

Corso

Progetto di strutture in zona sismica

Catania

ottobre - dicembre 2016

17 - Edifici con pareti: dimensionamento, verifica di massima,
analisi e giudizio sulla struttura

21 dicembre 2016

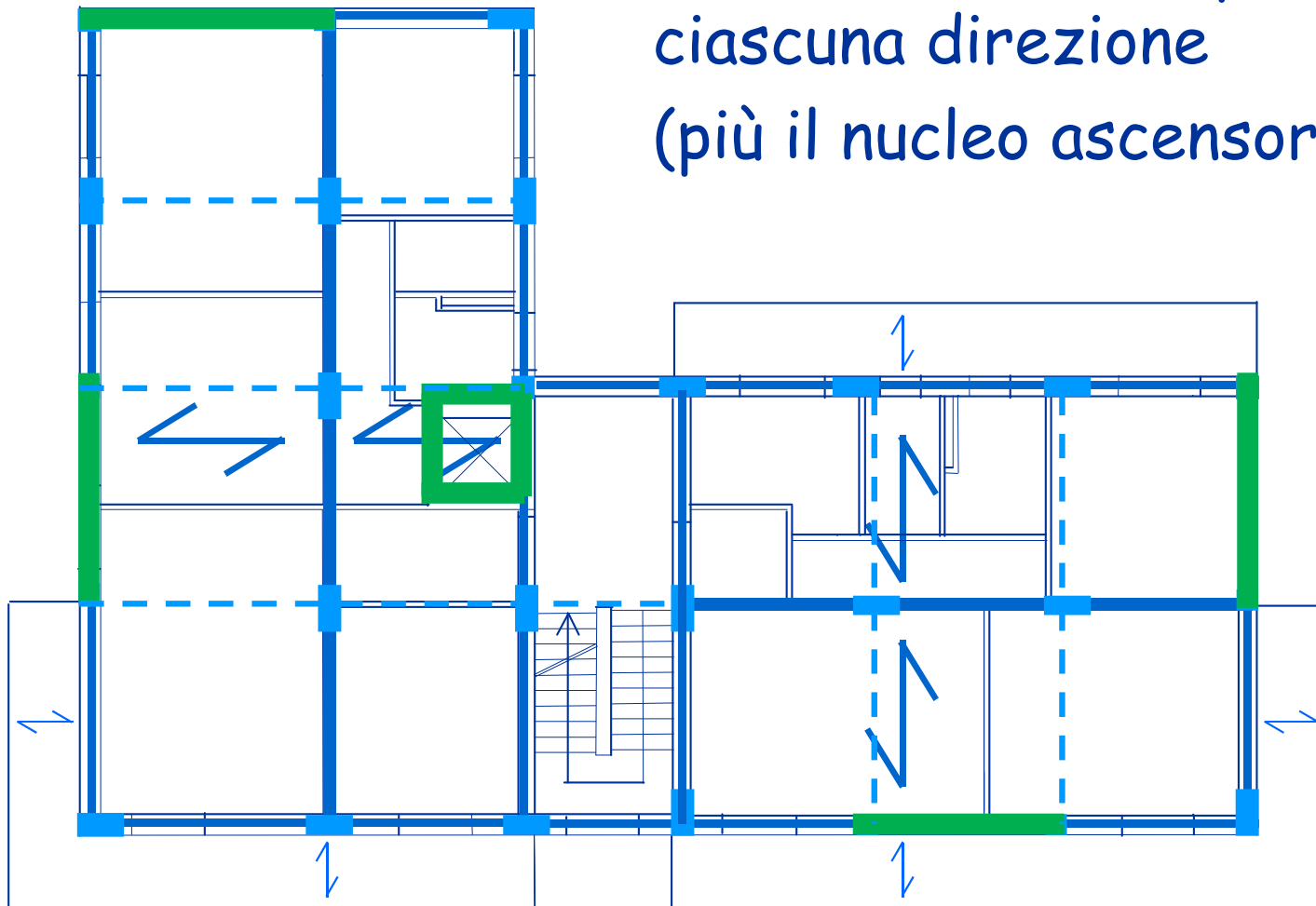
Aurelio Gheresi

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
- 4. Analisi strutturale dettagliata e verifica del comportamento della struttura
- 5. Definizione delle armature ed elaborati grafici

Impostazione della carpenteria per il sisma

Soluzione con due pareti per
ciascuna direzione
(più il nucleo ascensore)



Dimensionamento solaio, travi, pilastri

- Il dimensionamento può essere effettuato con riferimento ai soli carichi verticali (in assenza di sisma)

Solaio

- In funzione della luce, in modo da non avere problemi di deformazioni
- Aumentare lo spessore se vi sono travi a spessore lunghe e molto caricate

Nell'esempio si è scelto uno spessore $s = 22 \text{ cm}$

Carichi unitari

Una volta definito lo spessore, si possono calcolare i carichi unitari

	g_k	q_k	SLU solo c.v	SLU con F	
Solaio del piano tipo (incluso tramezzi)	5.2	2.0	10.0	5.8	kN/m ²
Solaio di copertura	4.0	2.0	8.5	4.8	
Solaio torrino scala	3.4	0.5	5.2	3.4	
Sbalzo piano tipo	4.2	4.0	11.5	6.6	
Sbalzo copertura	3.9	0.5	5.8	3.9	
Scala	5.0	4.0	12.5	7.4	
Tamponature	7.0		9.1	7.0	kN/m
Tramezzi	3.0		3.9	3.0	

Dimensionamento solaio, travi, pilastri

- Il dimensionamento può essere effettuato con riferimento ai soli carichi verticali (in assenza di sisma)

Travi

- In funzione della luce e dei carichi, valutati per aree (o meglio larghezze) di influenza
- Definire una sezione unica per tutte le travi emergenti
- Eventualmente, abbondare un po' per tener conto del sisma
- Travi di collegamento: sezione minima



Altri carichi unitari

Una volta definita la sezione delle travi, si può completare l'analisi dei carichi unitari (kN/m)

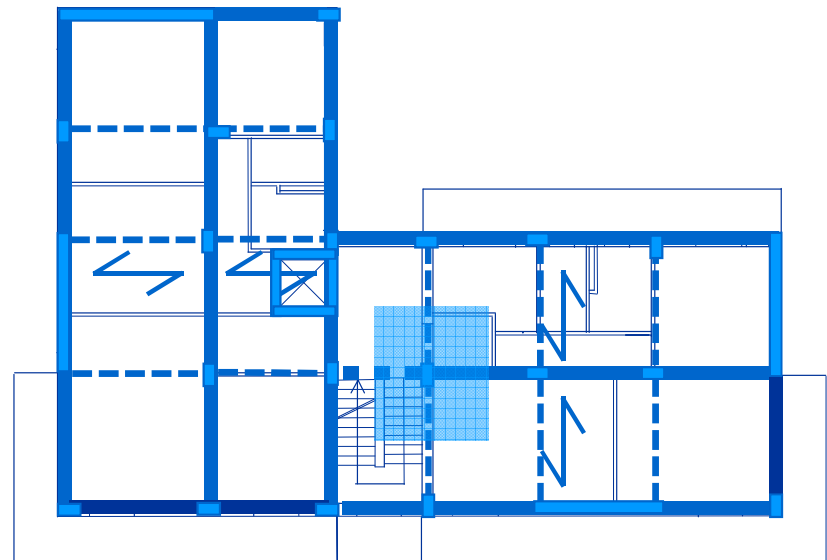
	g_k	q_k	SLU solo c.v	SLU con F	kN/m
Travi 30 x 50	2.9		3.8	2.9	
Travi 60 x 22	2.2		2.9	2.2	

Dimensionamento solaio, travi, pilastri

- Il dimensionamento può essere effettuato con riferimento ai soli carichi verticali (in assenza di sisma)

Pilastri

- In funzione dei carichi, valutati per aree di influenza
- Si può usare una tensione media fino a f_{cd} (meglio $0.8 f_{cd}$)
- Usare max 2-3 sezioni diverse al primo ordine
- Mantenerle costanti o ridurle di poco ai piani superiori
- Non ridurli mai a dimensioni minori di quelle delle travi



Dimensionamento solaio, travi, pilastri

- Pilastri, nell'esempio:

Tipo di pilastro	N_{Ed}	Sezione scelta
Pilastri caricati (20)	1560 - 1640 kN	30 x 50
Pilastri perimetrali (2)	930 kN	30 x 50
Pilastri d'angolo (1)	570 kN	30 x 50

La sezione 30x50 non crea problemi architettonici e non comporta costi eccessivi

La si mantiene invariata per tutta l'altezza

Riepilogo dimensioni solaio, travi, pilastri

- Solaio spessore 22 cm
- Travi emergenti 30x50
Travi a spessore 60x22
- Pilastri 30x50

Le dimensioni degli elementi strutturali sono uguali a tutti i piani

Dimensionamento pareti

- Il dimensionamento deve essere effettuato in funzione dell'azione sismica
- Procedimento:
 - Valutazione masse
 - Definizione fattore di struttura
 - Valutazione forze (per analisi statica)
 - Calcolo del taglio alla base
 - Dimensionamento pareti a taglio
 - Previsione del momento flettente e verifica dimensioni pareti

Masse

- In un edificio in cemento armato il peso delle masse di piano corrisponde in genere ad una incidenza media di $8\div 11 \text{ kN/m}^2$

È leggermente più alto in questo caso, per il peso delle pareti

Una valutazione di prima approssimazione del peso delle masse a ciascun piano può essere ottenuta moltiplicando la superficie totale dell'impalcato per 11 kN/m^2 (9 kN/m^2 in copertura, per la minore incidenza delle tamponature)

Esempio - masse

La superficie degli impalcati nell'edificio in esame è

Torrino scala: $S = 48.0 \text{ m}^2$

VI impalcato: $S = 331.9 \text{ m}^2$

Piano tipo: $S = 323.5 \text{ m}^2$

I impalcato: non considerato
per azione sismica

Nota: il torrino scala può essere accorpato al 5° impalcato, ottenendo

Torrino + V impalcato: $S = 379.9 \text{ m}^2$

Esempio - masse

Impalcato	Superficie m ²	Incidenza kN/m ²	Peso kN
Torrino + VI	379.9	9.0	3419
V, IV, III, II	323.5	11.0	3559
I	--	--	--

Peso totale = 16359 kN

Spettro di progetto

È ottenuto dividendo lo spettro di risposta elastica per il fattore di struttura q

$$q = q_0 K_R$$

Nell'esempio:

$q_0 = 4.0 \alpha_u / \alpha_1$ struttura a pareti - CD "A"
con $\alpha_u / \alpha_1 = 1.0$ se vi sono 2 sole pareti per
direzione, 1.1 se sono più di 2

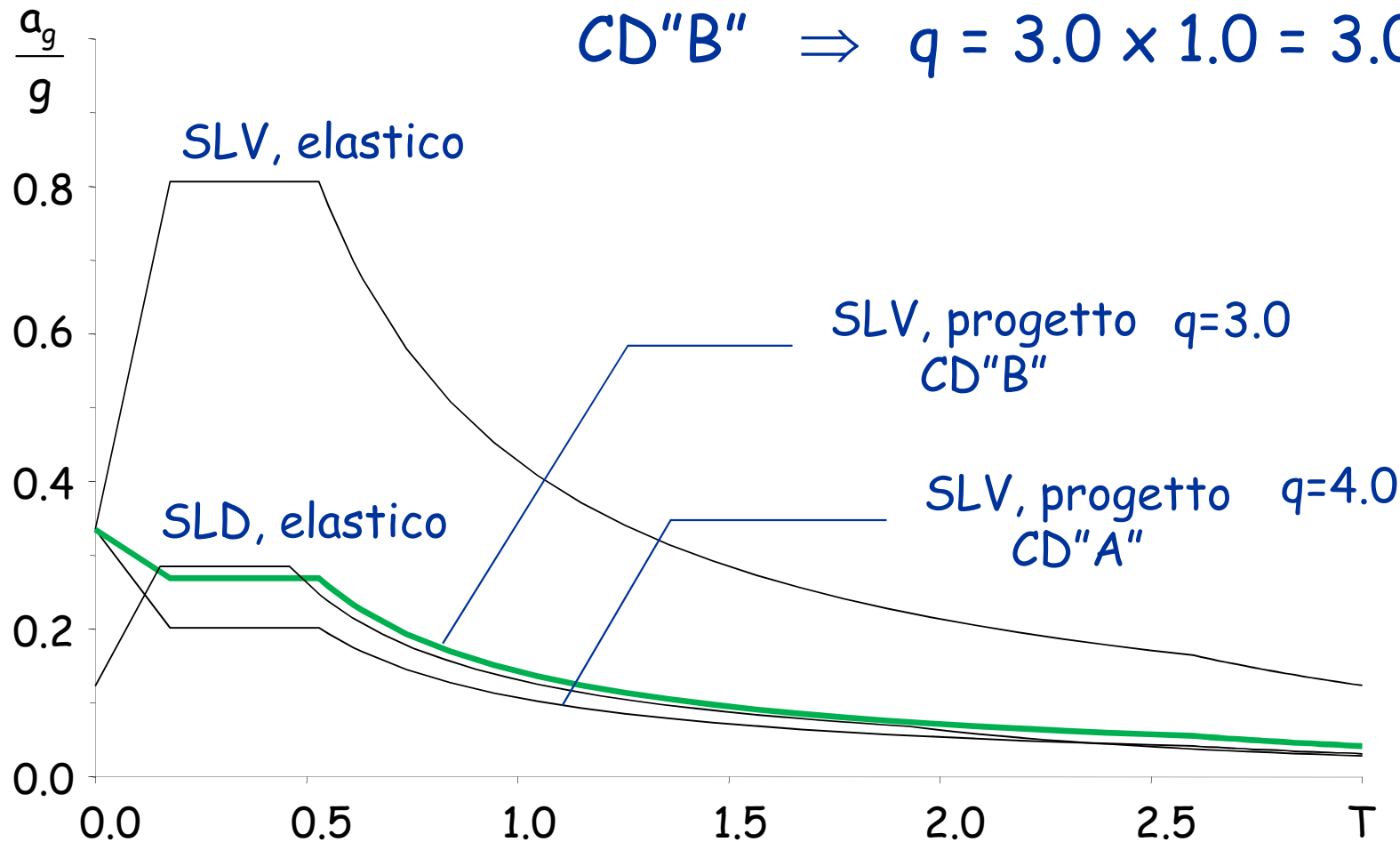
$q_0 = 3.0$ struttura a pareti - CD "B"

$K_R = 1$ la struttura è regolare in altezza

Spettro di progetto

Ipotizzo di realizzare la struttura a bassa duttilità

$$CD''B'' \Rightarrow q = 3.0 \times 1.0 = 3.0$$



Ordinata spettrale

Dipende dal periodo

Si può assumere $T_1 = C_1 H^{3/4}$

con

$$C_1 = 0.050$$

per strutture diverse da quelle
intelaiate in acciaio e c.a.

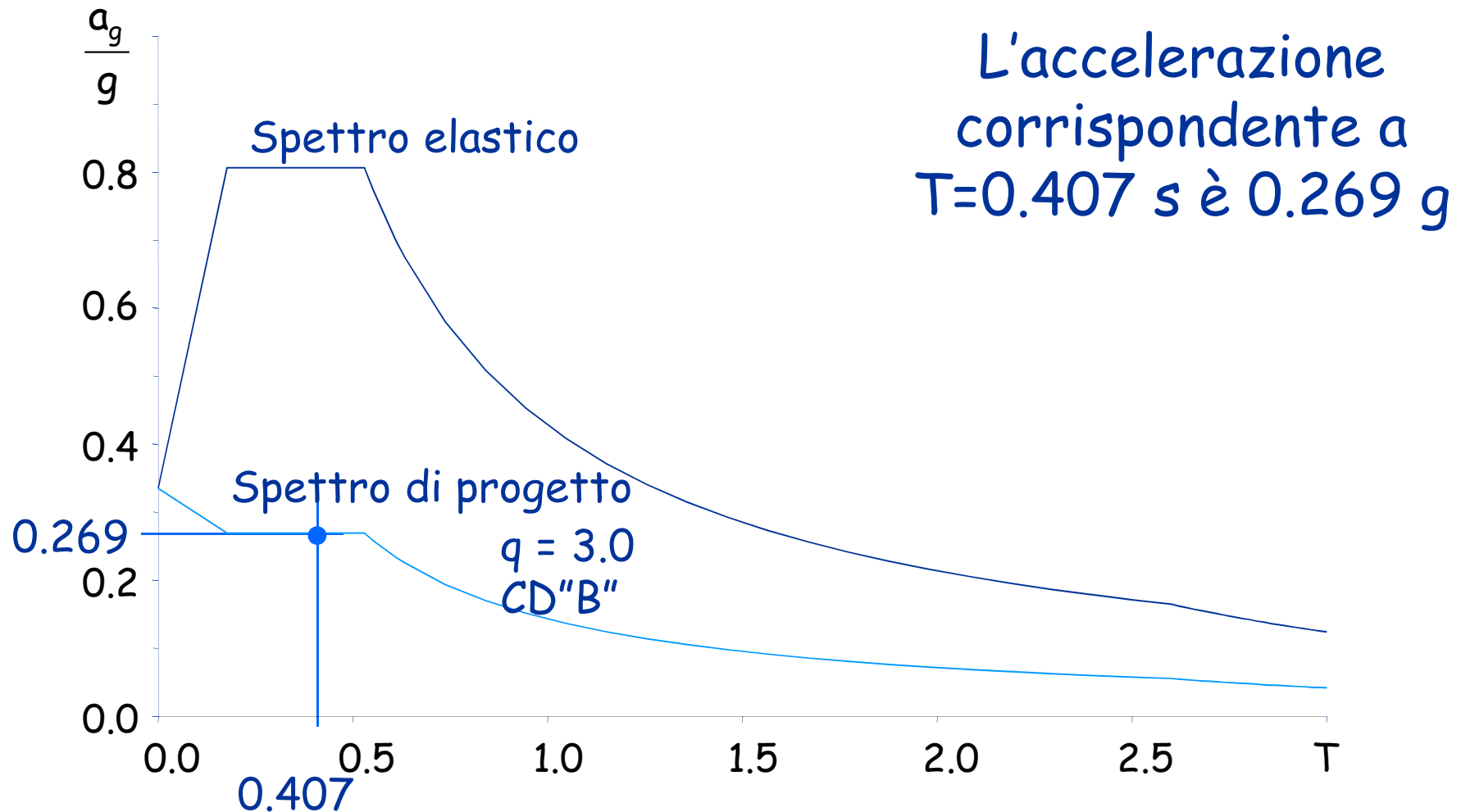
H = altezza dell'edificio dal
piano di fondazione (m)

Nell'esempio:

$H = 16.40$ m (escluso torrino e
piano cantinato)

$$T_1 = 0.050 \times 16.40^{3/4} = 0.407 \text{ s}$$

Esempio - ordinata spettrale



Forze per analisi statica

Taglio alla base $V_b = 0.85 \sum_{i=1}^n m_i S_d(T_1) =$
 $= 0.85 \times 17655 \times 0.269 = 4036.8 \text{ kN}$

Forza al piano $F_k = \frac{m_k z_k}{\sum_{i=1}^n m_i z_i} V_b$

Forze per analisi statica

Piano	Peso W (kN)	Quota z (m)	Wz (kNm)	Forza F (kN)	Taglio V (kN)
6+torrino	3419	16.40	56072	1288.6	1288.6
5	3559	13.20	46979	1079.6	2368.3
4	3559	10.00	35590	817.9	3186.2
3	3559	6.80	24201	556.2	3742.4
2	3559	3.60	12812	294.4	4036.8
somma	17655		175654		

Come dimensionare le pareti?

1. Partire dal taglio alla base, incrementandolo per tenere conto dell'eccentricità accidentale
2. Incrementare i valori per garantire la plasticizzazione a flessione prima della rottura a taglio (gerarchia delle resistenze)
3. Determinare la sezione complessiva occorrente per sopportare il taglio alla base (incrementato)
4. Distribuire la sezione complessiva tra le pareti allungate nella direzione del sisma in modo da evitare eccentricità strutturale
5. Valutare se mantenere la sezione costante a tutta altezza o ridurla progressivamente

Come dimensionare le pareti?

1. Incrementare i valori per tenere conto dell'eccentricità accidentale

Se la struttura è molto rigida torsionalmente, incrementare del 10%

$$V_{Ed} = 4036.8 \text{ kN} \times 1.1 = 4440.5 \text{ kN}$$

Come dimensionare le pareti?

2. Partire dal taglio alla base, incrementandolo per garantire la plasticizzazione a flessione prima della rottura a taglio (gerarchia delle resistenze)

Si deve tener conto di:

- Effetto dei modi superiori
- Possibile sovraresistenza a flessione

Per farlo, si può moltiplicare per 1.5 a tutti i piani nel caso di CD "B" (un po' di più per CD "A")

$$V_{Ed} = 4440.5 \text{ kN} \times 1.5 = 6660.7 \text{ kN}$$

Come dimensionare le pareti?

3. Determinare la sezione complessiva occorrente per sopportare il taglio alla base (incrementato), invertendo la formula di verifica a taglio del calcestruzzo ($V_{Rd,max}$)



$$L_{tot} = \frac{V_{Ed}}{0.8 \alpha_c f'_{cd} b_w} \frac{1 + \cot^2 \theta}{\cot \theta} = 5 \div 7.25 \frac{V_{Ed}}{b_w f_{cd}}$$

$$1 \leq \cot \theta \leq 2.5 \quad \text{per CD "B"}$$

Come dimensionare le pareti?

3. Determinare la sezione complessiva occorrente per sopportare il taglio alla base (incrementato), invertendo la formula di verifica a taglio del calcestruzzo ($V_{Rd,max}$)

assumo $b_w = 30 \text{ cm}$

consiglio di usare $5.5 \div 6$ nell'espressione ($\cot \theta = 1.5 \div 2$)

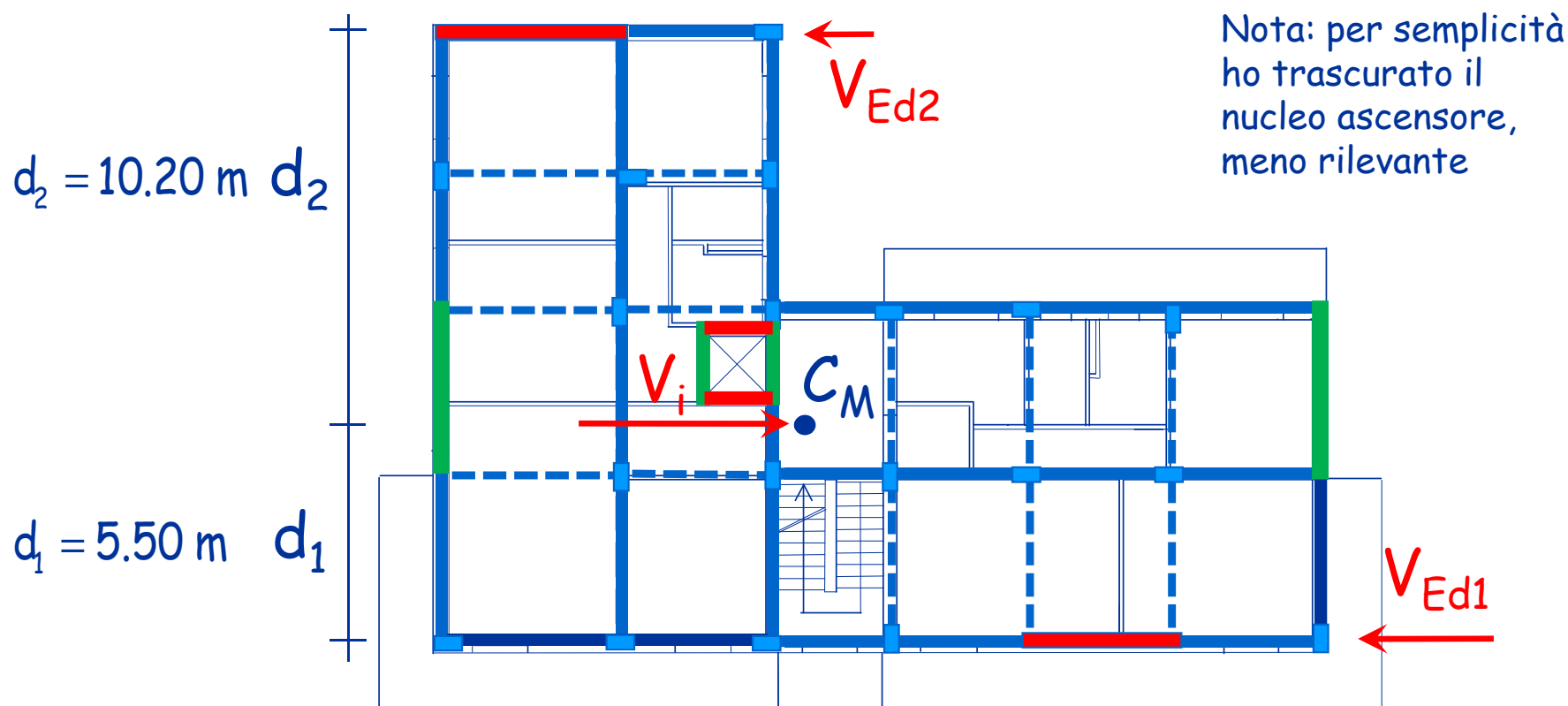
$$L_{tot} = 5.5 \frac{V_{Ed}}{b_w f_{cd}} = 5.5 \times \frac{6660.7}{0.30 \times 14.2} \times 10^{-3} = 8.60 \text{ m}$$

Questo valore può essere utile per scegliere se mettere solo due oppure più pareti

Come dimensionare le pareti?

Pareti in direzione x

4. Distribuire la sezione complessiva tra le pareti allungate nella direzione del sisma in modo da evitare eccentricità strutturale - caso con 2 pareti



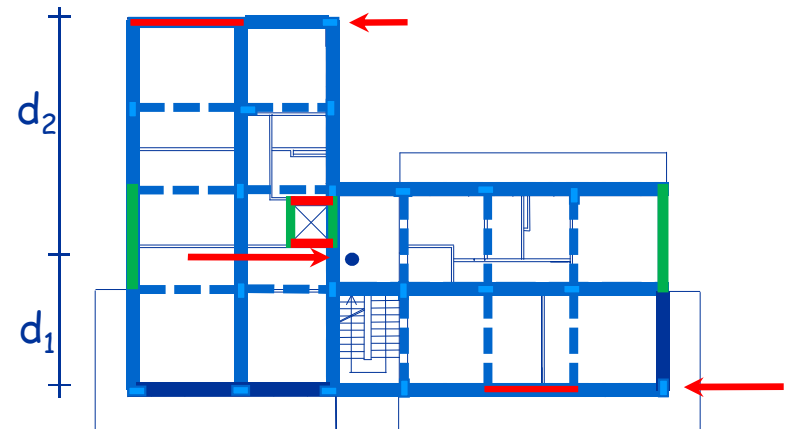
Come dimensionare le pareti?

Pareti in direzione x

4. Distribuire la sezione complessiva tra le pareti allungate nella direzione del sisma in modo da evitare eccentricità strutturale - caso con 2 pareti

La resistenza è proporzionale all'area della parete (e quindi alla sua lunghezza l_w)

La rigidezza flessionale è proporzionale al momento d'inerzia della parete (e quindi al cubo della sua lunghezza l_w)



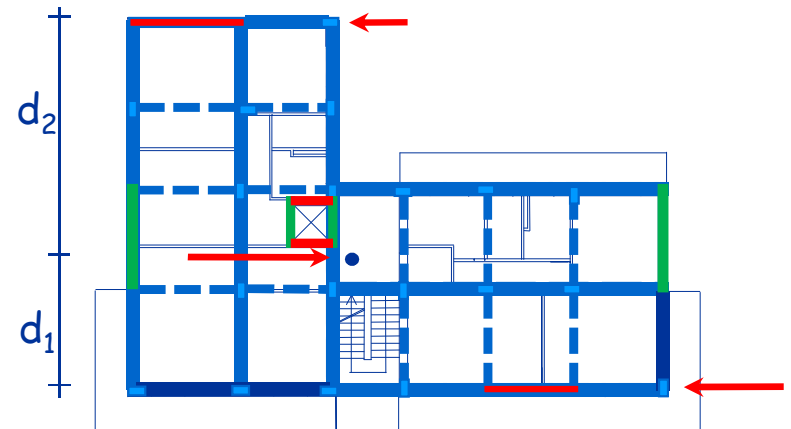
Come dimensionare le pareti?

Pareti in direzione x

4. Distribuire la sezione complessiva tra le pareti allungate nella direzione del sisma in modo da evitare eccentricità strutturale - caso con 2 pareti

La resistenza è proporzionale all'area della parete (e quindi alla sua lunghezza l_w)

La rigidezza flessionale è proporzionale al momento d'inerzia della parete (e quindi al cubo della sua lunghezza l_w)



Come dimensionare le pareti?

Pareti in direzione x

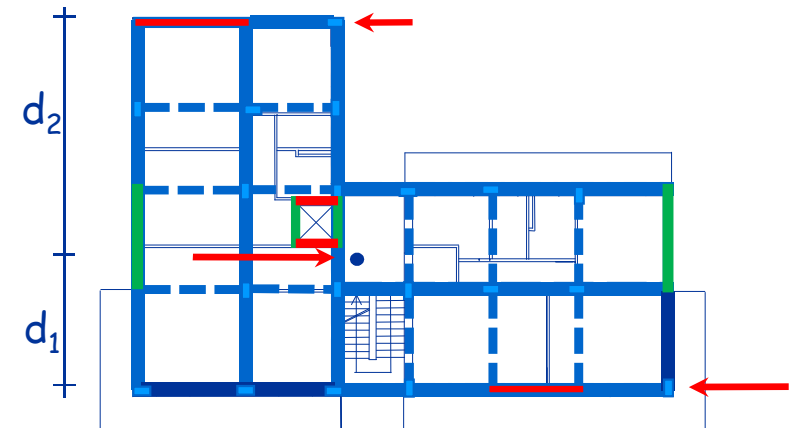
4. Distribuire la sezione complessiva tra le pareti allungate nella direzione del sisma in modo da evitare eccentricità strutturale - caso con 2 pareti

Per l'equilibrio alla rotazione occorre ripartire la lunghezza totale in maniera inversamente proporzionale alla distanza

$$l_{w,1} = \frac{d_2}{d_1 + d_2} l_{w,tot}$$

Ma anche mantenere le lunghezze inversamente proporzionali alla radice cubica della distanza

$$l_{w,2} = \frac{\sqrt[3]{d_1}}{\sqrt[3]{d_2}} l_{w,1}$$



$$d_1 = 5.50 \text{ m} \quad d_2 = 10.20 \text{ m} \quad l_{w,tot} = 8.60 \text{ m}$$

Come dimensionare le pareti?

Pareti in direzione x

4. Distribuire la sezione complessiva tra le pareti allungate nella direzione del sisma in modo da evitare eccentricità strutturale - caso con 2 pareti

Per l'equilibrio alla rotazione occorre ripartire la lunghezza totale in maniera inversamente proporzionale alla distanza

$$l_{w,1} = \frac{d_2}{d_1 + d_2} l_{w,tot} \quad \Rightarrow \quad l_{w,1} = 5.60 \text{ m} \quad l_{w,2} = 3.00 \text{ m}$$

Ma anche mantenere le lunghezze inversamente proporzionali alla radice cubica della distanza

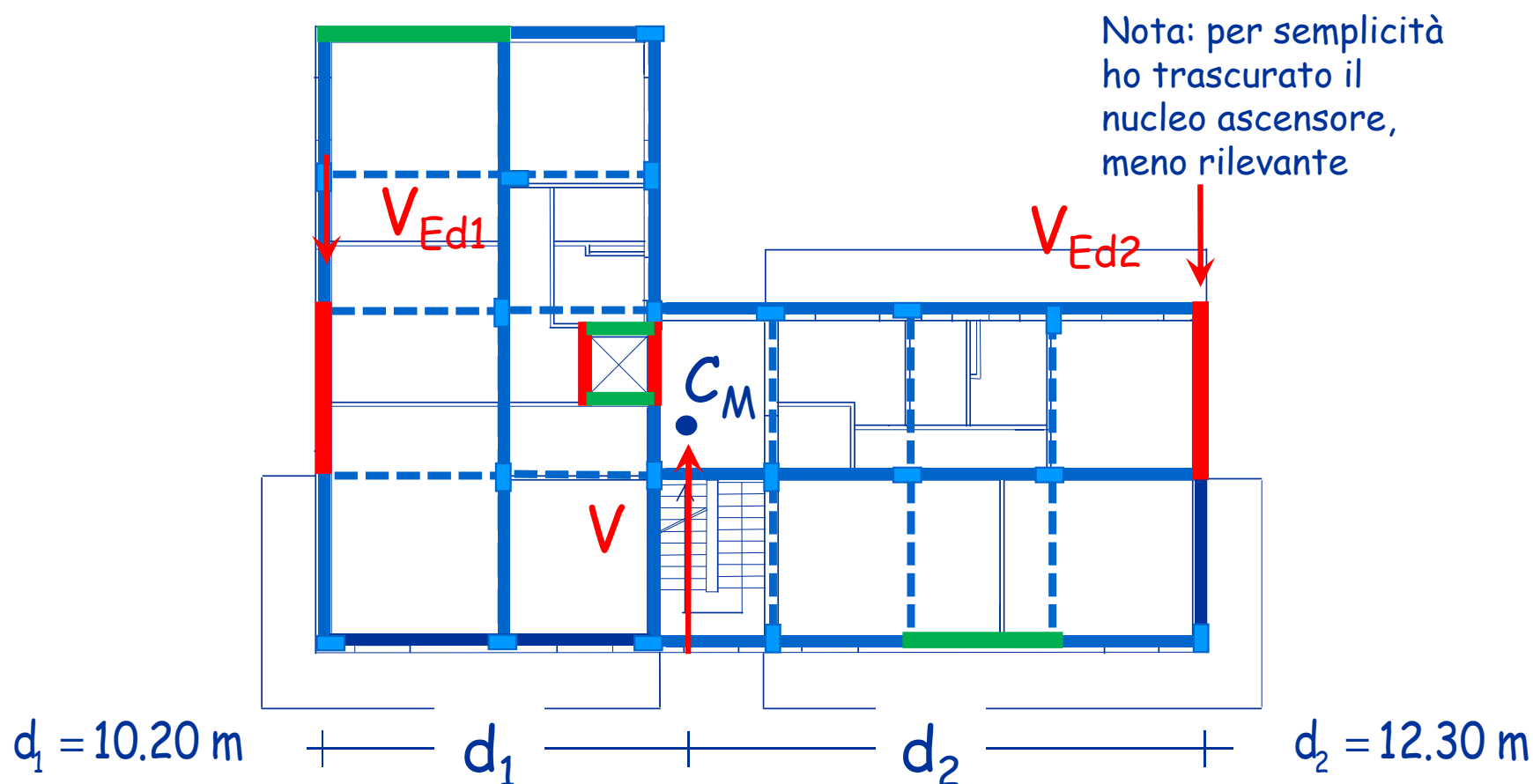
Si è scelto $l_{w,2} = 4.80 \text{ m}$
per vincoli architettonici

$$l_{w,2} = \frac{\sqrt[3]{d_1}}{\sqrt[3]{d_2}} l_{w,1} \quad \Rightarrow \quad l_{w,2} = 4.55 \text{ m}$$

Come dimensionare le pareti?

Pareti in direzione y

4. Distribuire la sezione complessiva tra le pareti allungate nella direzione del sisma in modo da evitare eccentricità strutturale - caso con 2 pareti



Come dimensionare le pareti?

Pareti in direzione y

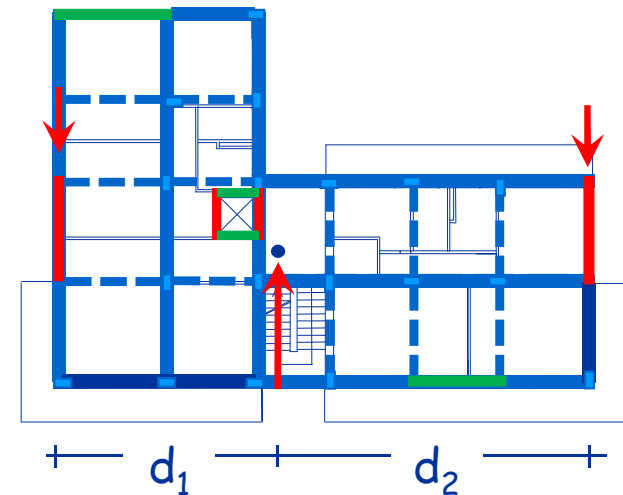
4. Distribuire la sezione complessiva tra le pareti allungate nella direzione del sisma in modo da evitare eccentricità strutturale - caso con 2 pareti

Per l'equilibrio alla rotazione occorre ripartire la lunghezza totale in maniera inversamente proporzionale alla distanza

$$l_{w,1} = \frac{d_2}{d_1 + d_2} l_{w,tot}$$

Ma anche mantenere le lunghezze inversamente proporzionali alla radice cubica della distanza

$$l_{w,2} = \frac{\sqrt[3]{d_1}}{\sqrt[3]{d_2}} l_{w,1}$$



$$d_1 = 10.20 \text{ m} \quad d_2 = 12.30 \text{ m} \quad l_{w,tot} = 8.60 \text{ m}$$

Come dimensionare le pareti?

Pareti in direzione y

4. Distribuire la sezione complessiva tra le pareti allungate nella direzione del sisma in modo da evitare eccentricità strutturale - caso con 2 pareti

Per l'equilibrio alla rotazione occorre ripartire la lunghezza totale in maniera inversamente proporzionale alla distanza

$$l_{w,1} = \frac{d_2}{d_1 + d_2} l_{w,tot} \quad \Rightarrow \quad l_{w,1} = 4.70 \text{ m} \quad l_{w,2} = 3.90 \text{ m}$$

Ma anche mantenere le lunghezze inversamente proporzionali alla radice cubica della distanza

$$l_{w,2} = \frac{\sqrt[3]{d_1}}{\sqrt[3]{d_2}} l_{w,1} \quad \Rightarrow \quad l_{w,2} = 4.40 \text{ m}$$

Si è scelto

$l_{w,1} = l_{w,2} = 4.50 \text{ m}$
per vincoli architettonici

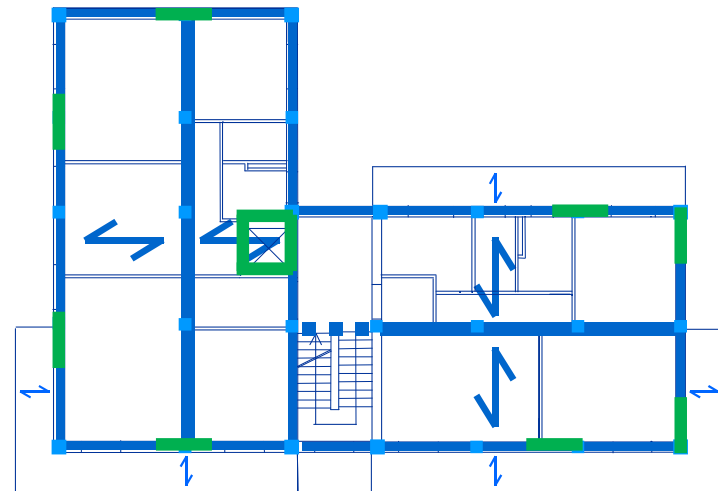
Come dimensionare le pareti?

Pareti in direzione y

4. Distribuire la sezione complessiva tra le pareti allungate nella direzione del sisma in modo da evitare eccentricità strutturale - caso con più pareti

Se si dispongono 4 pareti per direzione, più il nucleo ascensore, ciascuna parete dovrà essere lunga circa 1.50 m

Definire il bilanciamento delle pareti può essere un po' più complesso, meglio controllarlo dopo un primo calcolo



Come dimensionare le pareti?

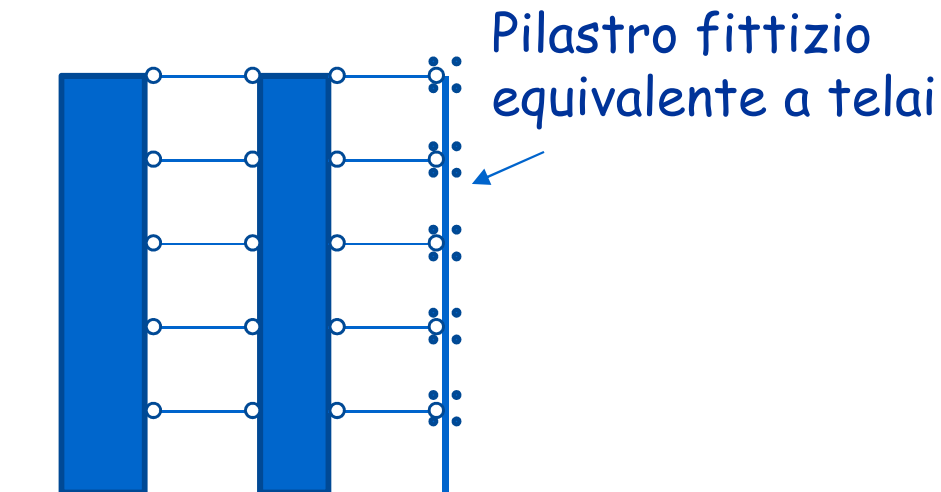
5. Valutare se mantenere la sezione costante a tutta altezza o ridurla progressivamente

Piano	Taglio globale (kN)		
	Dal calcolo	$\times 1.1 \times 1.5$	Inviluppo in altezza
6	1288.6	2126.2	3330.4
5	2368.3	3907.7	4278.6
4	3186.2	5257.2	5257.2
3	3742.4	6175.0	6175.0
2	4036.8	6660.7	6660.7

Sarebbe possibile ridurre le dimensioni, ma si è preferito mantenerle costanti

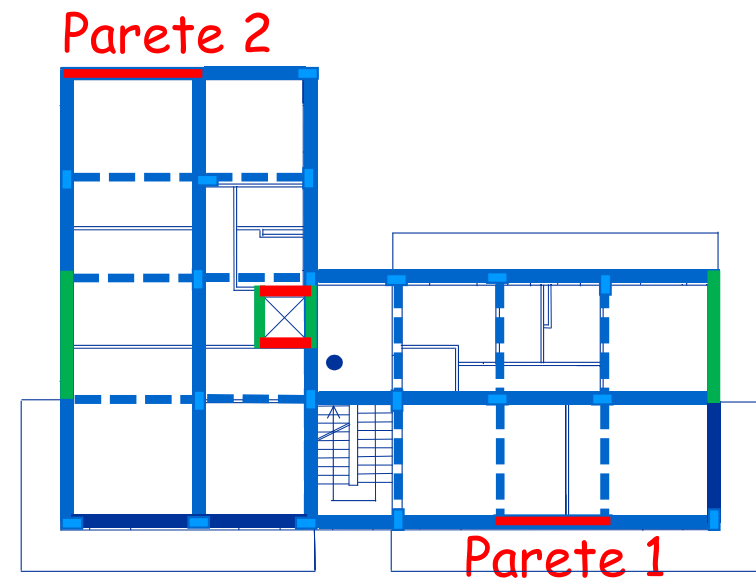
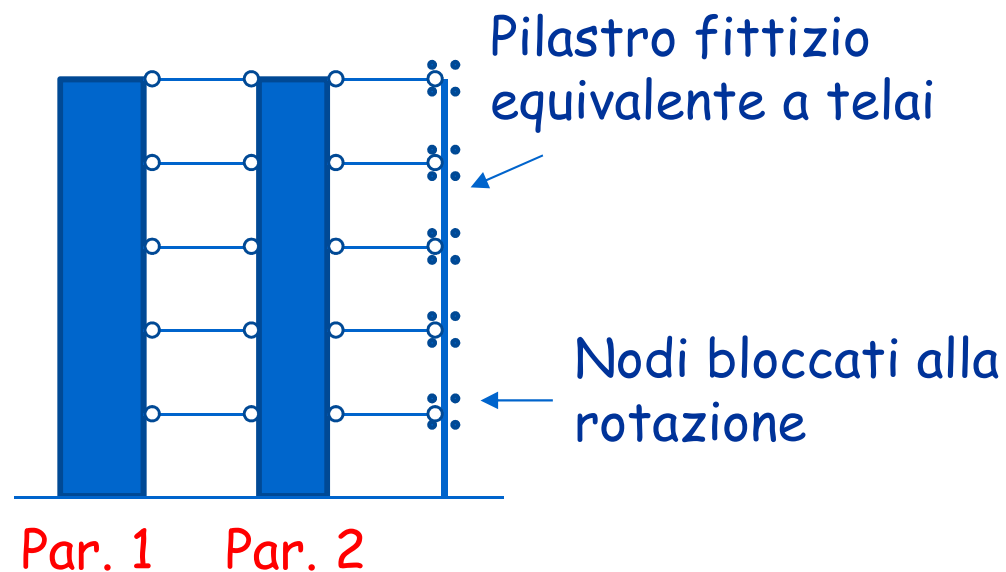
Previsione del momento flettente

- Non è facile stimare con formule semplificate l'interazione tra pareti e telai, perché hanno un comportamento molto diverso lungo l'altezza
- Si può usare un modello semplificato, da risolvere con un programma di calcolo



Previsione del momento flettente

Si può risolvere un modello di calcolo semplificato per tener conto dell'interazione tra pareti e telai



- La sezione delle pareti è quella già calcolata
- Il pilastro fittizio ha un momento d'inerzia equivalente

Previsione del momento flettente

Momento d'inerzia del pilastro fittizio

- Stima delle rigidzze
possibilità 1: approccio globale semplificato

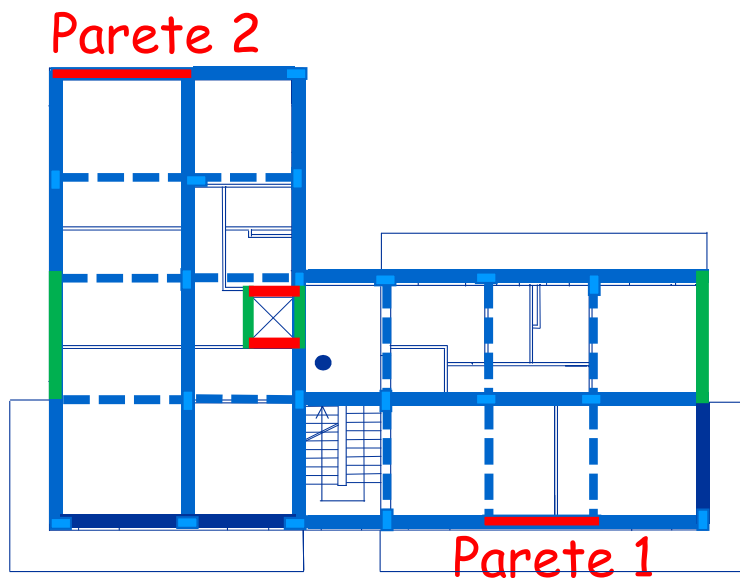
$$\text{rigidezza} = \frac{12 E \sum I_p}{L_p^3} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{E \sum I_p / L_p}{E \sum I_{t,\text{sup}} / L_t} + \frac{E \sum I_p / L_p}{E \sum I_{t,\text{inf}} / L_t} \right)}$$

considerando solo i pilastri "che contano"

Previsione del momento flettente

Momento d'inerzia del pilastro fittizio

- Stima delle rigidezze
possibilità 1: approccio globale semplificato



I pilastri (tutti uguali) sono:
9 allungati in direzione x
9 allungati in direzione y

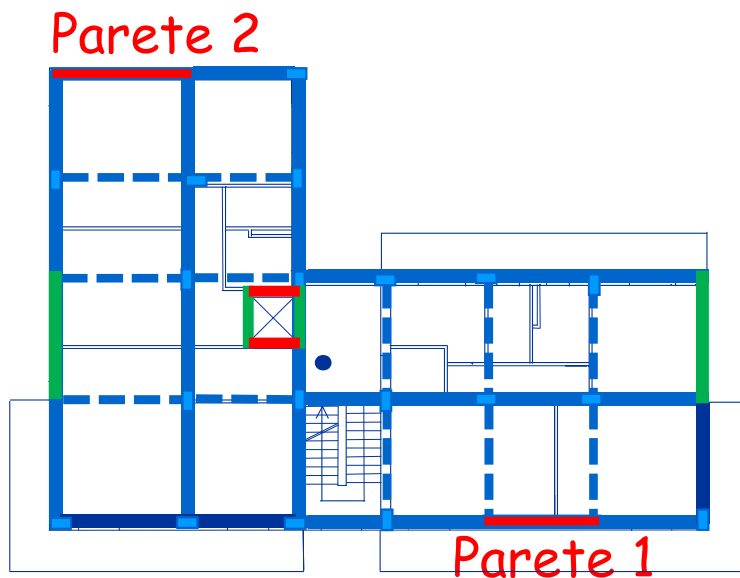
Le travi emergenti sono:
13 in direzione x
14 in direzione y

Considero 9 pilastri e
12 travi (direzione x)

Previsione del momento flettente

Momento d'inerzia del pilastro fittizio

- Stima delle rigidezze
possibilità 1: approccio globale semplificato



Al primo piano, direzione x

Pilastri 30x50 (9)

$$L_p = 3.60 \text{ m}$$

$$I_p = 312500 \text{ cm}^4$$

Travi 30x50 (12)

$$L_t = 4.00 \text{ m in media}$$

$$I_t = 312500 \text{ cm}^4$$

Ottengo

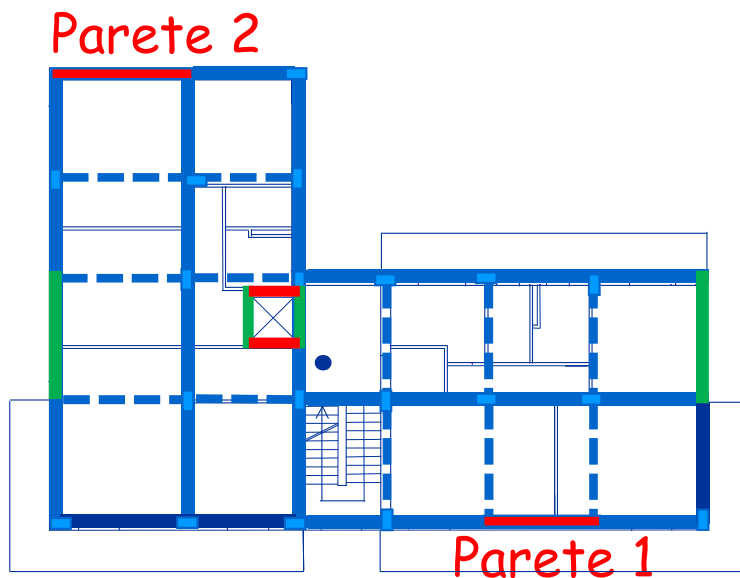
$$k = 128.8 \text{ kN/mm}$$

Vedi file Excel Parete-telaio
foglio Rigidzza-1

Previsione del momento flettente

Momento d'inerzia del pilastro fittizio

- Stima delle rigidezze
possibilità 1: approccio globale semplificato



Al piano tipo, direzione x

Pilastri 30x50 (9)

$$L_p = 3.20 \text{ m}$$

$$I_p = 312500 \text{ cm}^4$$

Travi 30x50 (12)

$$L_t = 4.00 \text{ m in media}$$

$$I_t = 312500 \text{ cm}^4$$

Ottengo

$$k = 173.9 \text{ kN/mm}$$

Vedi file Excel Parete-telaio
foglio Rigidezza-1

Previsione del momento flettente

Pilastro equivalente al telaio

Impongo che:

$$\frac{12 E \sum I_p^*}{L_p^3} = k \quad \Rightarrow \quad I_p^* = \frac{k L_p^3}{12 E}$$

Primo piano:

$$I_p^* = \frac{k L_p^3}{12 E} = \frac{128.8 \times 3600^3}{12 \times 31500} \times \frac{10^3}{10^4} = 1589674 \text{ cm}^4$$

Piano tipo:

$$I_p^* = \frac{k L_p^3}{12 E} = \frac{173.9 \times 3200^3}{12 \times 31500} \times \frac{10^3}{10^4} = 1507732 \text{ cm}^4$$

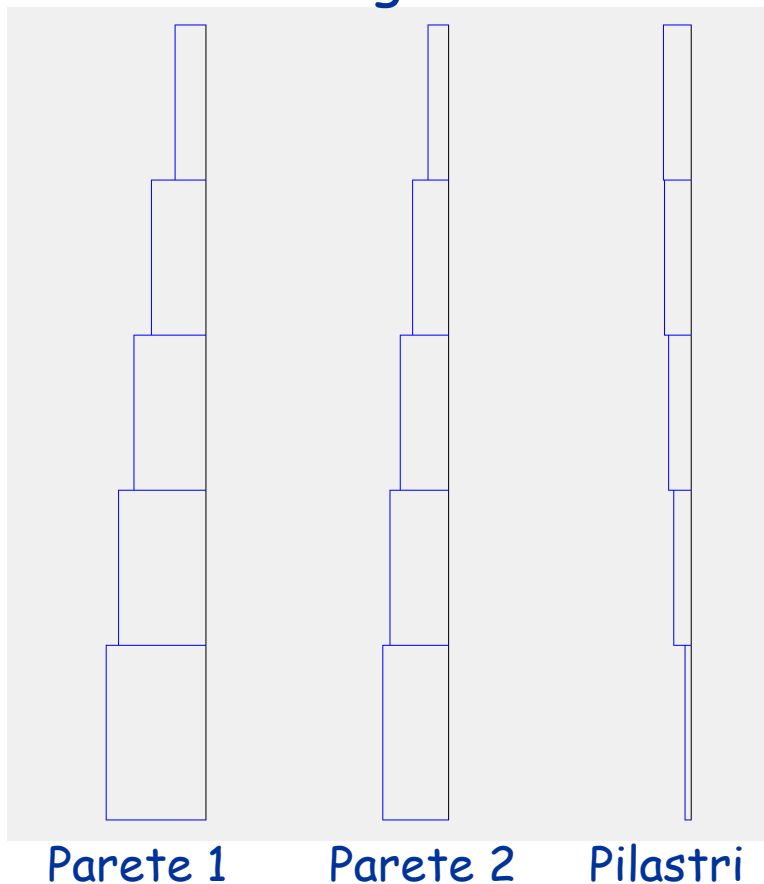
Vedi file Excel Parete-telaio
foglio Rigidezza-1

Previsione del momento flettente

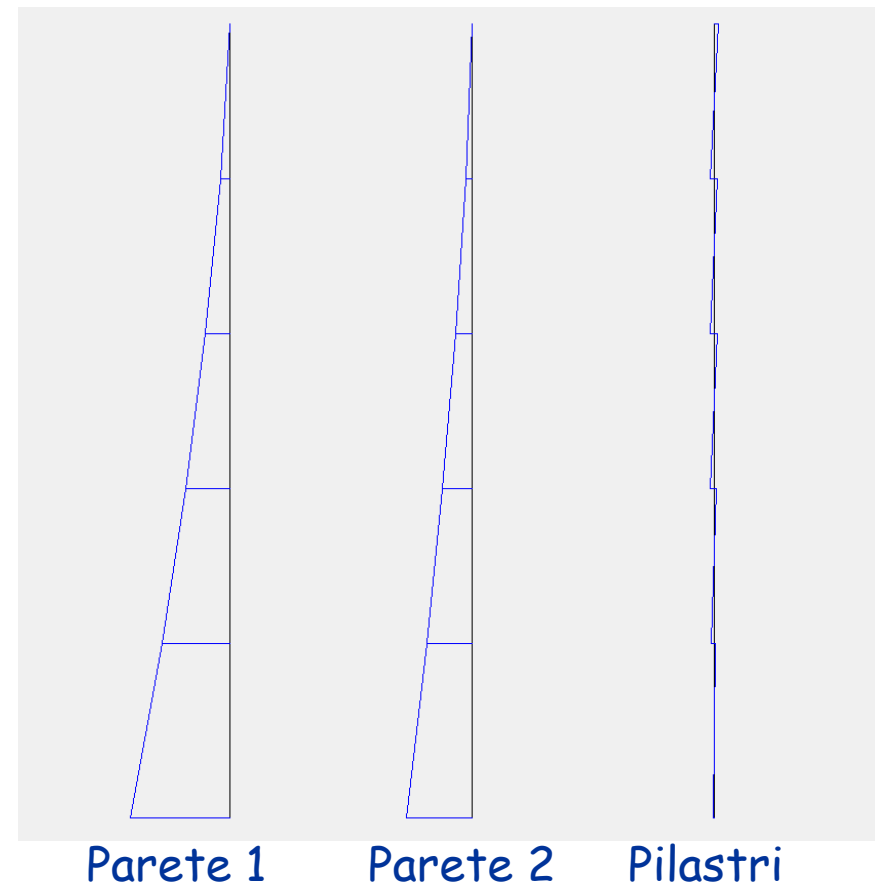
Risoluzione schema

- Si risolve lo schema (fatta sia analisi statica che analisi modale con spettro di risposta)

Taglio



Momento flettente

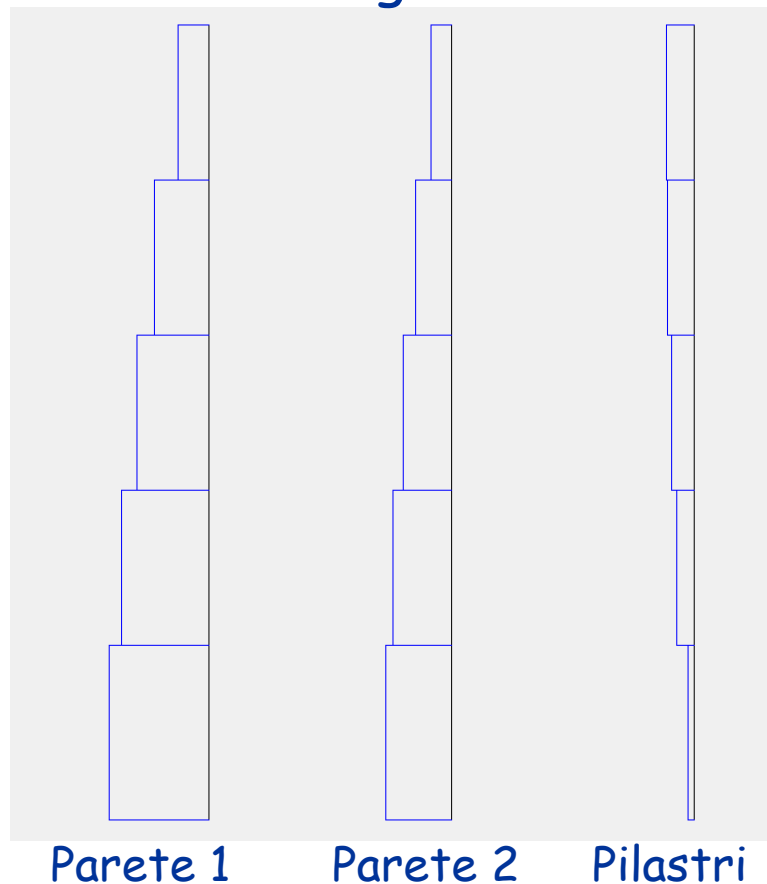


Previsione del momento flettente

Risoluzione schema

- Si risolve lo schema (fatta sia analisi statica che analisi modale con spettro di risposta)

Taglio



Si noti la distribuzione del taglio tra pareti e pilastri

ordine	par. 1	par. 2	pilastri
6	586.1	365.3	563.7
5	1019.9	685.5	552.0
4	1370.5	929.0	496.0
3	1651.2	1142.1	381.8
2	1822.7	1404.2	154.2

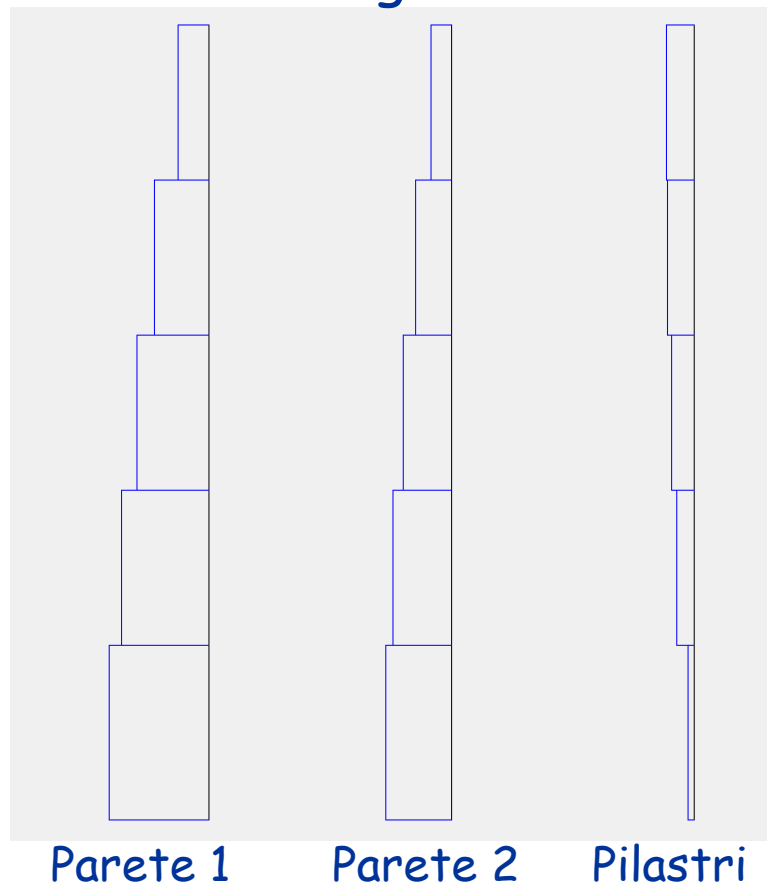
Valori da analisi modale

Previsione del momento flettente

Risoluzione schema

- Si risolve lo schema (fatta sia analisi statica che analisi modale con spettro di risposta)

Taglio



Si noti la distribuzione del taglio tra pareti e pilastri

ordine	par. 1	par. 2	pilastri
6	38.7%	24.1%	37.2%
5	45.2%	30.4%	24.5%
4	49.0%	33.2%	17.7%
3	52.0%	36.0%	12.0%
2	53.9%	41.5%	4.6%

Valori da analisi modale

Previsione del momento flettente

Risoluzione schema

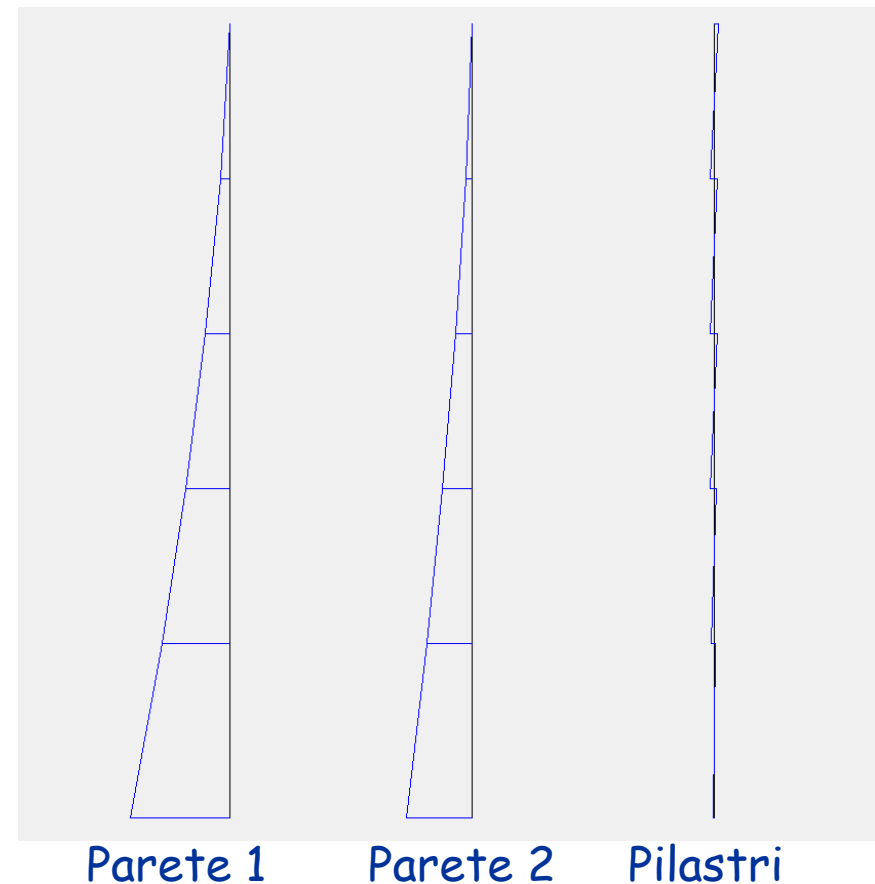
- Si risolve lo schema (fatta sia analisi statica che analisi modale con spettro di risposta)

Valori del momento flettente nelle pareti

ordine	par. 1	par. 2
6	1876	1169
5	5058	3290
4	9247	6108
3	14265	9559
2	20553	14401

Valori da analisi modale

Momento flettente



Previsione del momento flettente

Risoluzione schema

- Periodo proprio (da analisi modale) $T = 0.381 \text{ s}$
- Si possono anche usare i risultati dell'analisi statica e applicare la formula di Rayleigh

Piano	m ($\text{kN s}^2/\text{m}$)	F (kN)	u (mm)	$F u$ (kN m)	$m u^2$ (kN m s^2)
Torrino+6	379.9	1288.6	14.72	18.972	0.0823
5	323.5	1079.6	11.05	11.924	0.0395
4	323.5	817.9	7.40	6.053	0.0177
3	323.5	556.2	4.07	2.262	0.0053
2	323.5	294.4	1.45	0.427	0.0007
somma				39.638	0.1456

Si ottiene $T = 0.381 \text{ s}$

Verifica dimensionamento

Parete n. 1

Valuto il massimo momento (da analisi modale incrementato del 10%) e calcolo l'armatura

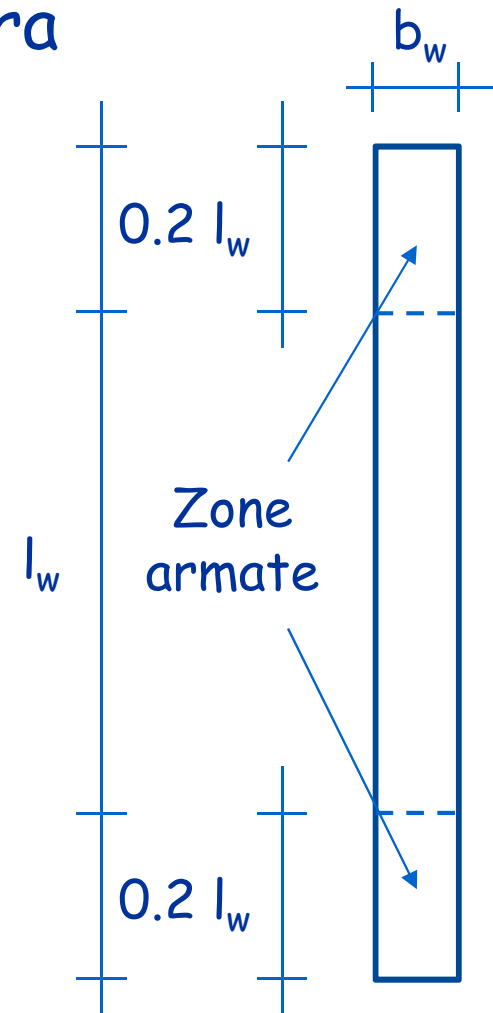
$$b_w = 30 \text{ cm}, l_w = 550 \text{ cm}$$

$$M = 1.1 \times 20553 = 22608 \text{ kNm}$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{0.8 l_w f_{yd}} = \frac{1.1 \times 20553 \times 10}{0.8 \times 5.50 \times 391.3} = 131.3 \text{ cm}^2$$

$$A_s \% = \frac{A_s}{0.2 l_w b_w} = \frac{131.3}{0.2 \times 550 \times 30} = 3.98\%$$

Sono vicino al limite ($A_{smax}=4\%$)
ma è accettabile (anche perché N aiuta)



Verifica dimensionamento

Parete n. 2

Valuto il massimo momento (da analisi modale incrementato del 10%) e calcolo l'armatura

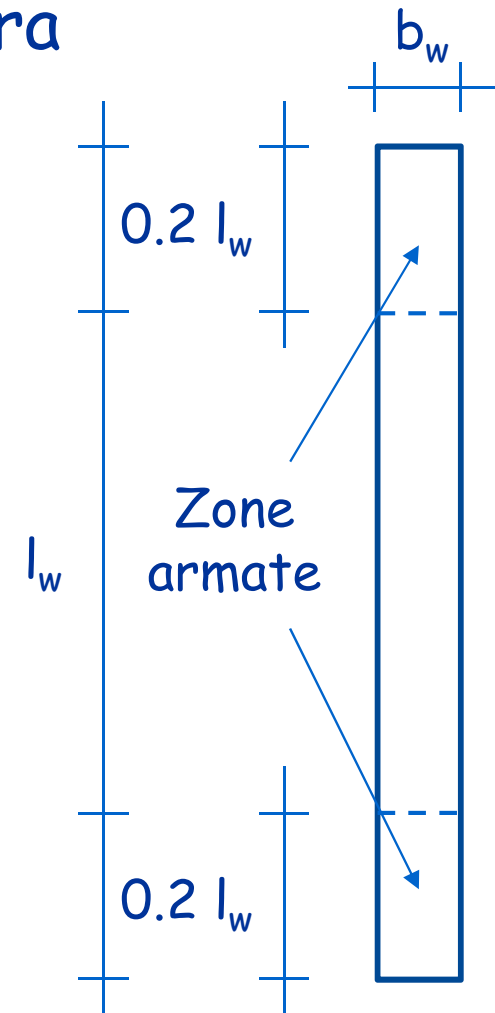
$$b_w = 30 \text{ cm}, l_w = 480 \text{ cm}$$

$$M = 1.1 \times 14401 = 15841 \text{ kNm}$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{0.8 l_w f_{yd}} = \frac{1.1 \times 14401 \times 10}{0.8 \times 4.80 \times 391.3} = 105.4 \text{ cm}^2$$

$$A_s \% = \frac{A_s}{0.2 l_w b_w} = \frac{105.4}{0.2 \times 480 \times 30} = 3.66\%$$

È un'armatura forte ma accettabile



Spettri per SLU e SLD

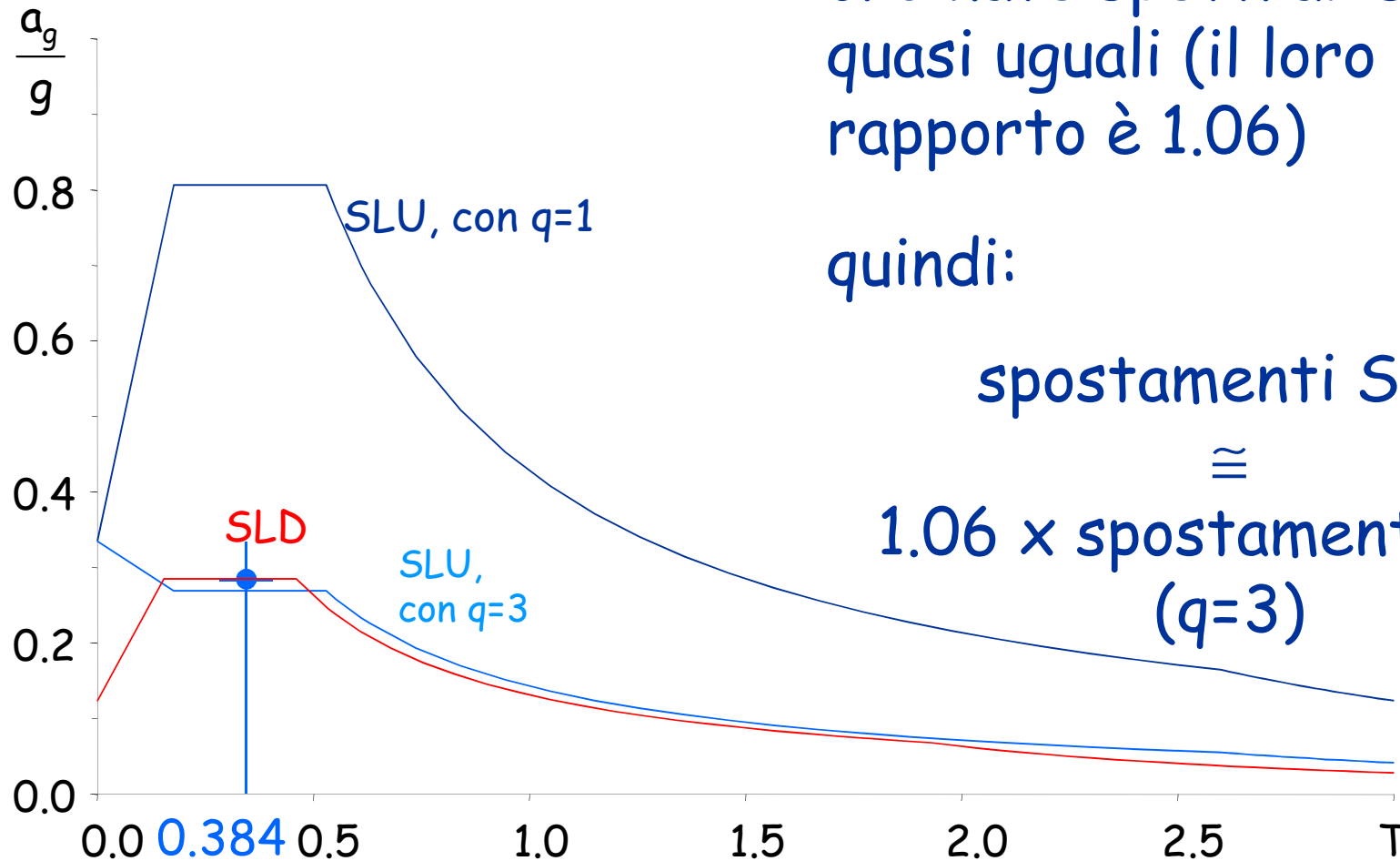
nel caso in esame, per un periodo pari a 0.384 s le ordinate spettrali sono quasi uguali (il loro rapporto è 1.06)

quindi:

spostamenti SLD

\cong

1.06 x spostamenti SLU
(q=3)



Controllo del dimensionamento: spostamenti per SLD

Piano	u SLV [mm]	u SLD [mm]	d_r SLD [mm]	h_r [m]	$d_{r, amm}$ [mm]
6	14.72	17.16	4.28	3.20	16.0
5	11.05	12.88	4.25	3.20	16.0
4	7.40	8.63	3.88	3.20	16.0
3	4.07	4.75	3.06	3.20	16.0
2	1.45	1.69	1.69	3.60	18.0

Gli spostamenti (da analisi modale) incrementati per:

- 1.06 per differenza tra ordinate spettrali
- 1.10 per eccentricità accidentale

... sono pienamente ammissibili

Dimensionamento di struttura ad alta duttilità

Cosa cambia?

Il fattore di struttura è più grande
Le forze di progetto sono più piccole

I criteri di gerarchia delle resistenze
Si applicano secondo condizioni più restrittive
(meccanismo di collasso più favorevole)

I limiti sui particolari costruttivi
Sono più condizionanti
(maggiore duttilità locale)

Fattore di struttura

$$q = q_0 K_R$$

Nell'esempio:

$$q_0 = 4.0 \times 1.0$$

Prima
era 3.0

struttura con 2 pareti per
direzione

duttilità alta

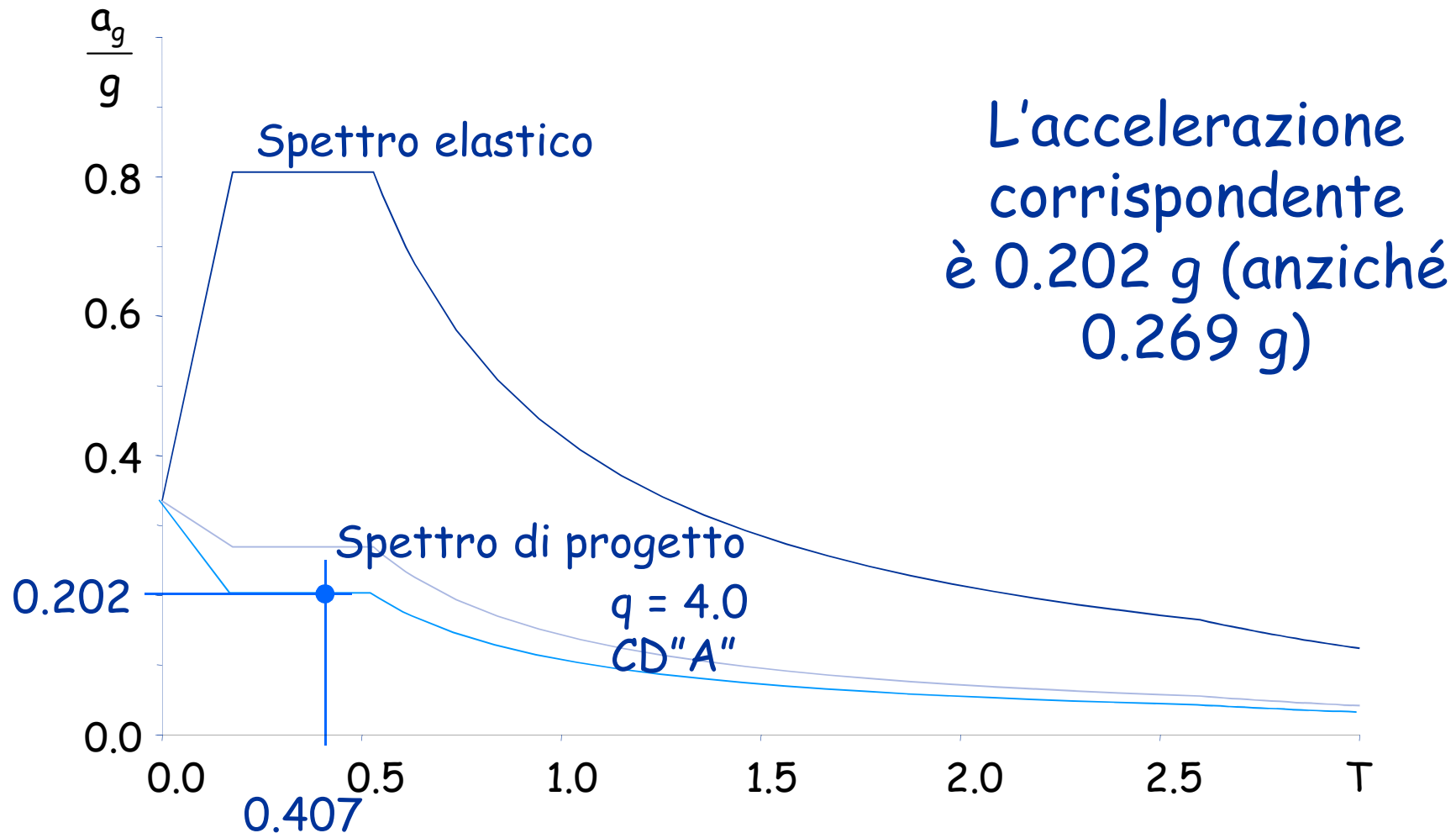
$$K_R = 1.0$$

la struttura è regolare in altezza

$$q = 4.00 \text{ (prima era 3.0)}$$

Esempio - ordinata spettrale

Il periodo stimato è ancora $T = 0.407$ s



Forze per analisi statica

Taglio alla base $V_b = 0.85 \sum_{i=1}^n m_i S_d(T_1) =$
 $= 0.85 \times 17655 \times 0.202 = 3031.4 \text{ kN}$

Forza al piano $F_k = \frac{m_k z_k}{\sum_{i=1}^n m_i z_i} V_b$

Forze per analisi statica

Piano	Peso W (kN)	Quota z (m)	Wz (kNm)	Forza F (kN)	Taglio V (kN)
6+torrino	3419	16.40	56072	967.7	967.7
5	3559	13.20	46979	810.7	1778.4
4	3559	10.00	35590	614.2	2392.6
3	3559	6.80	24201	417.7	2810.3
2	3559	3.60	12812	221.1	3031.4
somma	17655		175654		

Come dimensionare le pareti?

1. Partire dal taglio alla base, incrementandolo per tenere conto dell'eccentricità accidentale
2. Incrementare i valori per garantire la plasticizzazione a flessione prima della rottura a taglio (gerarchia delle resistenze)
3. Determinare la sezione complessiva occorrente per sopportare il taglio alla base (incrementato)
4. Distribuire la sezione complessiva tra le pareti allungate nella direzione del sisma in modo da evitare eccentricità strutturale
5. Valutare se mantenere la sezione costante a tutta altezza o ridurla progressivamente

Come dimensionare le pareti?

1. Incrementare i valori per tenere conto dell'eccentricità accidentale

Se la struttura è molto rigida torsionalmente, incrementare del 10%

$$V_{Ed} = 3031.4 \text{ kN} \times 1.1 = 3334.5 \text{ kN}$$

Come dimensionare le pareti?

2. Partire dal taglio alla base, incrementandolo per garantire la plasticizzazione a flessione prima della rottura a taglio (gerarchia delle resistenze)

Si deve tener conto di:

- Effetto dei modi superiori
- Possibile sovraresistenza a flessione

Per farlo, si può moltiplicare per 1.5 a tutti i piani nel caso di CD "B" (un po' di più per CD "A")

Come si calcola l'incremento?

Come dimensionare le pareti?

2. Partire dal taglio alla base, incrementandolo per garantire la plasticizzazione a flessione prima della rottura a taglio (gerarchia delle resistenze)

$$V_{Ed} = \varepsilon V_{analisi}$$

Pareti snelle

$$1.5 \leq \varepsilon = \sqrt{\left(\gamma_{Rd} \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} \right)^2 + \left(q \sqrt{0.1} \frac{S_d(T_c)}{S_d(T_1)} \right)^2} \leq q$$

Pareti tozze

$$\varepsilon = \gamma_{Rd} \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} \leq q$$

$$\gamma_{Rd} = 1.2$$

Come dimensionare le pareti?

2. Partire dal taglio alla base, incrementandolo per garantire la plasticizzazione a flessione prima della rottura a taglio (gerarchia delle resistenze)

$$\gamma_{Rd} = 1.2 \quad \text{assumo} \quad \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} = 1.05 \quad \Rightarrow \quad \gamma_{Rd} \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} = 1.26$$

$$\text{È stato stimato } T_1 = 0.407 \text{ s} \quad \frac{S_d(T_c)}{S_d(T_1)} = 1$$

$$q\sqrt{0.1} \frac{S_d(T_c)}{S_d(T_1)} = 4 \times \sqrt{0.1} \times 1 = 1.264$$

Come dimensionare le pareti?

2. Partire dal taglio alla base, incrementandolo per garantire la plasticizzazione a flessione prima della rottura a taglio (gerarchia delle resistenze)

Ed infine

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\gamma_{Rd} \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} \right)^2 + \left(q\sqrt{0.1} \frac{S_d(T_c)}{S_d(T_1)} \right)^2} =$$
$$= \sqrt{1.26^2 + 1.264^2} = 1.78$$

Quindi

$$V_{Ed} = 3334.5 \text{ kN} \times 1.78 = 5935.5 \text{ kN}$$

Come dimensionare le pareti?

3. Determinare la sezione complessiva occorrente per sopportare il taglio alla base (incrementato)

Si inverte la formula di verifica a taglio del calcestruzzo ($V_{Rd,max}$)

assumo $b_w = 30 \text{ cm}$

pongo $\cot \theta = 1$

$$l_w = \frac{1 + \cot^2 \theta}{\cot \theta} \frac{V_{Ed}}{0.8 f'_{cd} b_w} = 2 \frac{5935.5 \times 10^{-3}}{0.8 \times 7.1 \times 0.3} = 6.97 \text{ m}$$

Come dimensionare le pareti?

3. Determinare la sezione complessiva occorrente per sopportare il taglio alla base (incrementato)

Si inverte la formula di verifica a taglio del calcestruzzo ($V_{Rd,max}$)

$$l_w = \frac{1 + \cot^2 \theta}{\cot \theta} \frac{V_{Ed}}{0.8 f'_{cd} b_w} = 2 \frac{5935.5 \times 10^{-3}}{0.8 \times 7.1 \times 0.3} = 6.97 \text{ m}$$

Ma la norma impone una ulteriore riduzione di resistenza

$$V_{Rd,max} = 0.4 \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} f'_{cd} b_w z \Rightarrow l_w = \frac{6.97}{0.4} = 17.42 \text{ m}$$

È il doppio di ciò che serviva in CD "B"????

Considerazioni

Il progetto ad alta duttilità richiede pareti molto più grandi rispetto a quello a bassa duttilità

Si poteva prevedere, perché

1. Le azioni in CD "A" sono minori del 25% ($q = 4$ anziché 3)
2. L'amplificazione per criterio di gerarchia delle resistenze è del 20% più grande (1.78 anziché 1.5)
3. Ma soprattutto la resistenza a taglio è ridotta del 60%

Ma allora che vantaggi dall'alta duttilità?

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
- ➡ 4. Analisi strutturale dettagliata e verifica del comportamento della struttura
- 5. Definizione delle armature ed elaborati grafici

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

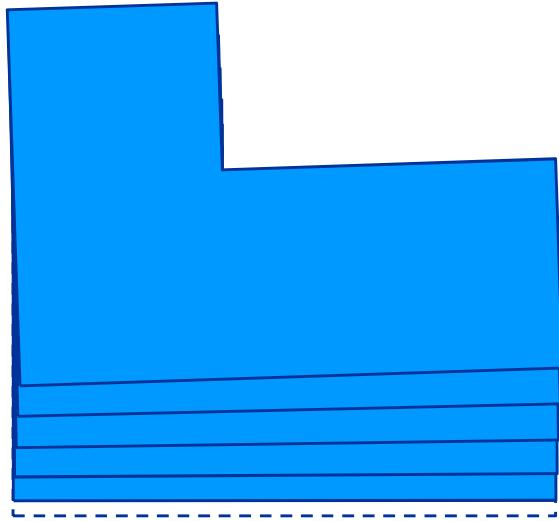
- Esaminare le deformate modali (indipendentemente dalla direzione del sisma)
 - sono disaccoppiate oppure accoppiate?
- Esaminare le masse partecipanti (per ciascuna direzione del sisma) per vedere quali modi danno maggior contributo
 - prevale un solo modo, o più di uno?
- Esaminare i periodi dei modi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

Un mare di numeri. Come non perdersi?

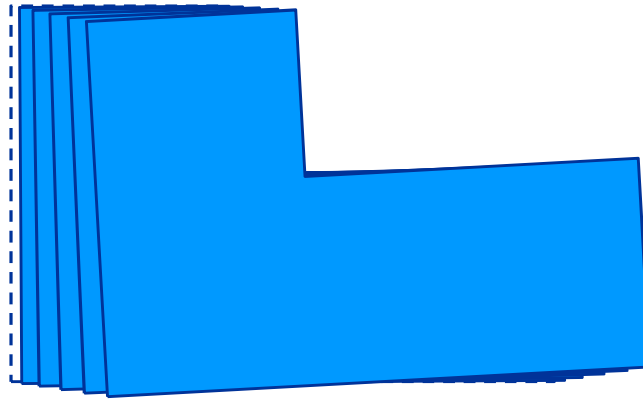
Analisi modale

- 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



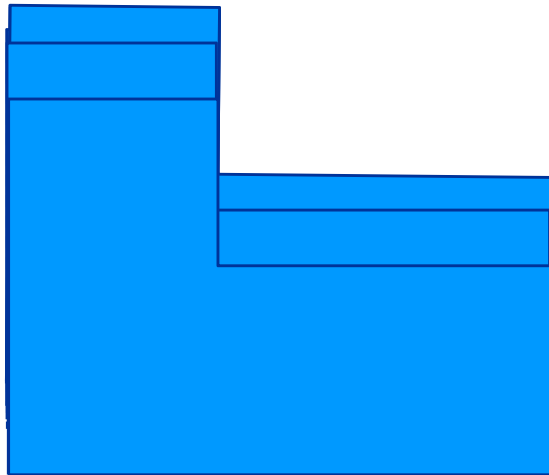
Modo 1, $T=0.355$ s



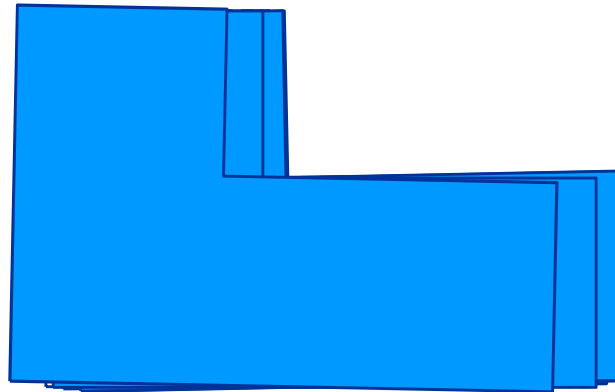
Modo 2, $T=0.318$ s



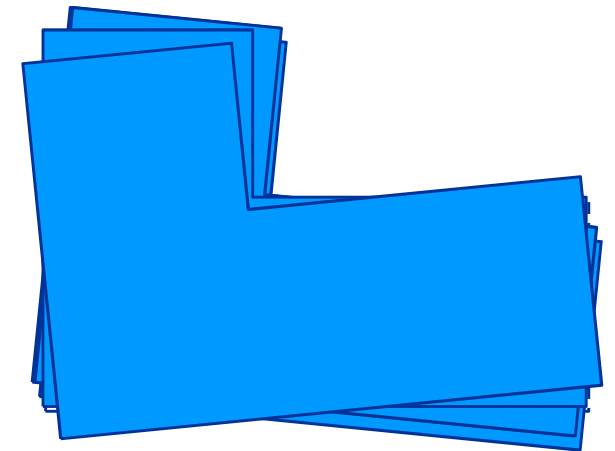
Modo 3, $T=0.241$ s



Modo 4, $T=0.079$ s

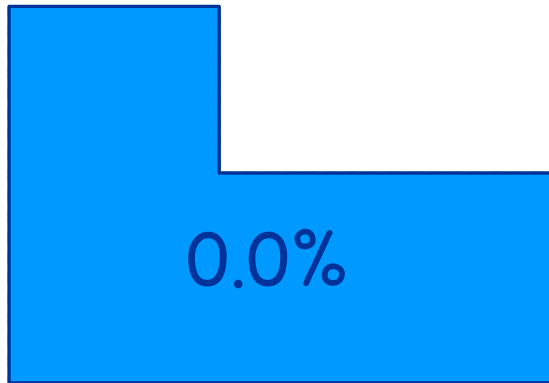


Modo 5, $T=0.071$ s

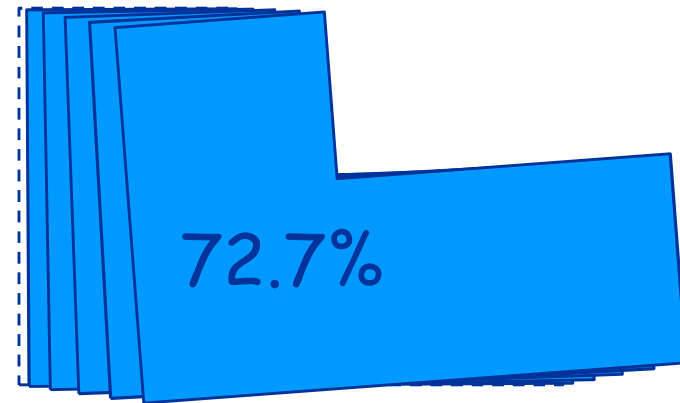


Modo 6, $T=0.051$ s

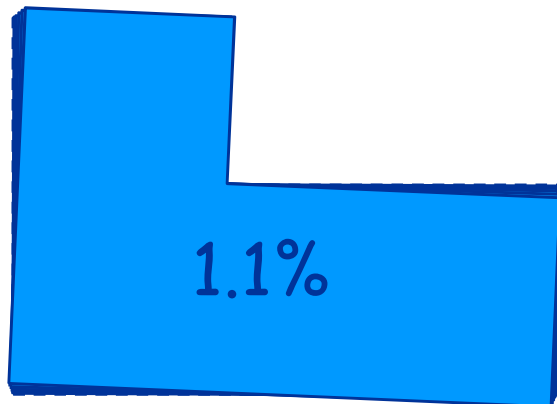
Masse partecipanti, sisma x



Modo 1 $T=0.355$ s



Modo 2 $T=0.318$ s

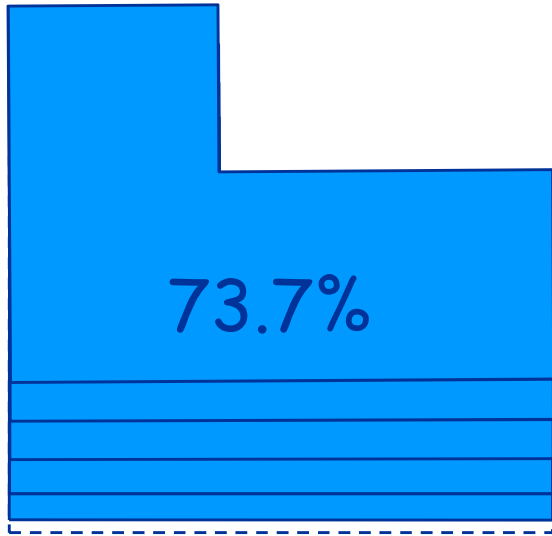


Modo 3 $T=0.241$ s

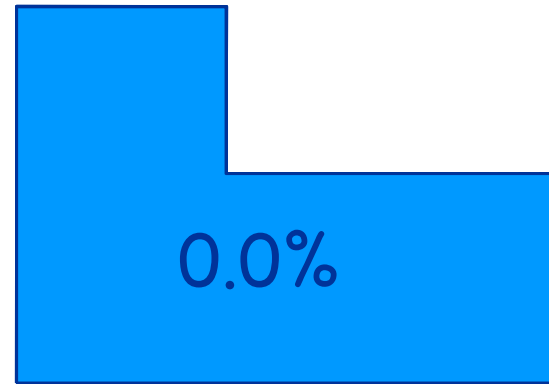
Il modo 2 è prevalente di traslazione secondo x

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

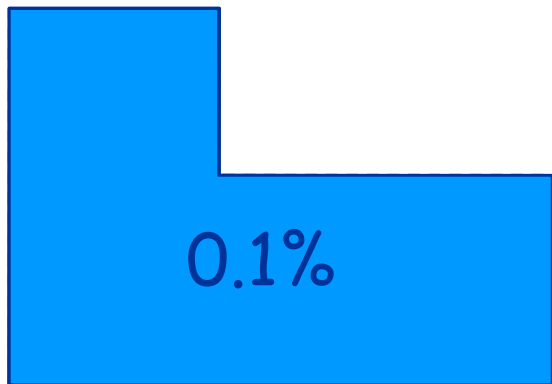
Masse partecipanti, sisma y



Modo 1 $T=0.355$ s



Modo 2 $T=0.318$ s



Modo 3 $T=0.241$ s

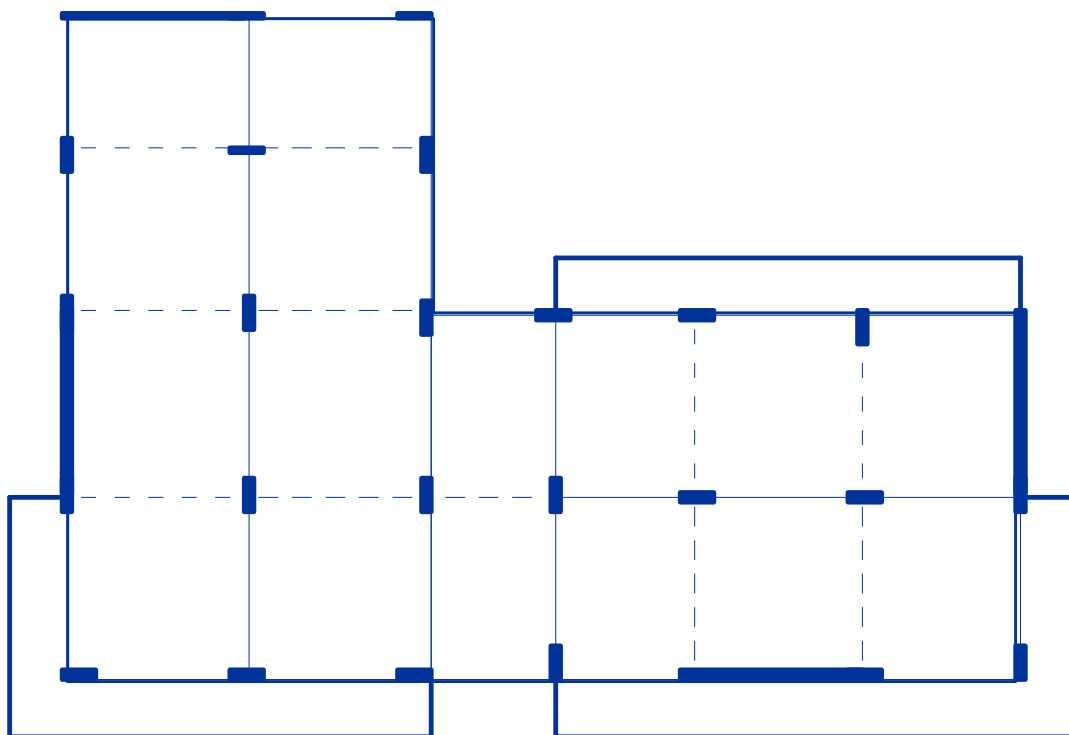
Il modo 1 di traslazione secondo y è del tutto disaccoppiato dagli altri due

Inviluppo modale sisma x

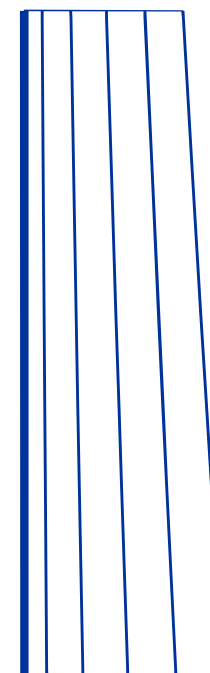
1.67



1.82



8.02



10.06

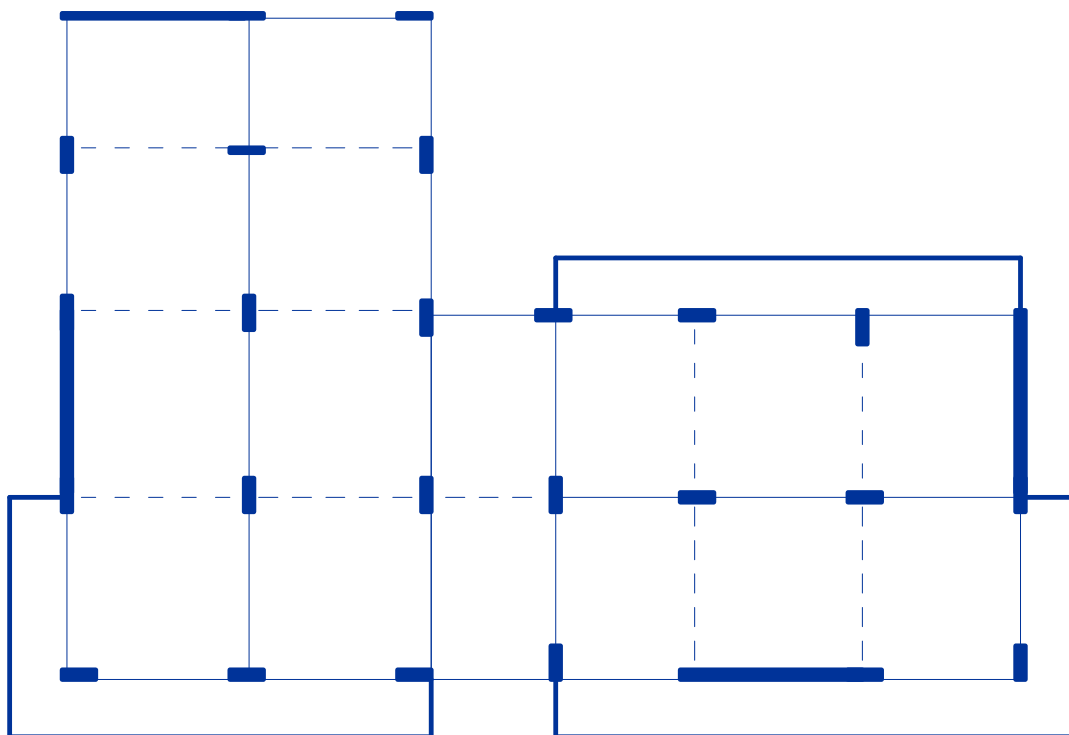
Inviluppo modale sisma y

11.10

12.57



0.65



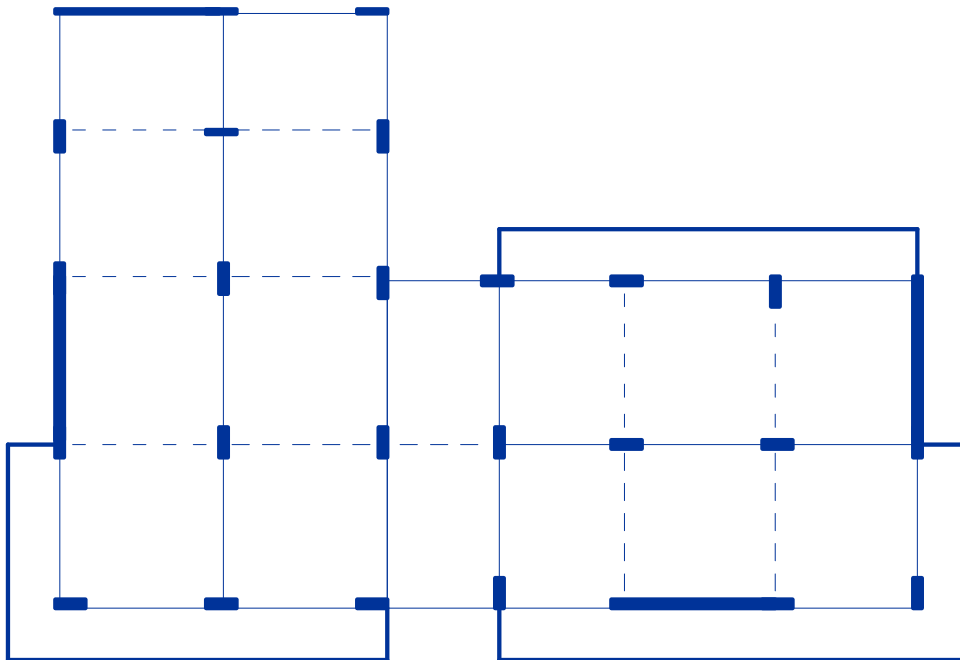
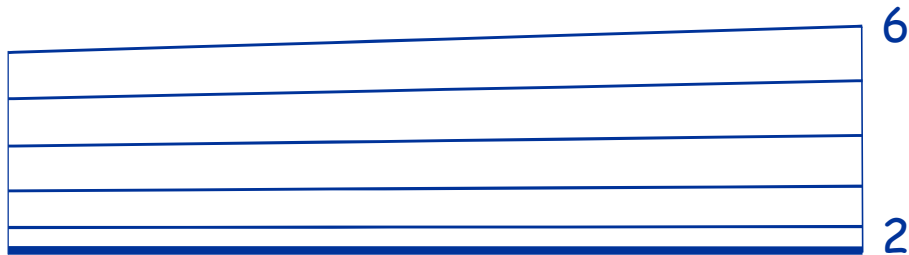
0.54

Spostamenti, inviluppo modale

Spostamenti
per sisma y

11.10

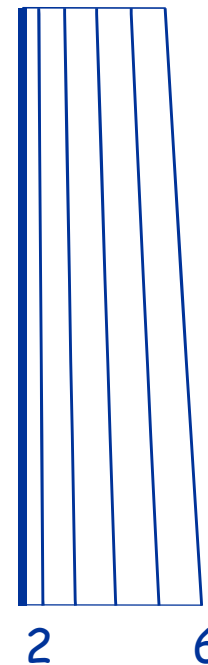
12.57



8.02

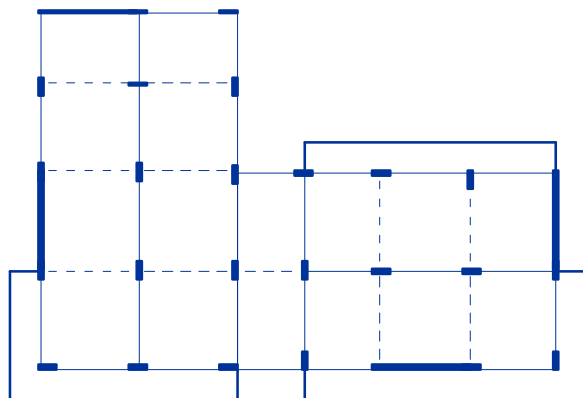
Spostamenti
per sisma x

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

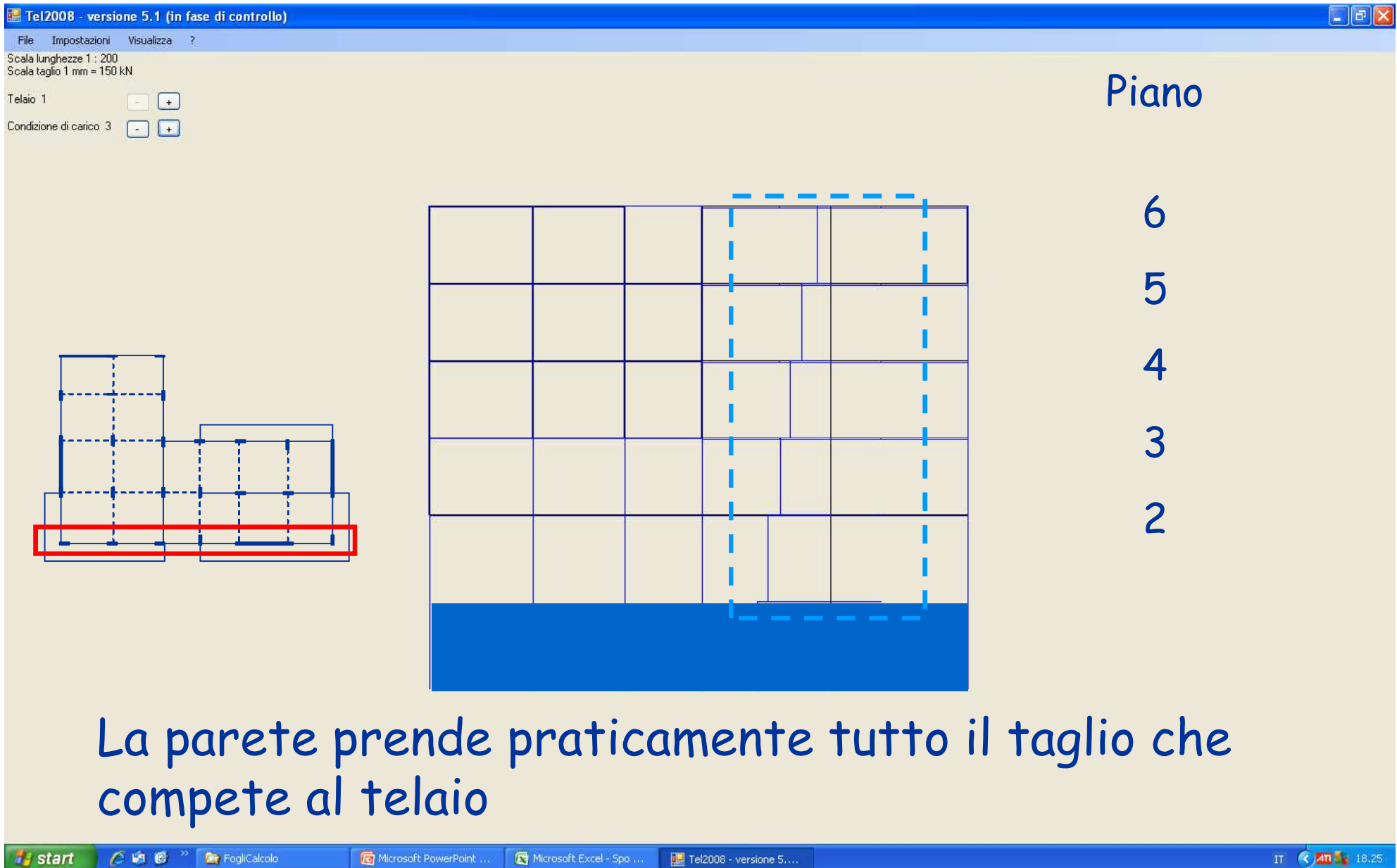
La direzione y andrebbe
irrigidita



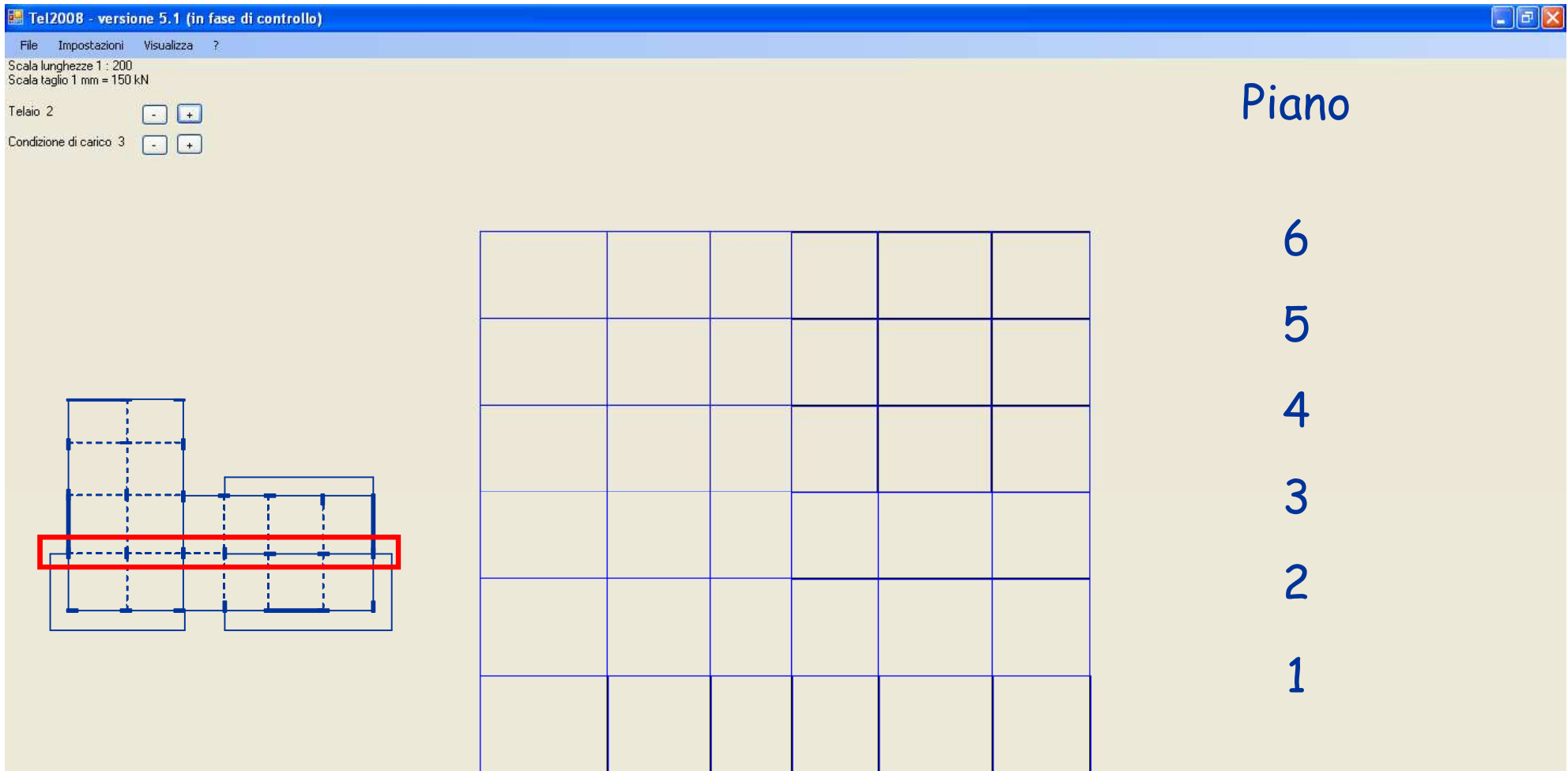
La parte inferiore
andrebbe irrigidita

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

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

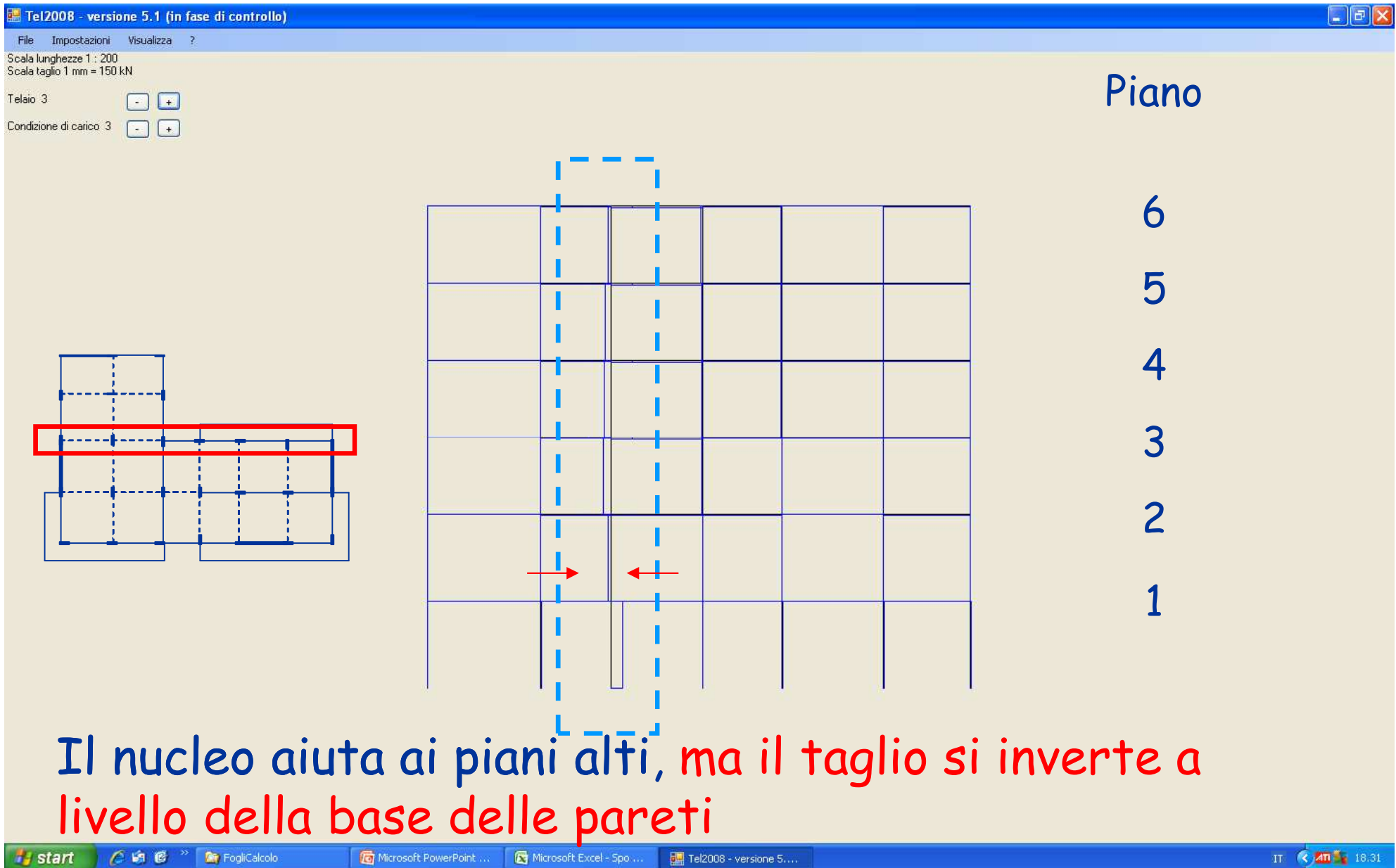


Taglio per forze in direzione x (telai in direzione x)



Questo telaio non porta quasi niente

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

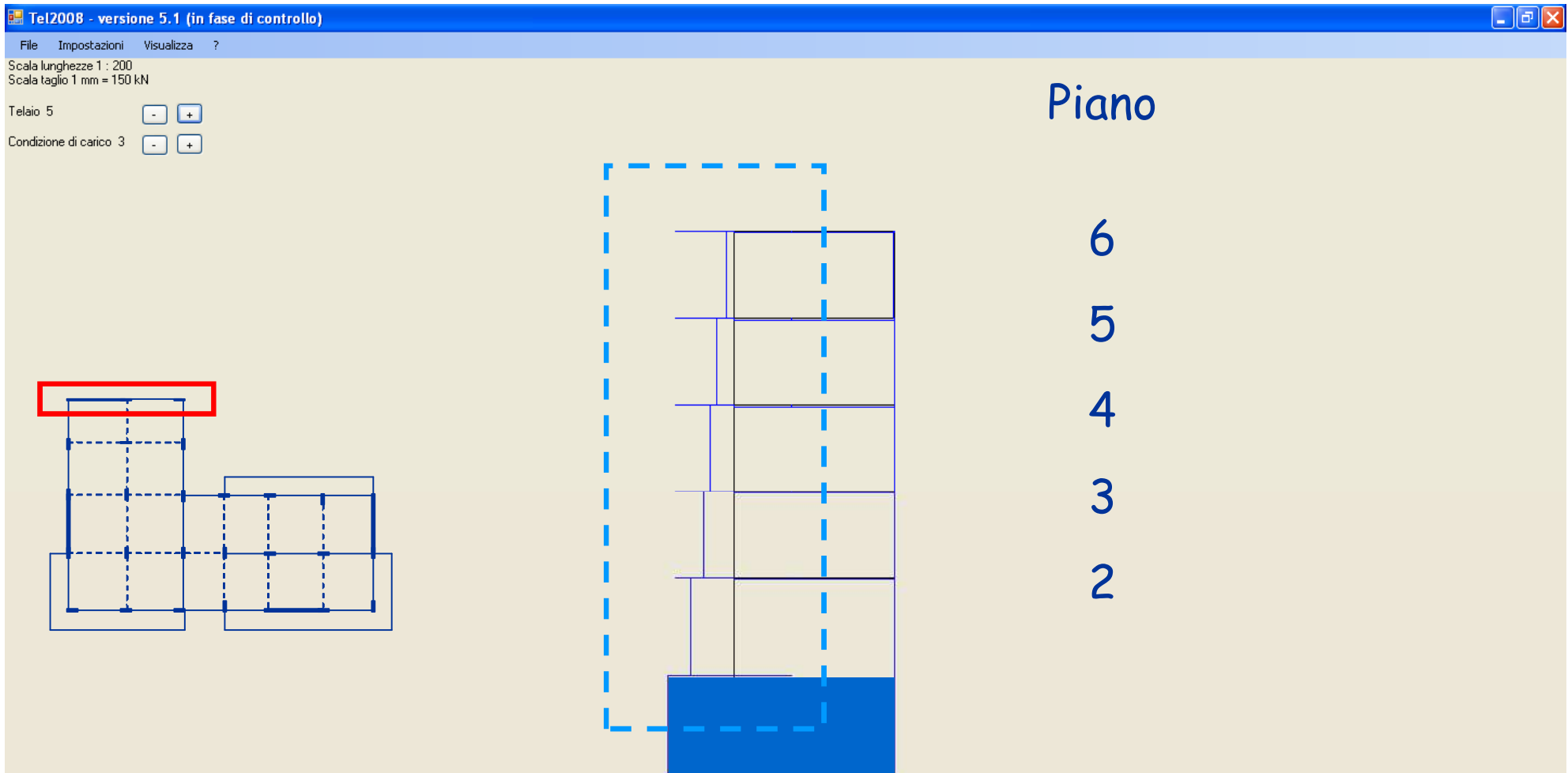
Telaio 4 - +
Condizione di carico 3 - +

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. On the right, a vertical grid is labeled 'Piano' with levels 1 through 6. The bottom of the screen shows the Windows taskbar with various open applications.

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



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

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%)

La sovrastima si riduce a poco
più del 20%

Nota: nella valutazione iniziale 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%)

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: nella valutazione iniziale 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

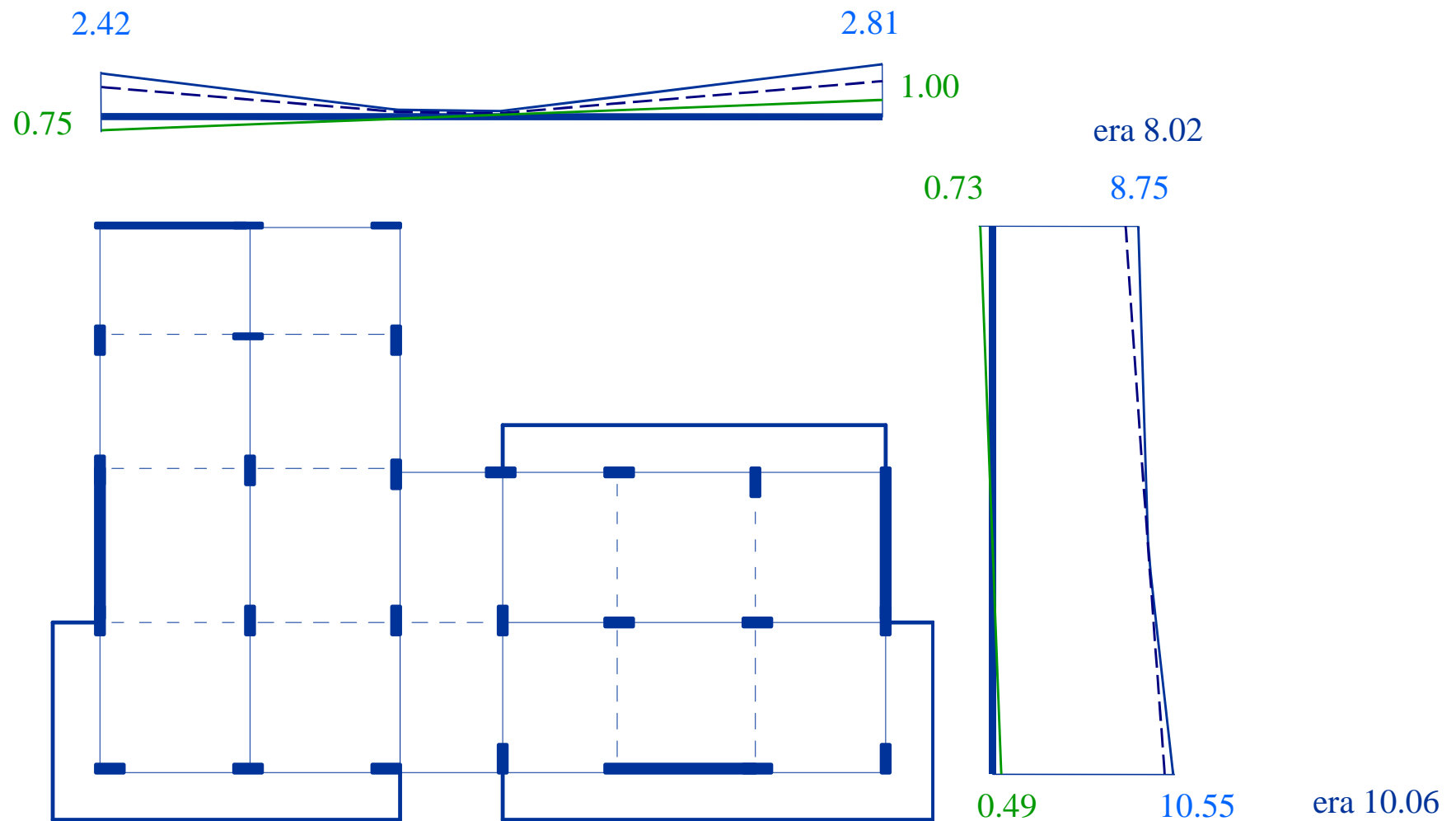
Esame dei risultati

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

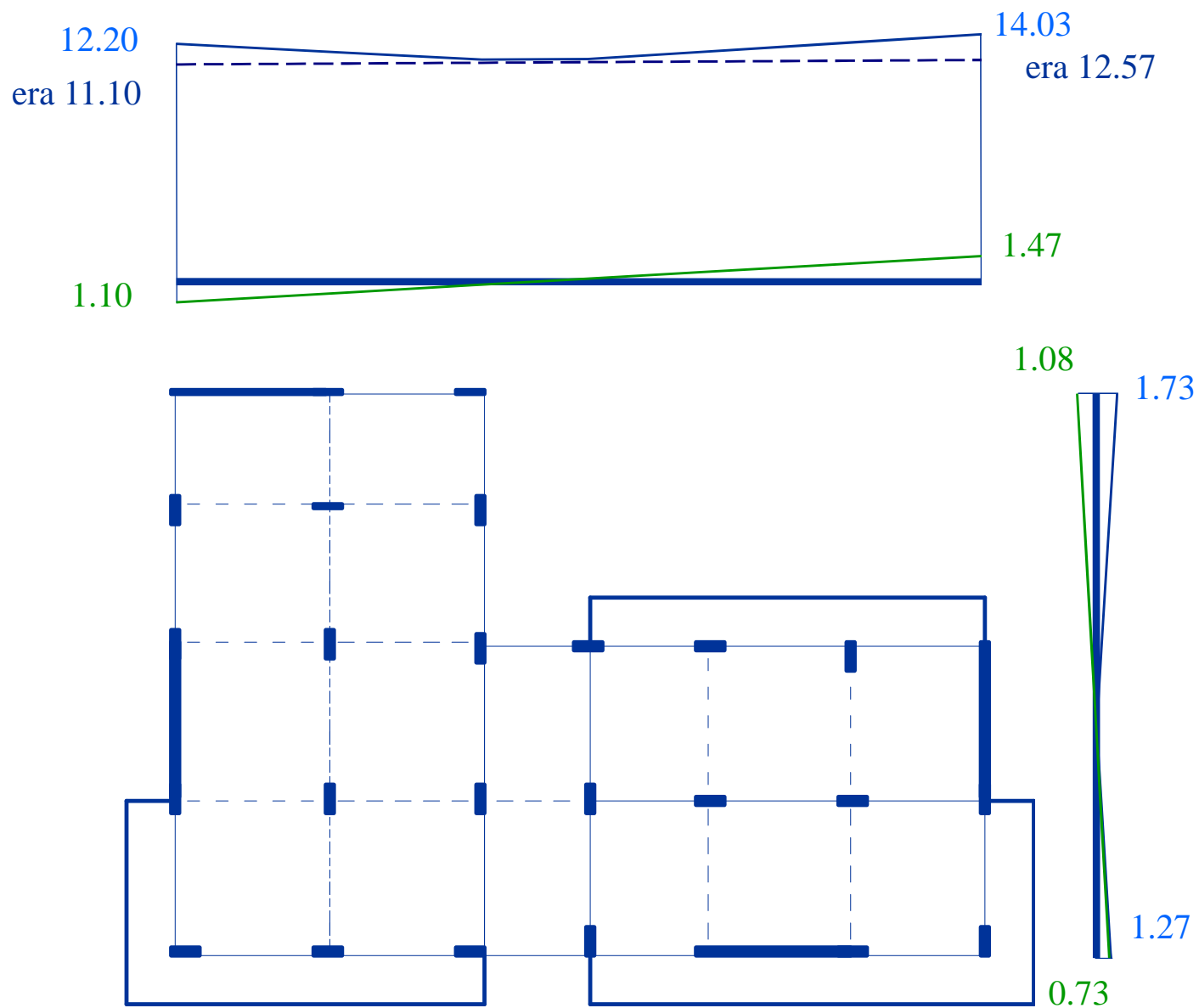
Fornisce informazioni su:

- 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

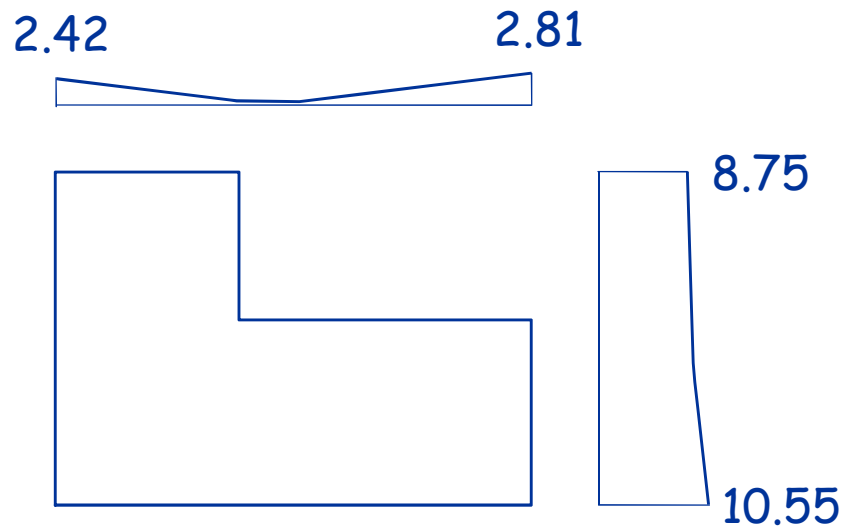
Le componenti orizzontali

“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”

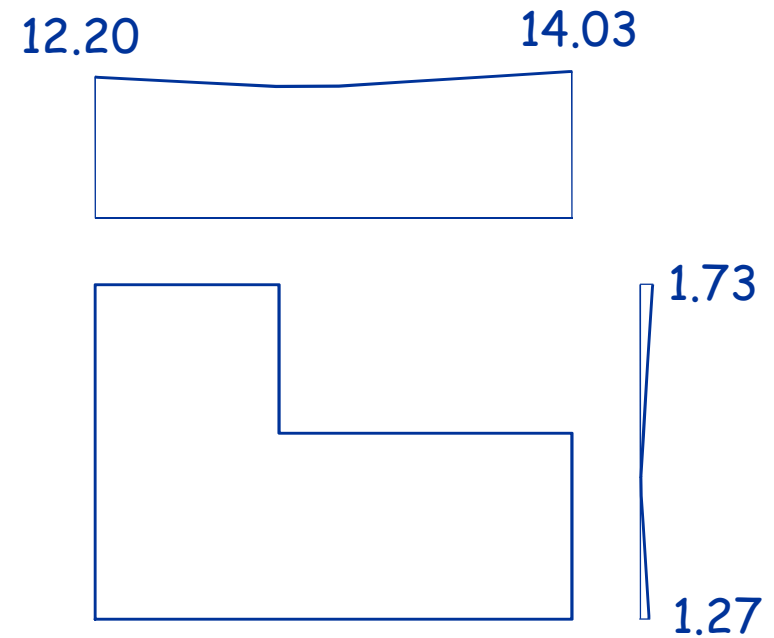
In che modo capire quanta importanza ha questa combinazione?

Ragioniamo ancora esaminando gli spostamenti

Effetto complessivo del sisma separatamente nelle due direzioni

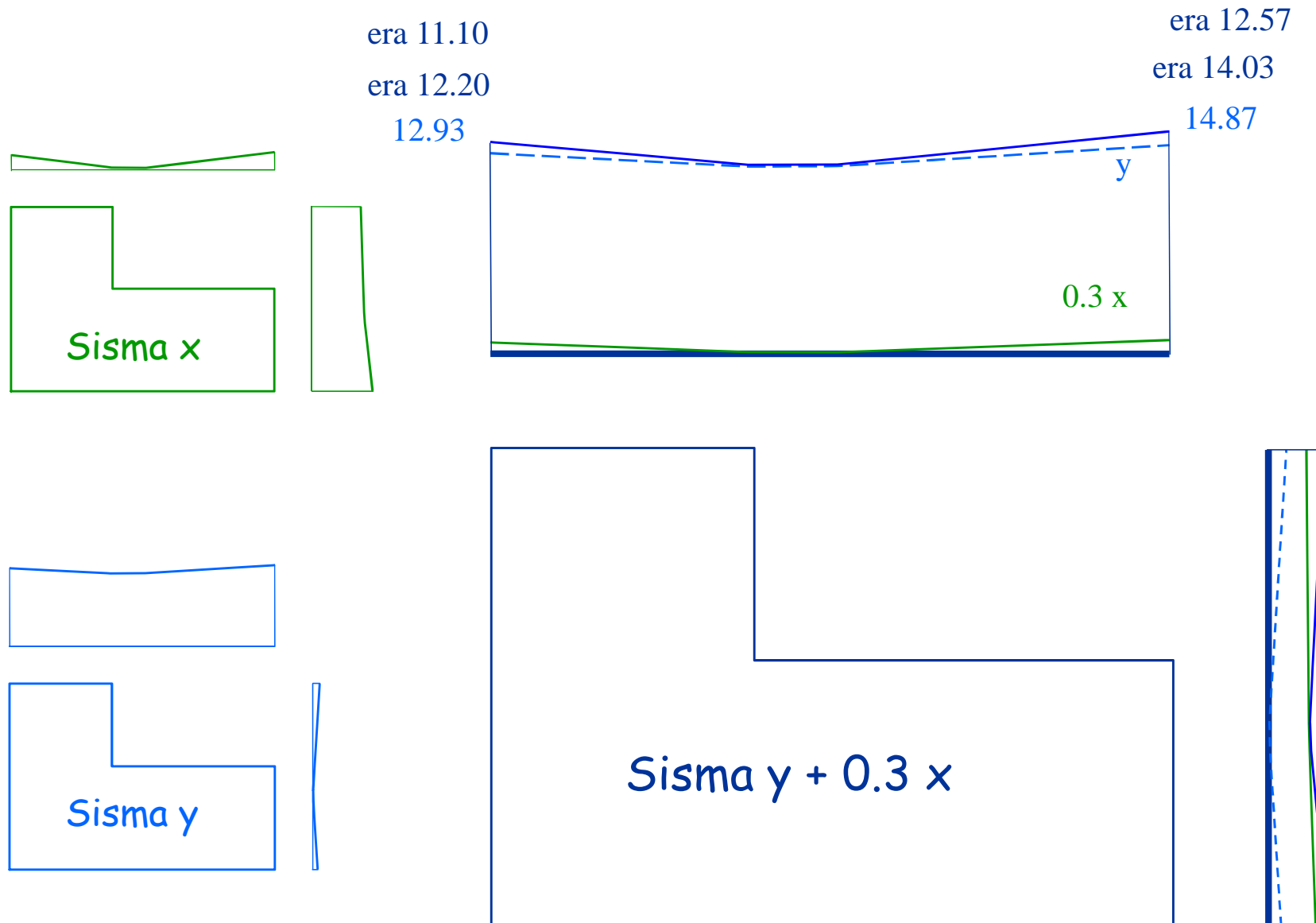


Sisma in
direzione x

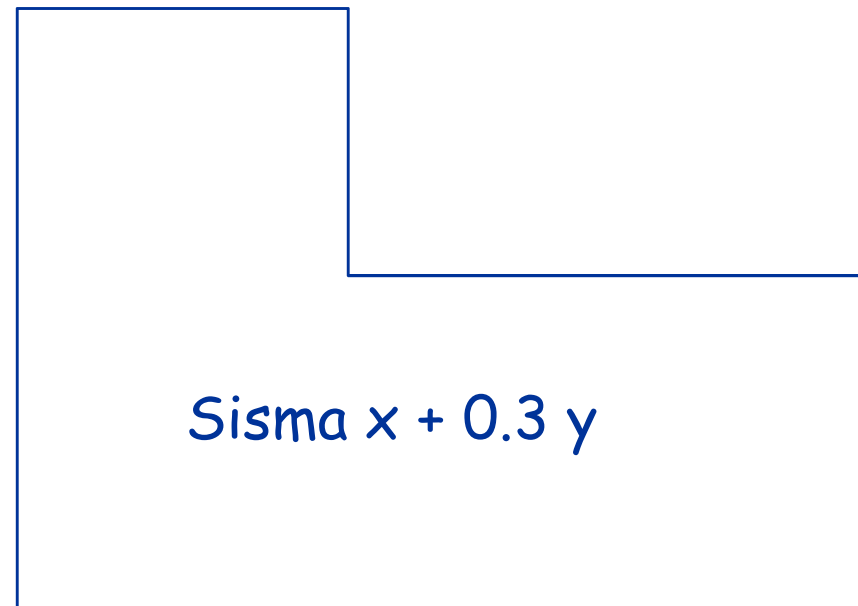
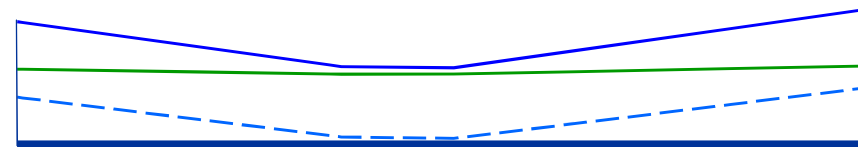
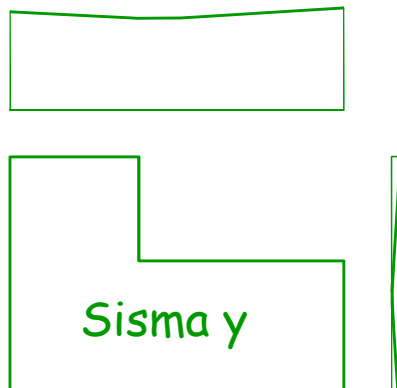
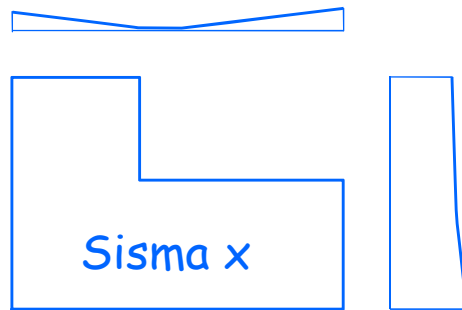


Sisma in
direzione y

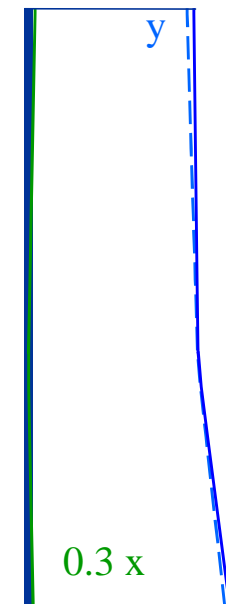
Inviluppo: sisma y + 0.3 sisma x analisi modale



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

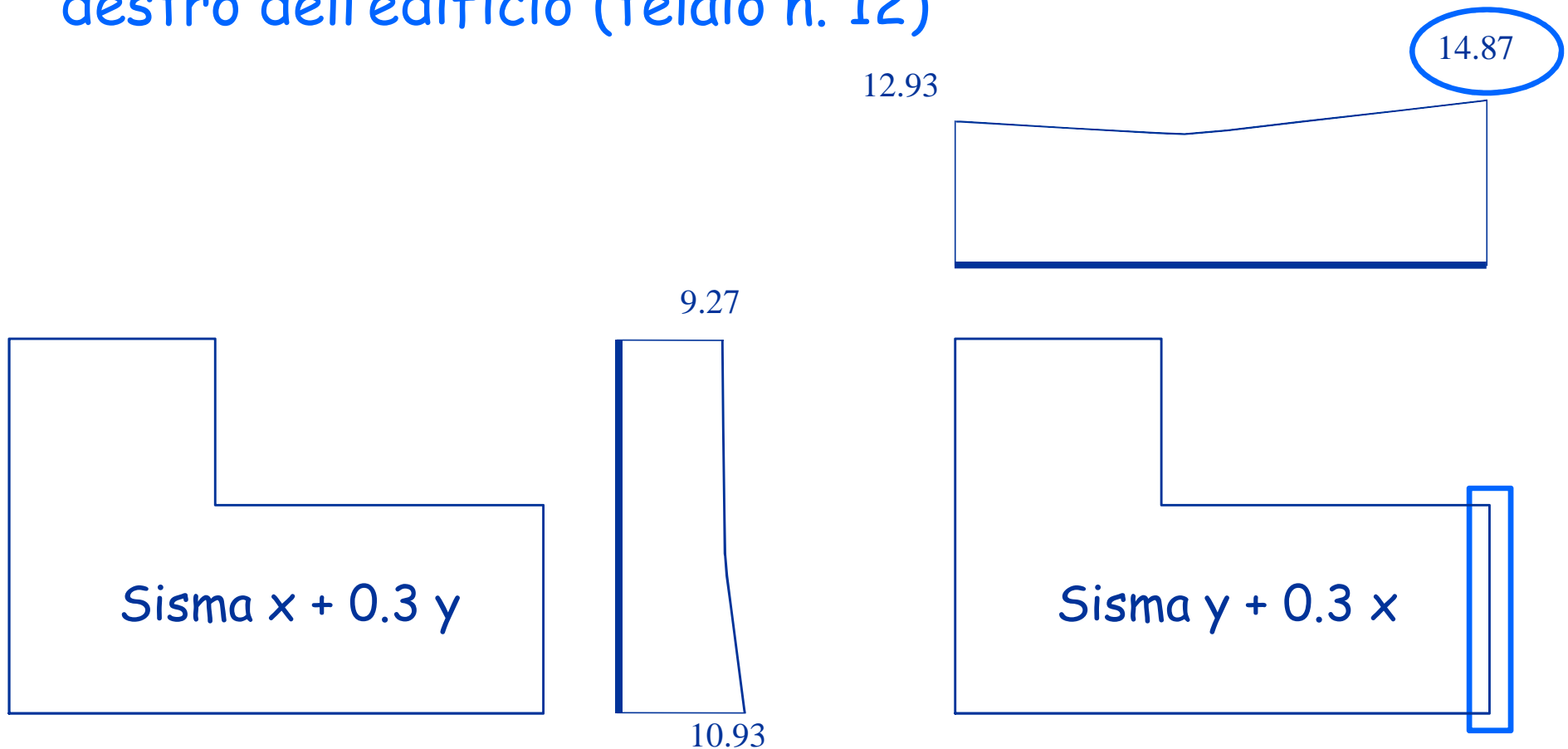
Stato limite di danno

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

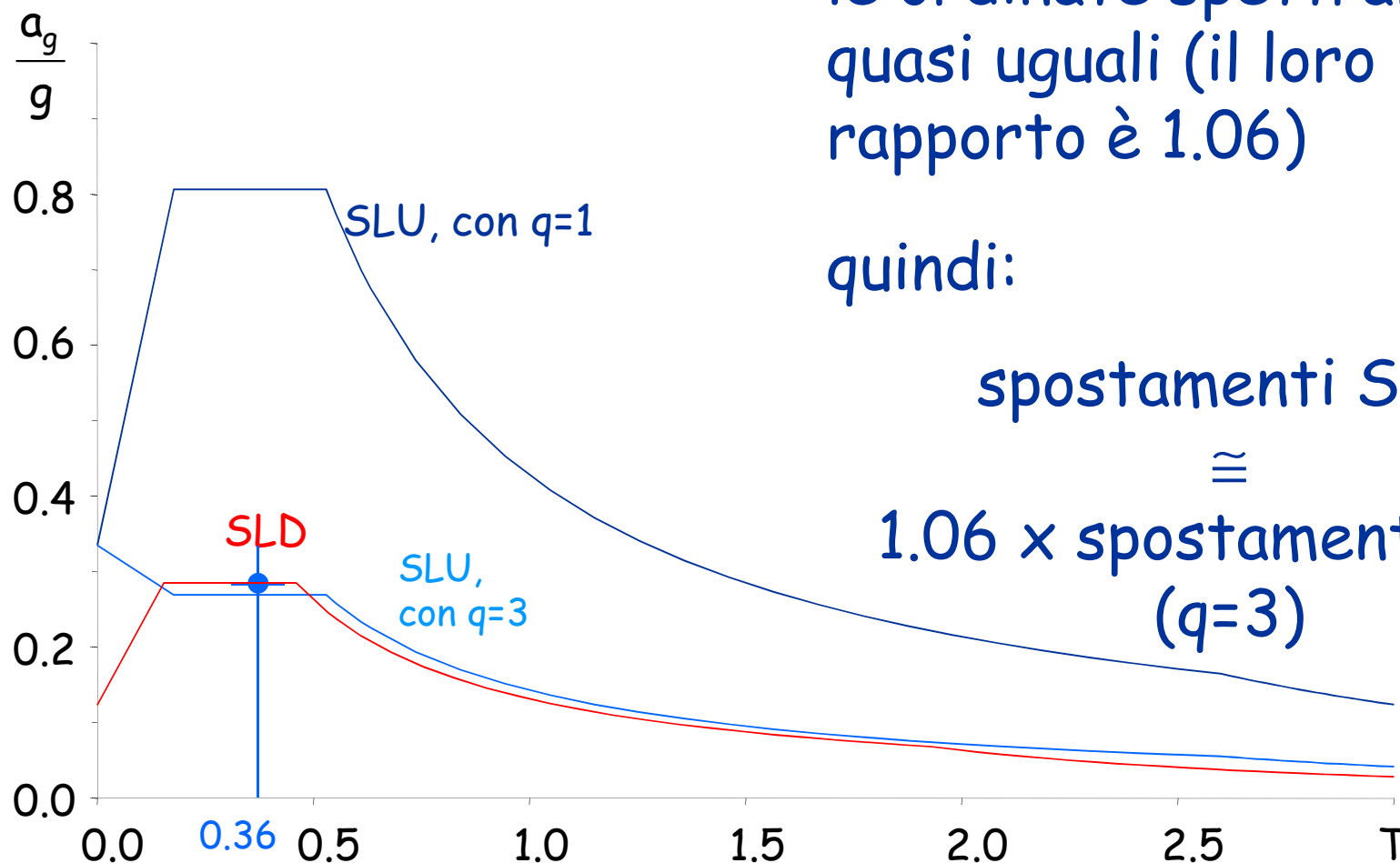
nel caso in esame, per un periodo pari a circa 0.36 s le ordinate spettrali sono quasi uguali (il loro rapporto è 1.06)

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)