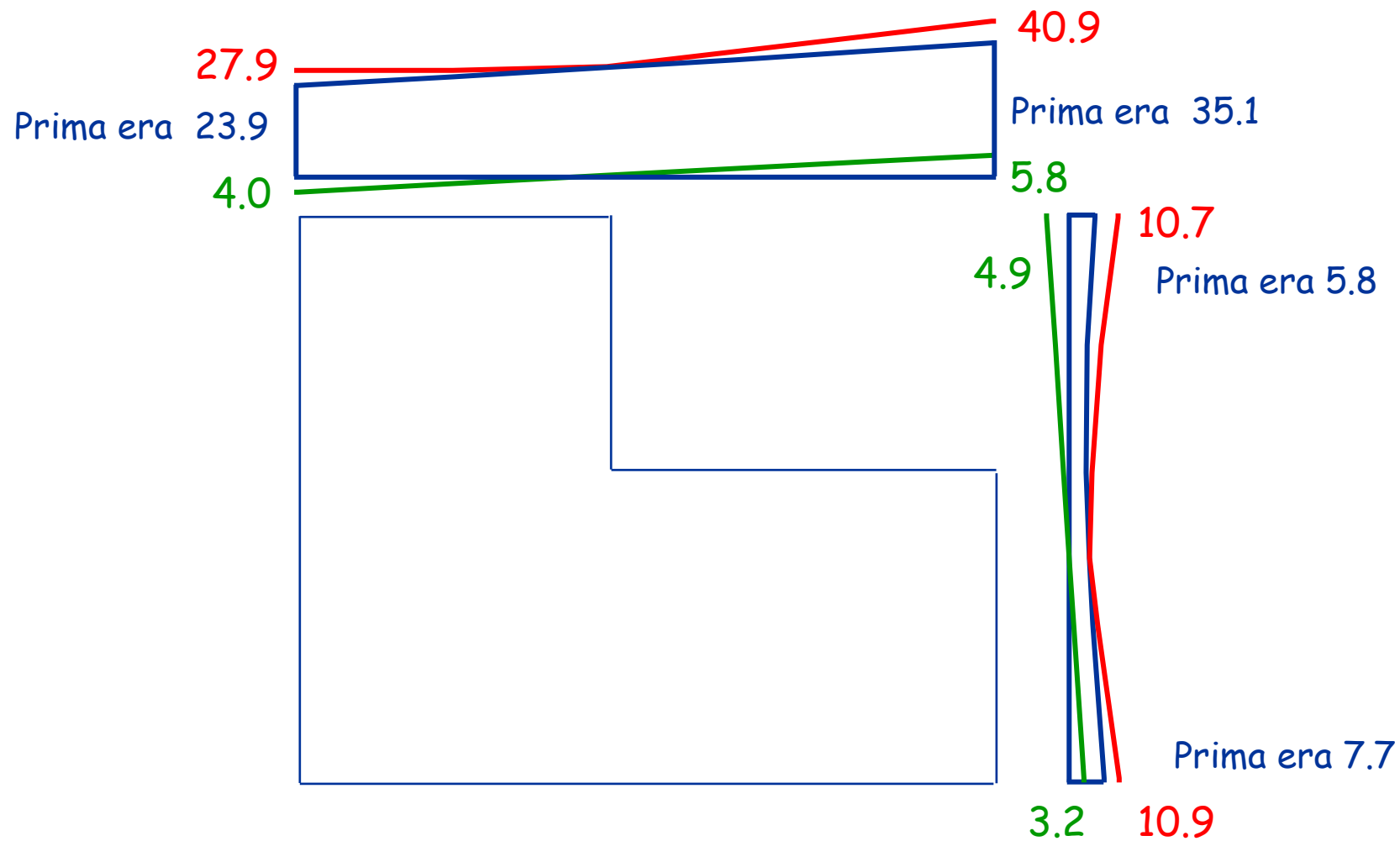
Fornisce informazioni su:

- 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 8% (inf) al 15% (sup) nel caso di azioni in direzione x
- L'incremento è del 16% (sinistra e destra) nel caso di azioni in direzione y

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

Combinazione delle azioni  
nelle due direzioni



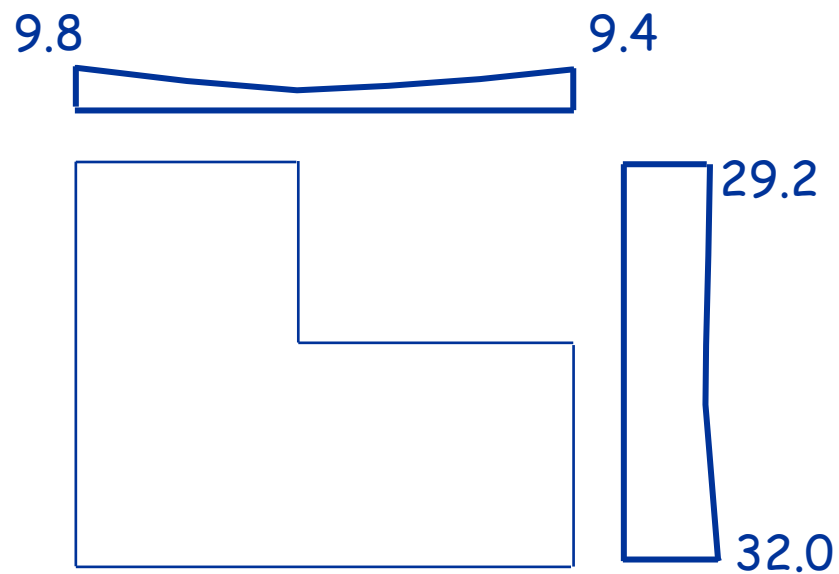
# Le componenti orizzontali

"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"

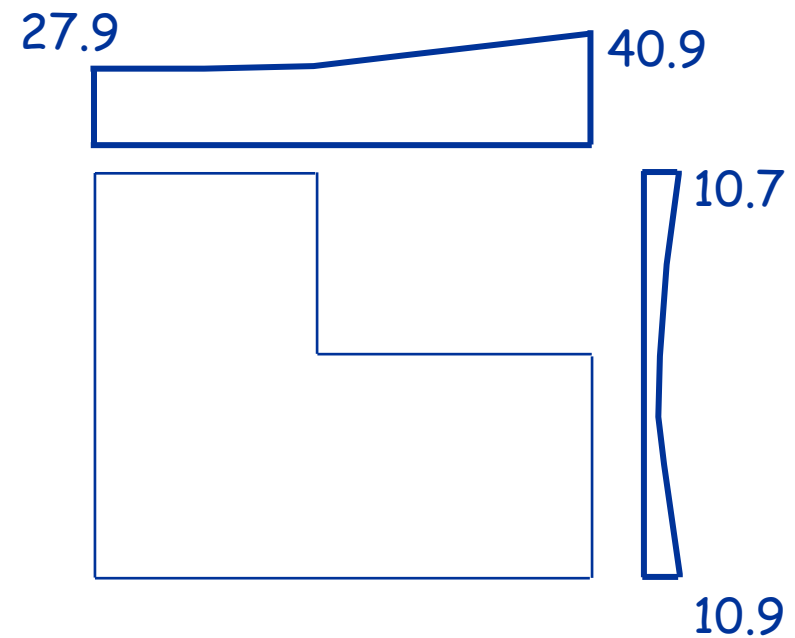
In che modo capire quanta importanza ha questa combinazione?

Ragioniamo ancora esaminando gli spostamenti

# Effetto complessivo del sisma separatamente nelle due direzioni

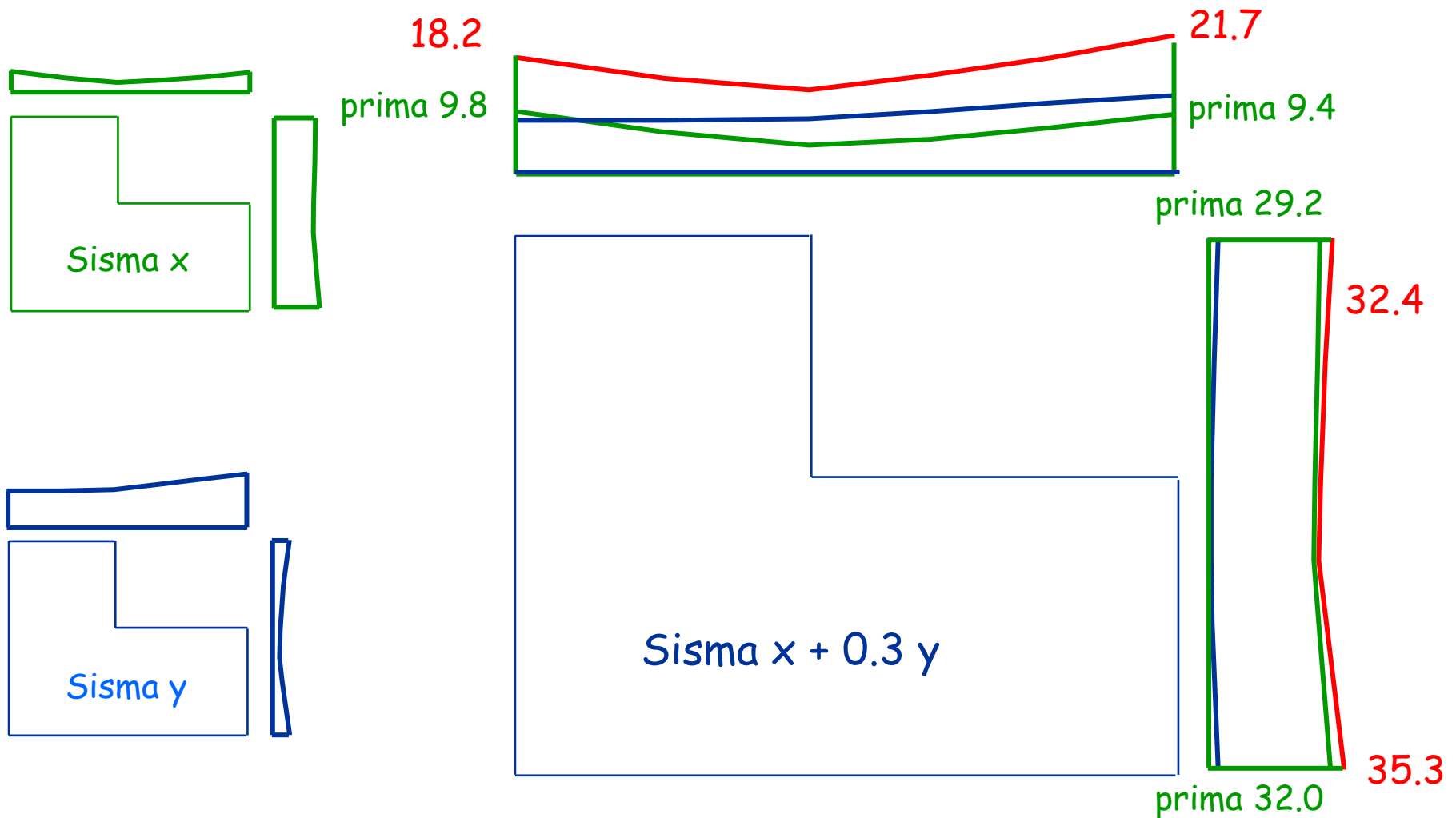


Sisma in  
direzione x

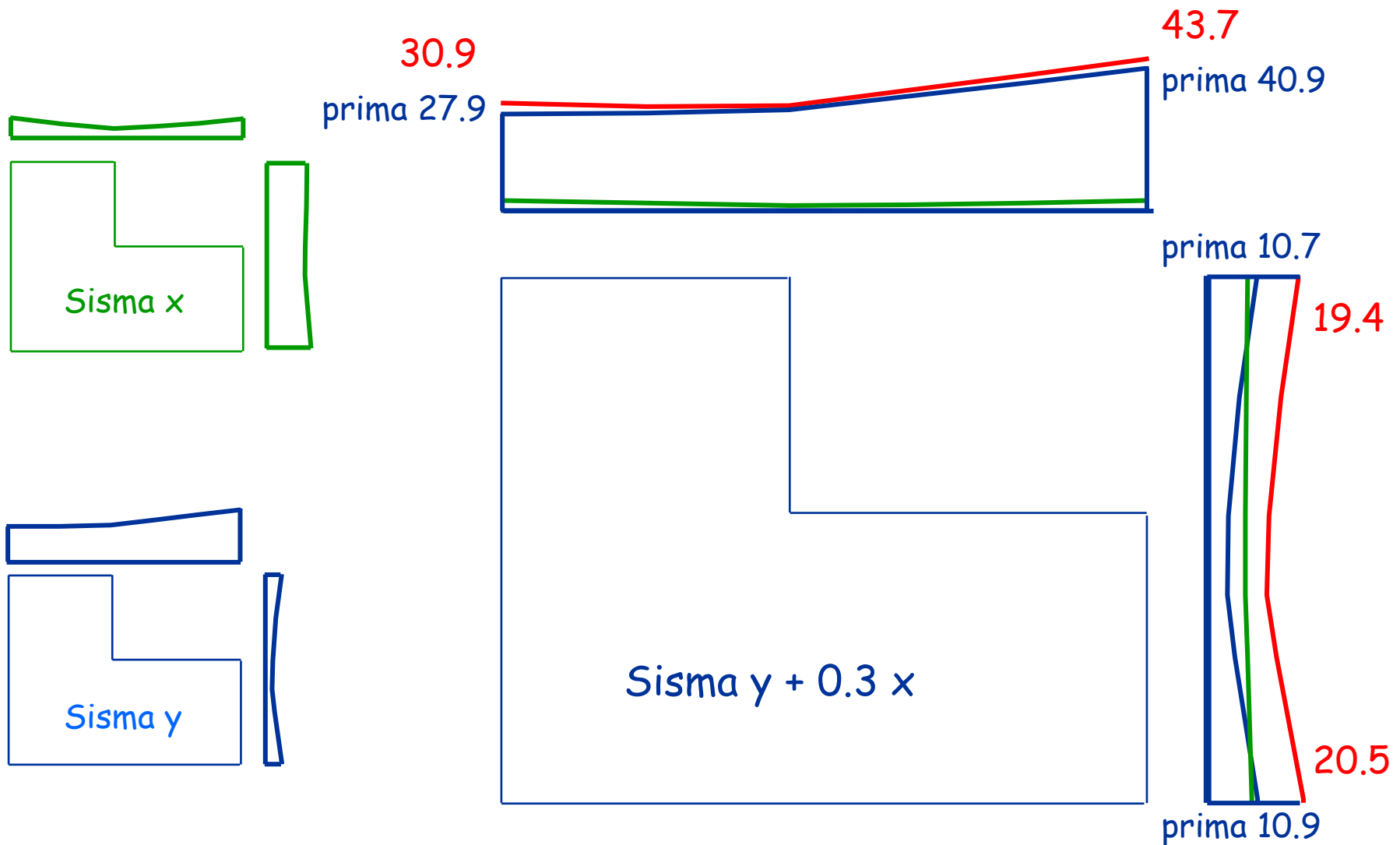


Sisma in  
direzione y

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



# Inviluppo: sisma y + 0.3 sisma x analisi modale



## Spostamenti complessivi considerazioni

- L'incremento va dal 20% (inf) al 28% (sup) nel caso di azioni in direzione x
- L'incremento va dal 29% (sin) al 25% (des) nel caso di azioni in direzione y

Incrementi di spostamento un po' maggiori di quelli ipotizzati in fase di progetto (20%)

Stato limite di danno

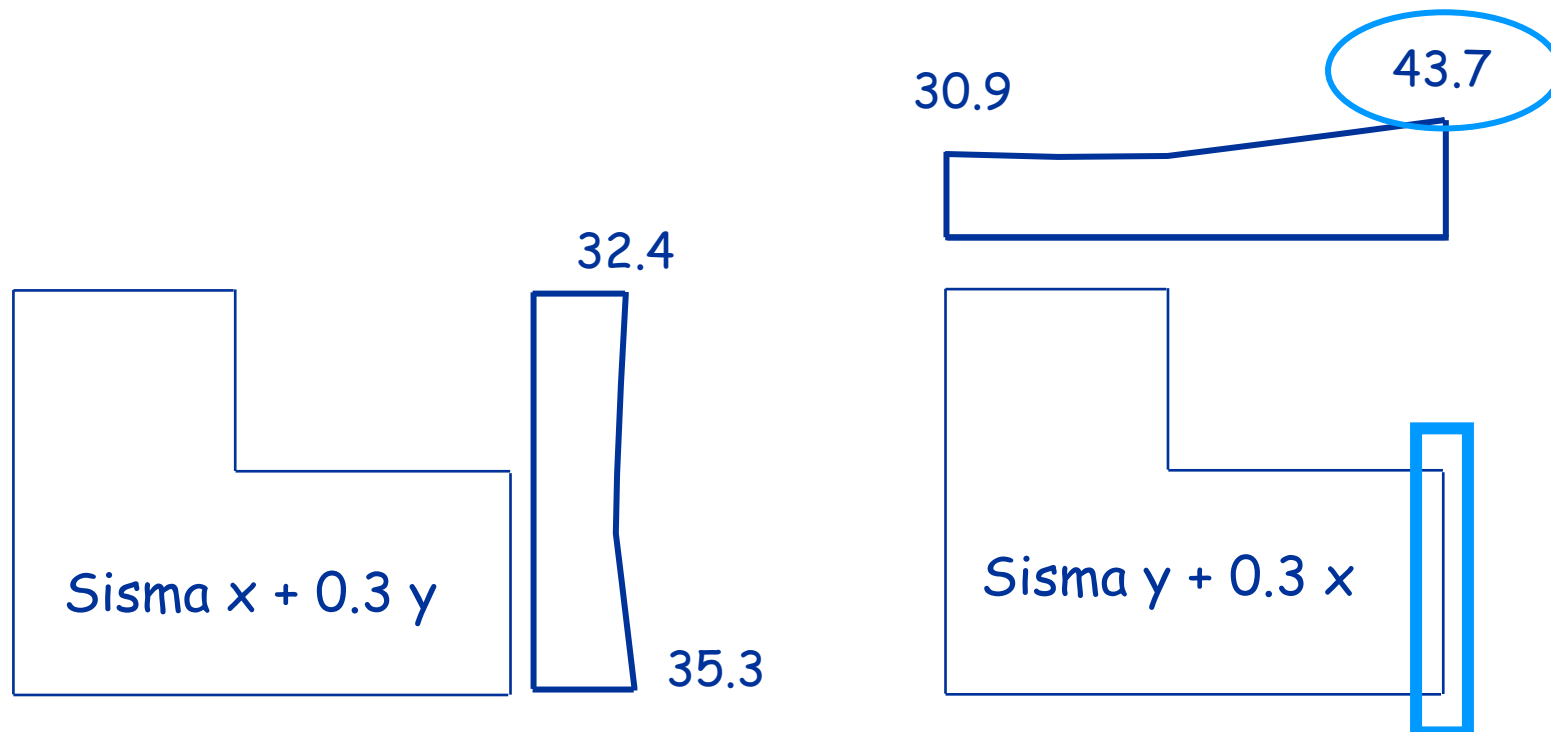
# Stato limite di danno

La verifica più condizionante è generalmente quella allo SLD.

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





# Spostamento d'interpiano per SLV telaio n. 11

Il massimo spostamento d'interpiano si riscontra al  
secondo piano

Piano	Fx	Fy	M(Fx)	M(Fy)	SismaX	SismaY	Y+0.3X
5	0.61	4.51	0.56	0.69	1.17	5.2	5.55
4	0.90	6.95	0.91	1.11	1.80	8.1	8.60
3	-1.17	8.80	1.18	1.45	2.35	10.2	10.95
2	-1.27	9.57	1.27	1.56	2.54	11.1	11.89
1	-0.80	6.19	0.80	0.97	1.60	7.2	7.64

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

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

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

# Spettri per SLU e SLD

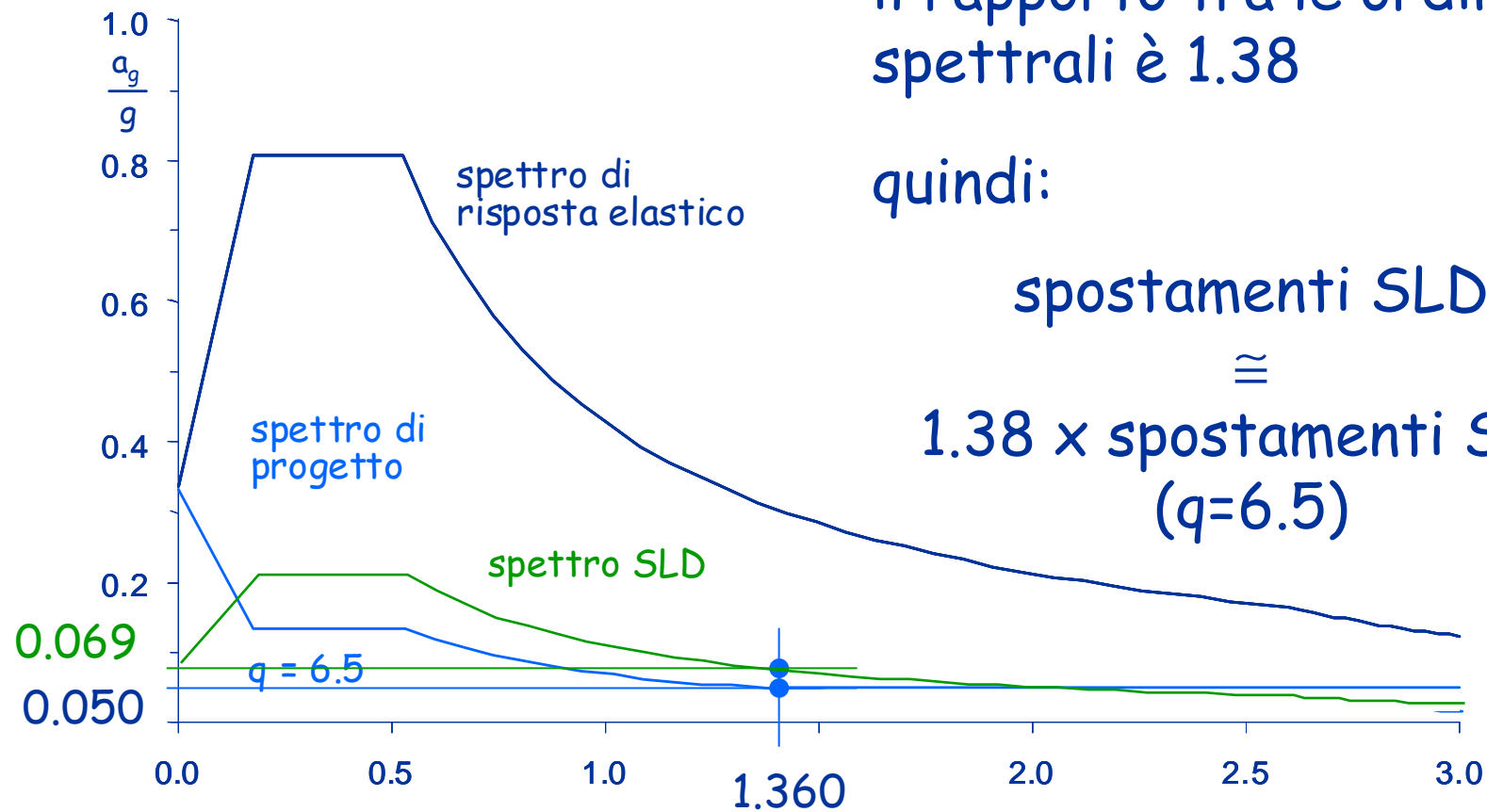
nel caso in esame, per un periodo pari a circa 1.36 s  
il rapporto tra le ordinate  
spettrali è 1.38

quindi:

spostamenti SLD

$\cong$

1.38 x spostamenti SLU  
( $q=6.5$ )



# Verifica spostamenti per SLD

Spostamento relativo accettabile:  $0.005 h$

Nel caso in esame:  $0.005 \times 3500 = 17.5 \text{ mm}$

Spostamento relativo massimo,  
fornito dall'analisi:  $1.38 \times 11.89 = 16.41 \text{ mm}$   
(al secondo piano)

La verifica è soddisfatta

Lo spostamento massimo previsto in direzione y era  
 $16.9 \text{ mm}$

## Effetto P-δ per SLV

Per le considerazioni già fatte

$$\theta = \frac{P_d \frac{S_e(T)}{S_d(T)}}{V h \Omega \frac{\alpha_u}{\alpha_1}}$$

- In direzione x:

$$\frac{S_e(1.33)}{S_d(1.33)} = \frac{0.254}{0.050} = 5.09$$

Piano	Pd/Vh	$S_e/S_d/1.3$	$\theta \times \Omega$
5	0.012	3.91	0.048
4	0.024	3.91	0.094
3	0.036	3.91	0.141
2	0.045	3.91	0.177
1	0.035	3.91	0.136

$$\Omega \theta_{\max} = 0.177$$

## Effetto P-δ per SLV

Per le considerazioni già fatte

$$\theta = \frac{P_d \frac{S_e(T)}{S_d(T)}}{V h \Omega \frac{\alpha_u}{\alpha_1}}$$

- In direzione y:

$$\frac{S_e(1.36)}{S_d(1.36)} = \frac{0.250}{0.050} = 5.00$$

Piano	Pd/Vh	$S_e/S_d/1.3$	$\theta \times \Omega$
5	0.014	3.84	0.052
4	0.026	3.84	0.102
3	0.041	3.84	0.159
2	0.051	3.84	0.198
1	0.039	3.84	0.149

$$\Omega \theta_{\max} = 0.198$$

# Verifica allo SLV

## trave

- Massimo momento flettente da carichi verticali, Previsto  
in condizione sismica  $M_q = 117 \text{ kNm}$  120 kNm
- Massimo momento flettente da sisma,  
(forze in una direzione)  $M_E = 76 \text{ kNm}$  Previsto  
87.7kNm
- Massimo momento flettente per eccentricità Previsto  
(da incrementare per  $1/(1-\theta/\Omega)$ )  $M_{Ed} = 94.5 \text{ kNm}$  105.2kNm
- Massimo momento totale Previsto  
246.3kNm  
 $M_{Ed} = 177.4 \text{ kNm}$
- Momento resistente  $M_{Rd} = 266.9 \text{ kNm}$

Ok

## Sovreresistenza $\Omega$ rispetto alla prima plasticizzazione

- Nel caso in esame, per la sezione con  $\Omega_{\min}$  si ha:  
 $M_{pl,Rd} = 266.9 \text{ kNm}$        $M_{Ed,G} = 116 \text{ kNm}$   
 $M_{Ed,E} = 60.7 \text{ kNm}$  (da incrementare per  $1/(1-\theta)$ )

$$\Omega = \frac{M_{pl,Rd} - M_{Ed,G}}{M_{Ed,E} \frac{1}{1-\theta}} \quad \theta = \frac{0.198}{\Omega}$$

Si ottiene:

$$\Omega = 2.05 \quad \theta = 0.10 \quad \frac{1}{1-\theta} = 1.11$$

# Verifica colonna, lato rigido con gerarchia specifica per acciaio

La colonna è soggetta a presso-flessione deviata

- Momento sollecitante per effetto degli spostamenti in direzione y

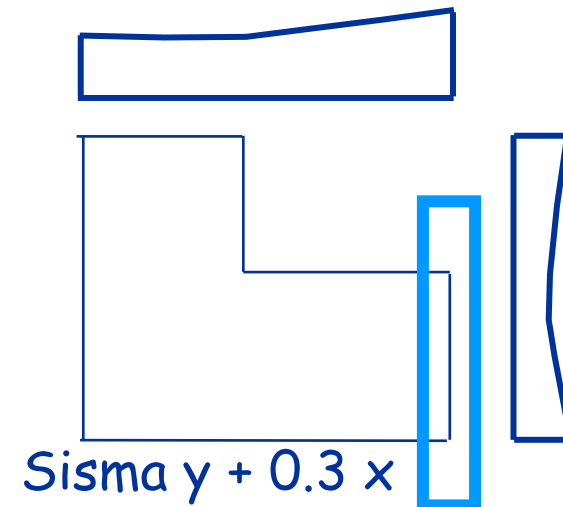
$$M_{Ed,x} = M_{Ed,G} + 1.1 \gamma_{Rd} \Omega M_{Ed,E}$$

- Momento sollecitante per effetto degli spostamenti in direzione x

$$M_{Ed,y} = M_{Ed,G} + M_{Ed,E}$$

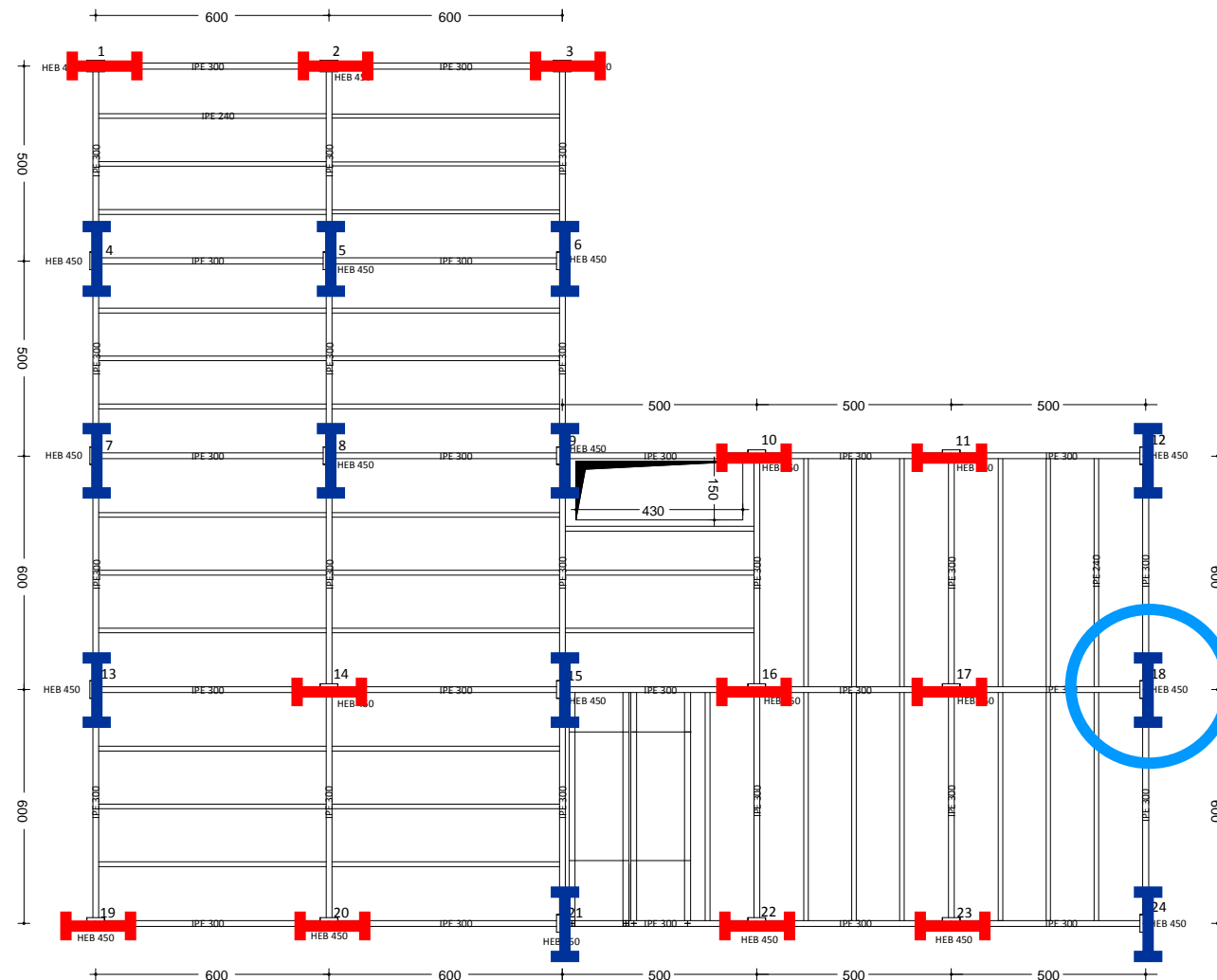
- Sforzo normale

$$N_{Ed,x} = N_{Ed,G} + 1.1 \gamma_{Rd} \Omega N_{Ed,E}$$



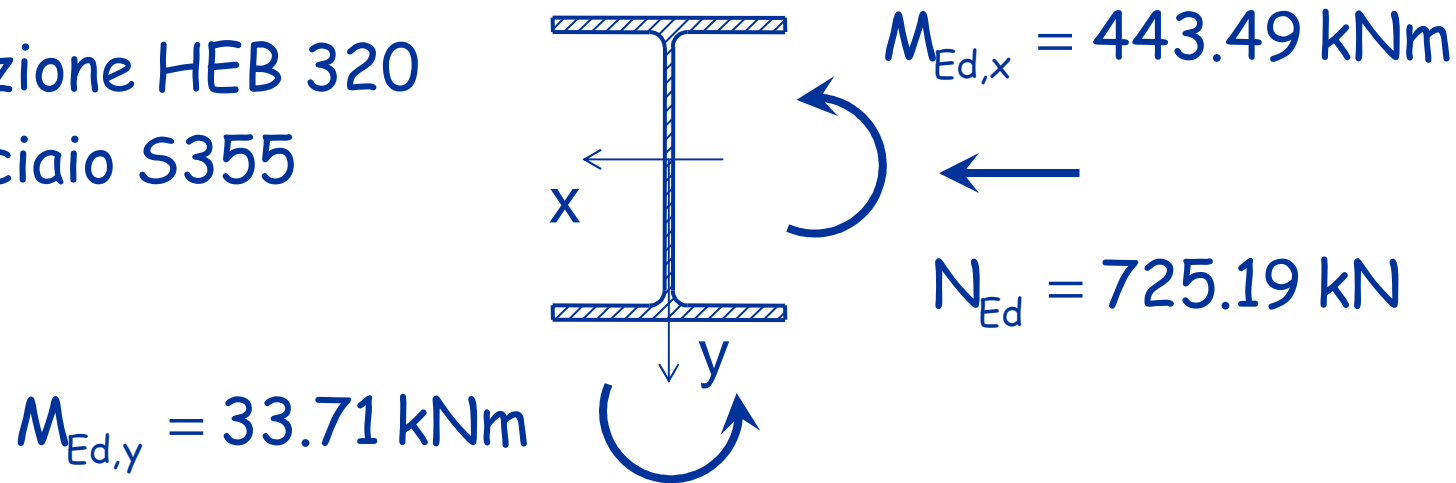


# Verifica colonna, lato rigido con gerarchia specifica per acciaio



# Verifica colonna, lato rigido con gerarchia specifica per acciaio

Sezione HEB 320  
Acciaio S355



$$M_{Ed,x} = 0.04 + 1.1 \times 1.15 \times 2.053 \times 154.07 \times 1.11 = 443.49 \text{ kNm}$$

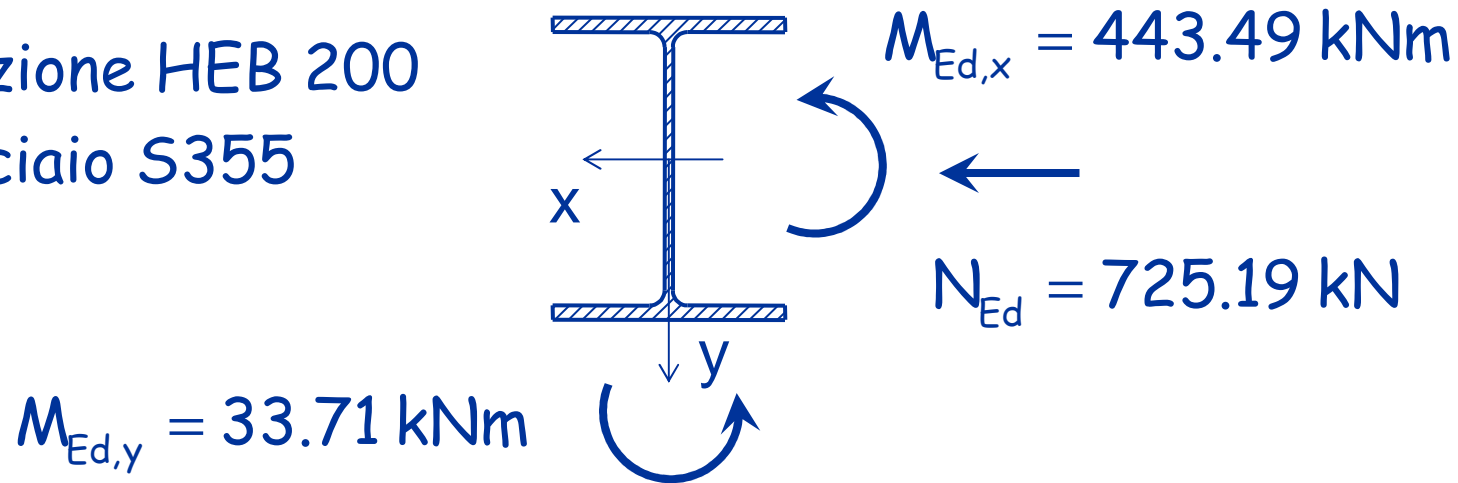
$$M_{Ed,y} = 12.11 + 20.00 \times 1.08 = 33.71 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = 677.8 + 43.88 \times 1.08 = 725.19 \text{ kN}$$

Incrementi per  
effetto p-  $\delta$  nelle  
due direzioni

# Verifica colonna, lato rigido con gerarchia specifica per acciaio

Sezione HEB 200  
Acciaio S355

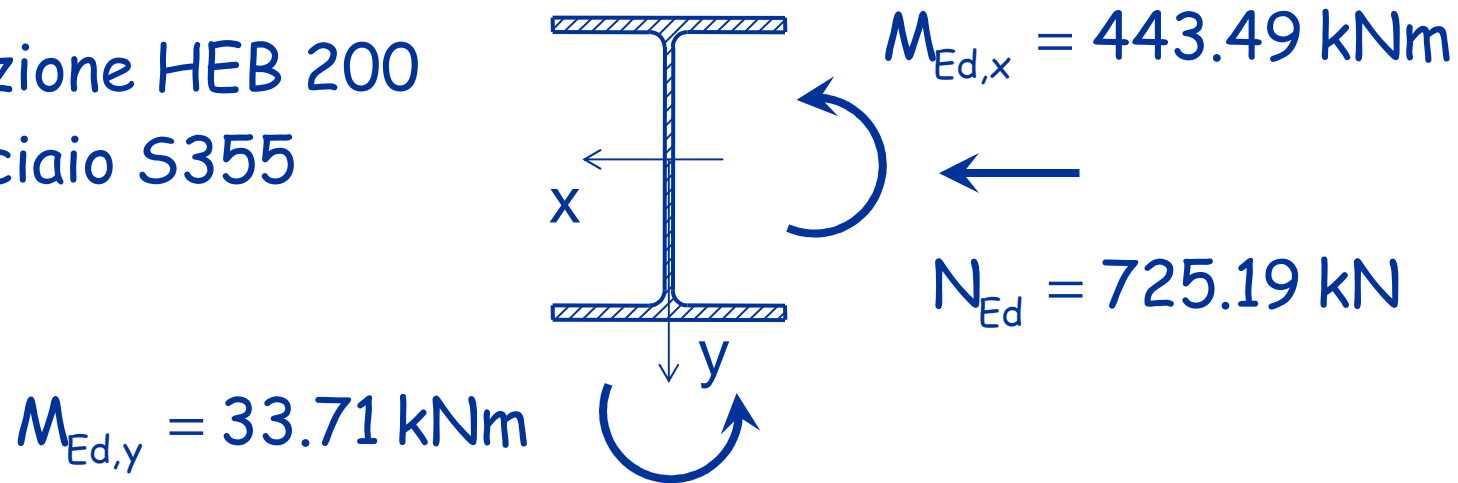


$$\left( \frac{M_{Ed,x}}{M_{N,x,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} \right)^{5n} \leq 1 \quad \text{se} \quad n \geq 0.20$$

$$\left( \frac{M_{Ed,x}}{M_{N,x,Rd}} \right) + \left( \frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} \right) \leq 1 \quad \text{se} \quad n < 0.20$$

# Verifica colonna, lato rigido con gerarchia specifica per acciaio

Sezione HEB 200  
Acciaio S355



$$N_{pl,Rd} = 5205.6 \text{ kN}$$

$$M_{N,Rd,x} = 677.42 \text{ kNm} \rightarrow$$

$$M_{N,Rd,y} = 303.7 \text{ kNm}$$

$$n = 0.14$$

$$\left( \frac{443.49}{677.42} \right) + \left( \frac{33.71}{303.7} \right) = 0.77$$

Ok