

Incontro di aggiornamento

Edifici antisismici in calcestruzzo armato
Aspetti strutturali e geotecnici secondo le NTC08

4 - Esame dei risultati del calcolo

Orizzonte Hotel, Acireale
16-17 dicembre 2010

Aurelio Ghersi

Carichi verticali e sisma

Quali carichi verticali e quali masse considerare in accoppiata al sisma?

Vecchia norma

- Carichi verticali massimi (g_k+q_k) per TA, (g_d+q_d) per SLU
- Masse ridotte ($g_k+s q_k$) [forze x 1.5 per SLU]

Nuova norma

- Carichi verticali e masse con valori quasi permanenti ($g_k+\psi_2 q_k$)

Valutazione delle masse per SLU secondo le NTC 08

$$W = g_k + \psi_2 q_k$$

$\psi_2 q_k$ = valore quasi permanente del carico variabile

	ψ_2
Categoria A. Ambienti ad uso residenziale	0.3
Categoria B. Uffici	0.3
Categoria C. Ambienti suscettibili di affollamento	0.6
Categoria D. Ambienti ad uso commerciale	0.6
Categoria E. Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	0.8
Categoria F. Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0.6
Categoria G. Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0.3
Categoria H. Coperture	0.0
Vento	0.0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0.0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0.2
Variazioni termiche	0.0

Altri problemi
nella modellazione delle azioni sismiche

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

Problemi concettualmente giusti,
ma che complicano notevolmente il calcolo

Modellazione delle azioni

1. Eccentricità accidentale

“Per tenere conto della variabilità spaziale del moto sismico, nonché di eventuali incertezze nella localizzazione delle masse, al centro di massa deve essere attribuita una eccentricità accidentale rispetto alla sua posizione quale deriva dal calcolo”

“Per i soli edifici ed in assenza di più accurate determinazioni l'eccentricità accidentale in ogni direzione non può essere considerata inferiore a 0,05 volte la dimensione dell'edificio misurata perpendicolarmente alla direzione di applicazione dell'azione sismica. Detta eccentricità è assunta costante, per entità e direzione, su tutti gli orizzontamenti”

Distribuzione effettiva delle masse

L'aliquota di carichi variabili presente in occasione del sisma potrebbe non essere uniformemente distribuita nell'edificio

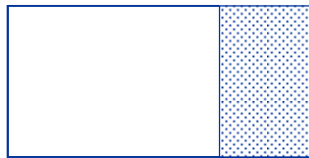


Il centro di massa deve quindi essere spostato di una quantità detta "eccentricità accidentale"

Eccentricità accidentale

Perché il 5% ?

Se si applica il carico variabile massimo su un'area pari a $\psi_2 \times$ area totale si ottiene un'eccentricità nettamente minore



$$e_{a1} = 0.021 L_1$$



$$e_{a2} = 0.021 L_2$$

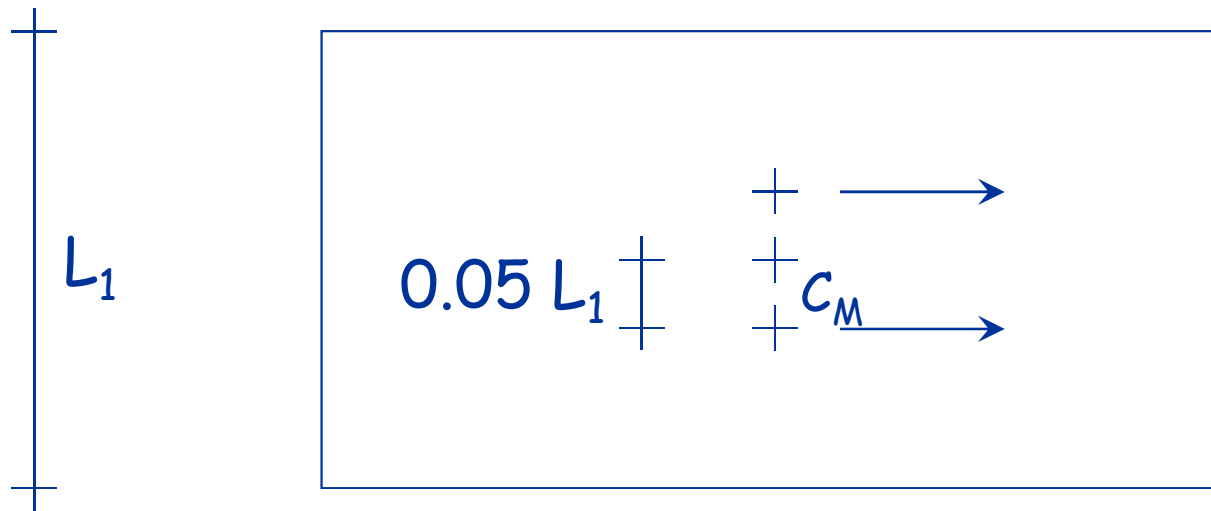


$$e_{a1} = 0.015 L_1$$
$$e_{a2} = 0.015 L_2$$

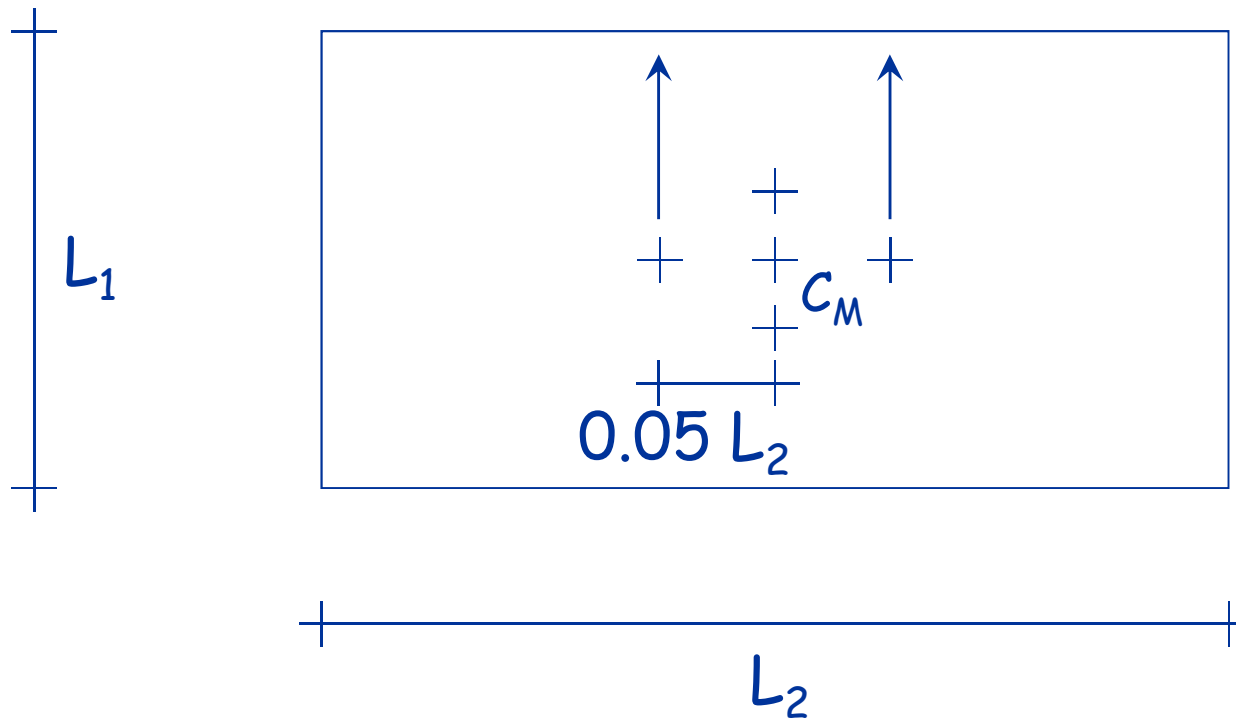
Il valore 0.05 è maggiore, per tener conto di:

- amplificazione della rotazione per effetti dinamici
- rotazione per lo sfasamento dell'onda sismica da un estremo all'altro dell'edificio

Eccentricità accidentale



Eccentricità accidentale



Aumentano, di molto, le
combinazioni di carico

Eccentricità accidentale

Come tenerne conto?

Effettuando più volte l'analisi modale, considerando il centro di massa spostato di una quantità pari a e_a

oppure

Considerando le forze statiche applicate al centro di massa spostato di una quantità pari a e_a

ovvero

Considerando l'effetto di coppie pari alle forze statiche per l'eccentricità e_a

Eccentricità accidentale

Come tenerne conto?

Preferisco questa impostazione perché così:

- riduco il numero di schemi base di calcolo da controllare
- giudico più facilmente l'effetto della eccentricità accidentale
- evito di accentuarne l'effetto (l'eccentricità e_a è già amplificata per tener conto di effetti dinamici)

Considerando l'effetto di coppie pari alle forze statiche per l'eccentricità e_a

Considerazioni sull'eccentricità accidentale

L'eccentricità accidentale dovrebbe dipendere dal rapporto carichi variabili / carichi permanenti e quindi essere legata alla tipologia strutturale e alla destinazione d'uso

La norma fornisce una indicazione semplice per tener conto degli effetti dell'eccentricità accidentale:

amplificare per $1 + 0.6 \frac{x}{L}$ x distanza da C_M
 $x=L/2 \Rightarrow 1.30$

In genere molto cautelativo

Non corretto per edifici deformabili torsionalmente

Modellazione delle azioni

2. Combinazione delle componenti

Le componenti orizzontali e verticali del sisma agiscono simultaneamente

Esse però non sono correlate
(i massimi si raggiungono in istanti diversi)

Come combinarle?

Criterio generale (NTC 08, punto 7.3.5):

sommare

- gli effetti massimi di una componente dell'azione
- il 30% dei massimi prodotti dalle altre componenti

Componente verticale

Se ne tiene conto solo per:

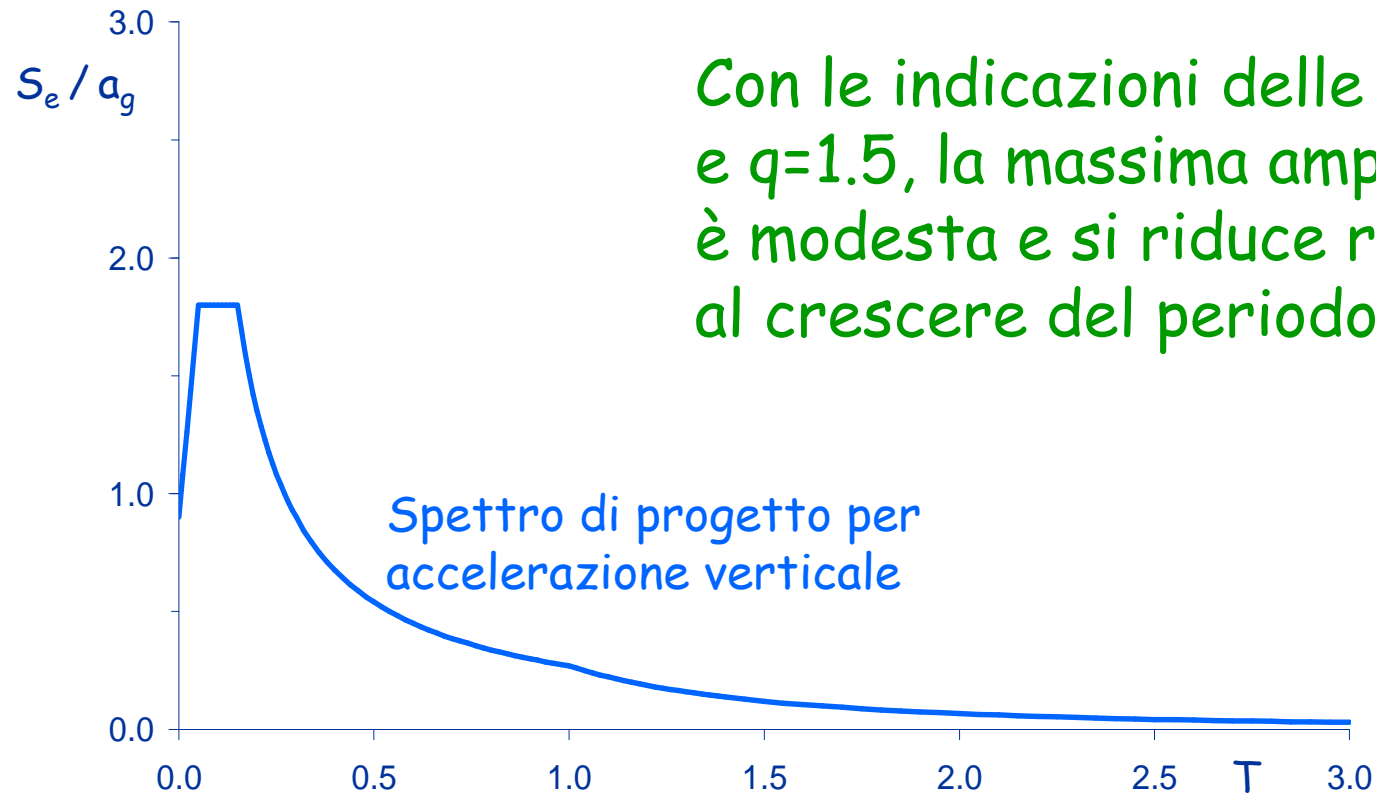
- Elementi con luce maggiore di 20 m
- Solai precompressi di luce superiore a 8 m
- Sbalzi di luce superiore a 4 m
- Elementi spingenti
- Pilastri in falso
- Edifici con piani sospesi

Si noti che l'accelerazione spettrale dipende dal periodo e dalla zona sismica

Componente verticale

Considerazioni

$$F_v = 1.35 F_o \sqrt{a_g / g}$$

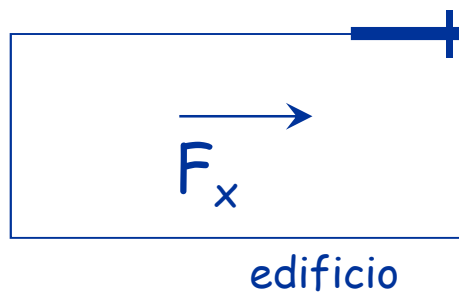


Con le indicazioni delle NTC08,
e $q=1.5$, la massima amplificazione
è modesta e si riduce rapidamente
al crescere del periodo

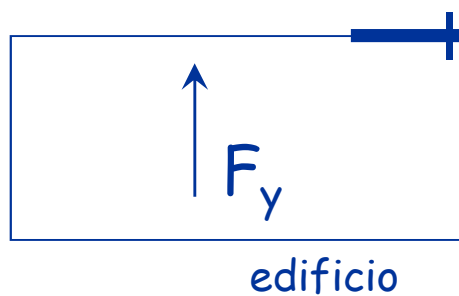
Spettro di progetto per
accelerazione verticale

Componenti orizzontali per le travi

Azione in una direzione più 30% di azione nell'altra



$$M = 230 \text{ kNm}$$



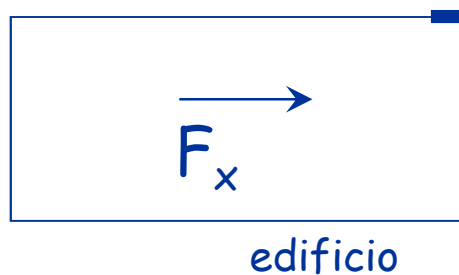
$$M = 50 \text{ kNm}$$

causato dalla
rotazione

$$M_d = 230 + 0.3 \times 50 = \\ = 245 \text{ kNm}$$

Componenti orizzontali per i pilastri

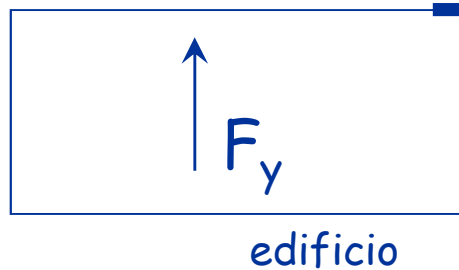
Stesso criterio,
ma occorre tener conto
della direzione del sisma prevalente



$$M_y = 280 \text{ kNm}$$

$$M_x = 45 \text{ kNm}$$

causato dalla
rotazione

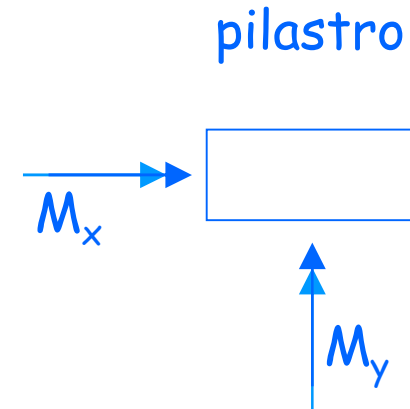


$$M_y = 50 \text{ kNm}$$

$$\text{causato dalla}$$

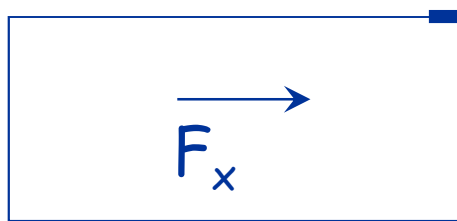
rotazione

$$M_x = 105 \text{ kNm}$$



Componenti orizzontali per i pilastri

Stesso criterio,
ma occorre tener conto
della direzione del sisma prevalente

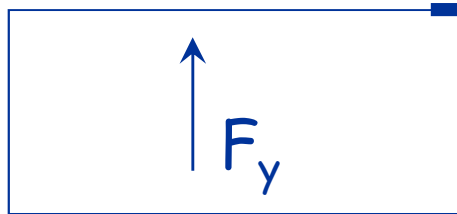


edificio

$$M_y = 280 \text{ kNm}$$

$$M_x = 45 \text{ kNm}$$

causato dalla
rotazione



edificio

$$M_y = 50 \text{ kNm}$$

causato dalla
rotazione

$$M_x = 105 \text{ kNm}$$

Sisma prevalente
in direzione x

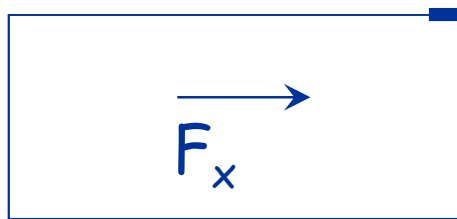
$$M_{d,y} = 280 + 0.3 \times 50 = \\ = 295 \text{ kNm}$$

$$M_{d,x} = 45 + 0.3 \times 105 = \\ = 77 \text{ kNm}$$

Verifica a presso-
flessione deviata

Componenti orizzontali per i pilastri

Stesso criterio,
ma occorre tener conto
della direzione del sisma prevalente

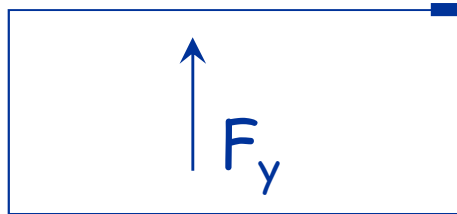


edificio

$$M_y = 280 \text{ kNm}$$

$$M_x = 45 \text{ kNm}$$

causato dalla
rotazione



edificio

$$M_y = 50 \text{ kNm}$$

causato dalla
rotazione

$$M_x = 105 \text{ kNm}$$

Sisma prevalente
in direzione y

$$M_{d,y} = 50 + 0.3 \times 280 = \\ = 134 \text{ kNm}$$

$$M_{d,x} = 105 + 0.3 \times 45 = \\ = 119 \text{ kNm}$$

Verifica a presso-
flessione deviata

Componenti orizzontali per i pilastri

Nota:

Allo SLU, la pressoflessione deviata è molto meno gravosa che alle TA

Se la struttura è ben dimensionata, cioè ha rotazioni non elevate, si può progettare a pressoflessione retta, separatamente per le due direzioni, mantenendosi appena in abbondanza

La verifica a pressoflessione deviata sarà quasi sicuramente soddisfatta

Come gestire questi nuovi aspetti ?

Analisi strutturale

Nel passato:

- Carichi verticali, col loro valore massimo g_k+q_k se si usa il metodo delle tensioni ammissibili
- Forze in direzione x , con analisi statica o modale; masse valutate con $g_k+s q_k$
- Forze in direzione y

Oggi, necessità di:

- Distinguere tra carichi verticali in assenza di sisma (maggiori) e in presenza di sisma (minori)
- Tener conto dell'eccentricità accidentale
- Combinare l'effetto delle diverse componenti del sisma

Conseguenze per l'analisi strutturale

Nel passato:

- Carichi verticali, col loro valore massimo g_k+q_k se si usa il metodo delle tensioni ammissibili
- Forze in direzione x , con analisi statica o modale; masse valutate con $g_k+s q_k$
- Forze in direzione y

Quindi:

- 3 schemi base
- da combinare in 4 schemi
 - $q \pm F_x$
 - $q \pm F_y$

Conseguenze per l'analisi strutturale

Oggi, necessità di:

- Distinguere tra carichi verticali in assenza di sisma (maggiori) e in presenza di sisma (minori)
- Tener conto dell'eccentricità accidentale
- Combinare l'effetto delle diverse componenti del sisma

Quindi:

- Un numero di schemi da calcolare molto più alto

Quanti?

Quante combinazioni di carico?

In assenza di sisma:

- schema base, col carico verticale massimo ($g_d + q_d$) su tutte le campate di trave
- eventuali altri schemi col carico variabile a scacchiera

Nota: l'effetto del carico variabile a scacchiera può essere stimato in maniera approssimata

Con le vecchie norme l'effetto dei soli carichi verticali era compreso tra i valori dovuti a $q \pm F$

Ora invece no, perché in presenza di sisma i carichi verticali sono ridotti

Quante combinazioni di carico?

In presenza di sisma:

- 1 • carico verticale con valore ridotto ($g_k + \psi_2 q_k$) su tutte le campate di trave
- 2 • forze sismiche (statiche o modali) in direzione x / y
- 4 • verso delle forze sismiche: positivo / negativo
- 8 • eccentricità accidentale: positiva / negativa
- 16 • forze in una direzione più 0.3 forze nell'altra direzione, prese col segno: positivo / negativo
- 32 • eccentricità nell'altra direzione: positiva / negativa

Azione sismica principale	segno	eccentricità	Azione sismica secondaria	eccentricità	N° comb.
E_x	+	$+ e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	1
			$- 0.3 E_y$	$- e_x$	2
			$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	3
			$- 0.3 E_y$	$- e_x$	4
		$- e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	5
			$- 0.3 E_y$	$- e_x$	6
			$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	7
			$- 0.3 E_y$	$- e_x$	8
	-	$+ e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	9
			$- 0.3 E_y$	$- e_x$	10
			$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	11
			$- 0.3 E_y$	$- e_x$	12
		$- e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	13
			$- 0.3 E_y$	$- e_x$	14
			$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	15
			$- 0.3 E_y$	$- e_x$	16
E_y	+	$+ e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	17
			$- 0.3 E_x$	$- e_y$	18
			$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	19
			$- 0.3 E_x$	$- e_y$	20
		$- e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	21
			$- 0.3 E_x$	$- e_y$	22
			$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	23
			$- 0.3 E_x$	$- e_y$	24
	-	$+ e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	25
			$- 0.3 E_x$	$- e_y$	26
			$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	27
			$- 0.3 E_x$	$- e_y$	28
		$- e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	29
			$- 0.3 E_x$	$- e_y$	30
			$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	31
			$- 0.3 E_x$	$- e_y$	32

Tante combinazioni di carico... Come gestirle?

Risultati dettagliati per tutte le combinazioni di carico?

Una montagna di valori (e di carta) che nessuno avrà mai il coraggio di esaminare
(inoltre: che senso ha per me giudicare l'effetto di, ad esempio, $q - F_x + e_{ay} - 0.3 F_y - e_{ax}$?)

Inviluppo dei risultati di tutte le combinazioni di carico?

Mi dice solo se la verifica è soddisfatta o no;
ma come capire il comportamento della struttura?

Tante combinazioni di carico... Come gestirle?

Risultati dettagliati degli schemi base, più involuppo
dei risultati di tutte le combinazioni di carico?

Dai risultati di ciascuno schema base posso capire il
comportamento della struttura

L'involuppo mi fornisce il giudizio complessivo

Schemi base
suggeriti:

1. carichi verticali max (senza sisma)
2. carichi verticali min (con sisma)
3. forze in direzione x (statiche o modali)
4. forze in direzione y (statiche o modali)
5. eccentricità accidentale per forze in dir. x
6. eccentricità accidentale per forze in dir. y

coppie (statiche)



Giudicare gli schemi base e le combinazioni di carico

Carichi verticali:

siamo già abituati ad esaminarli e giudicarli

Forze orizzontali:

discutere separatamente analisi statica e modale

Discutere poi:

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

Discussione dei risultati:
sisma - analisi statica

Un mare di numeri. Come non perdersi?

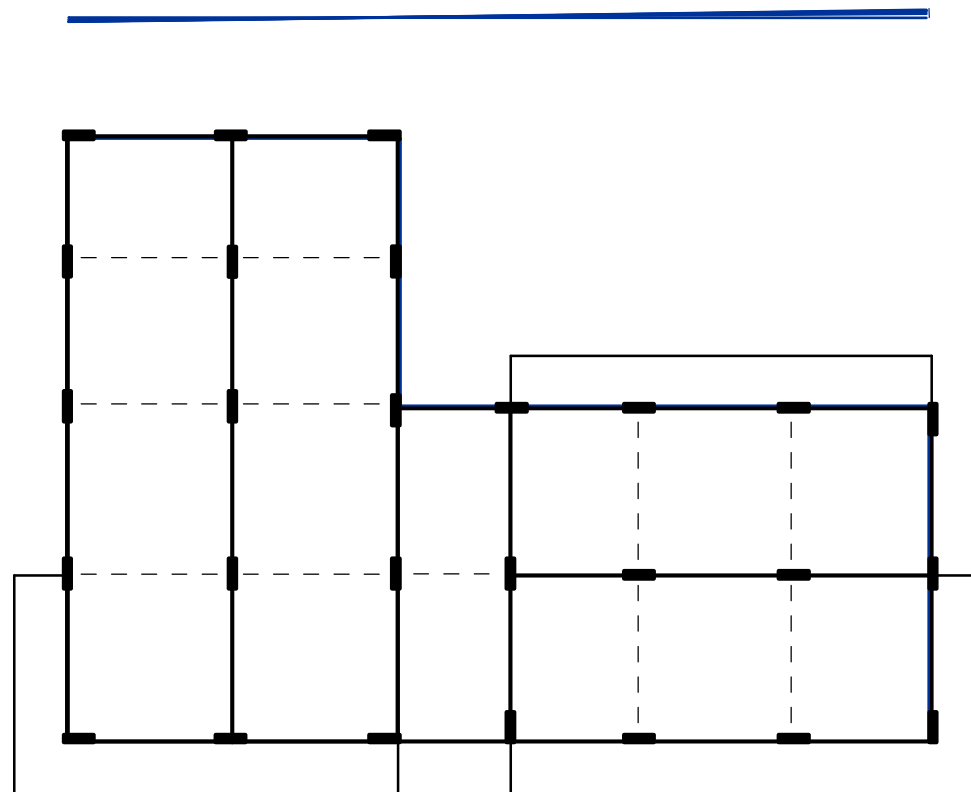
Analisi statica

- Esaminare gli spostamenti prodotti dalle forze nelle due direzioni
 - spostamenti analoghi nelle due direzioni o molto diversi?
 - solo traslazione, rotazione dell'impalcato modesta oppure forte?
- Stimare e controllare il periodo
- Esaminare i momenti massimi nei pilastri e nelle travi
 - rispettano le previsioni o no?

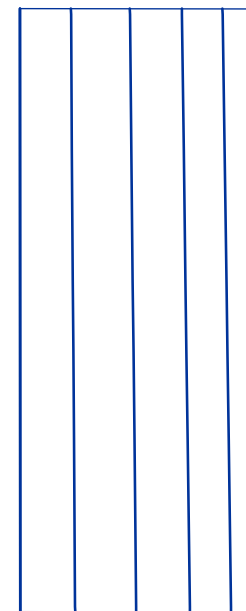
Spostamenti per F_x

0.22 mm

0.36 mm



11.38 mm



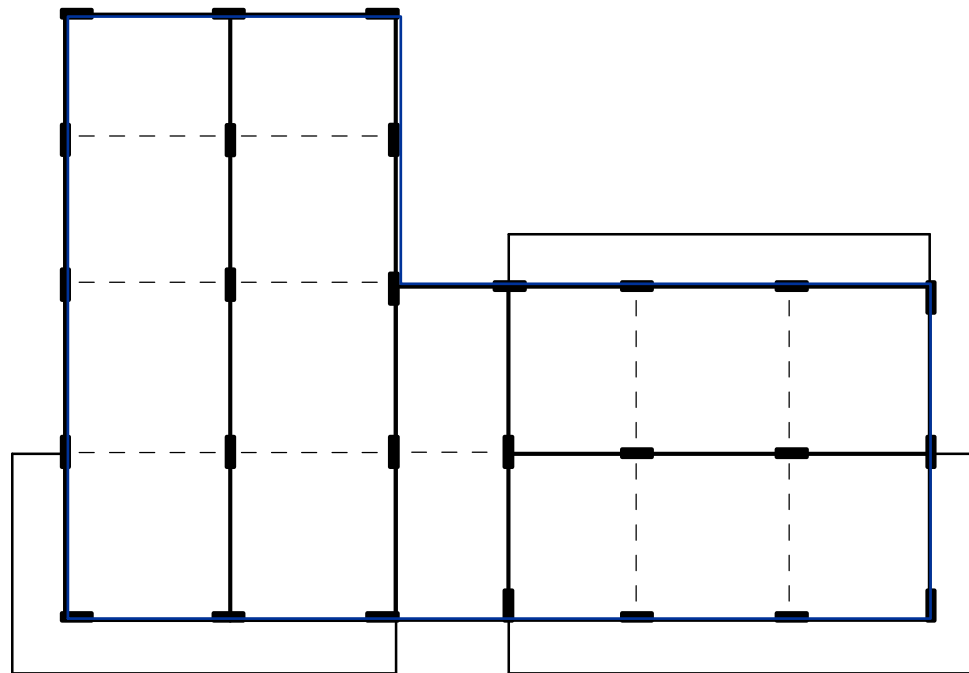
11.77 mm

Spostamenti per F_y

8.99 mm



14.91 mm

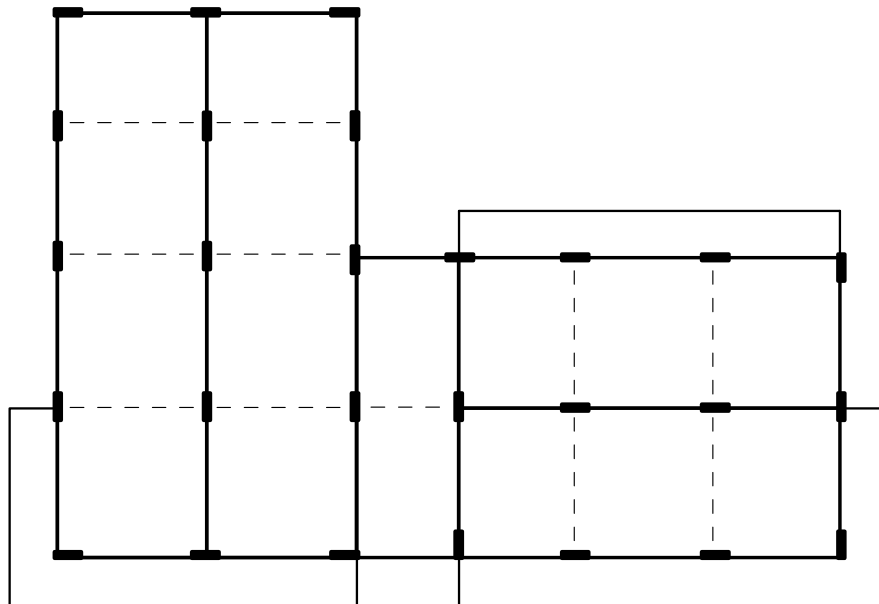
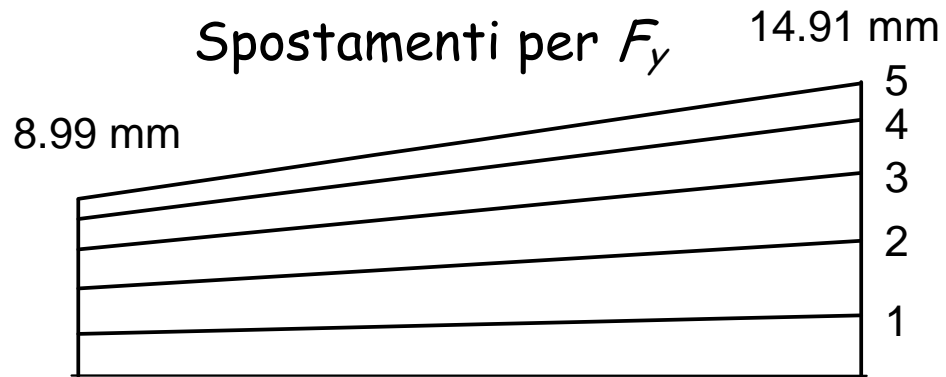


2.67 mm

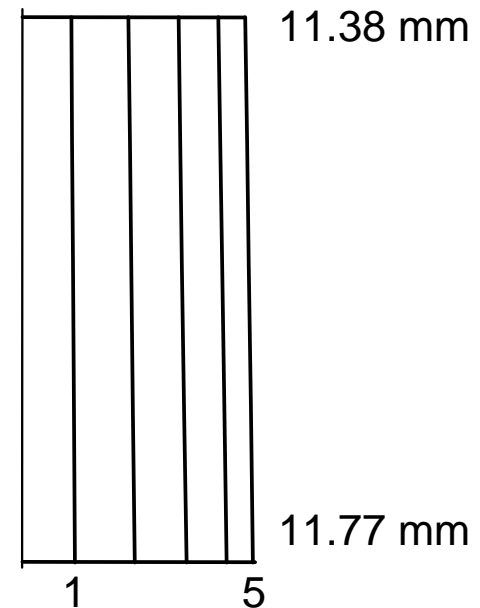


1.54 mm

Spostamenti



Spostamenti
per F_x

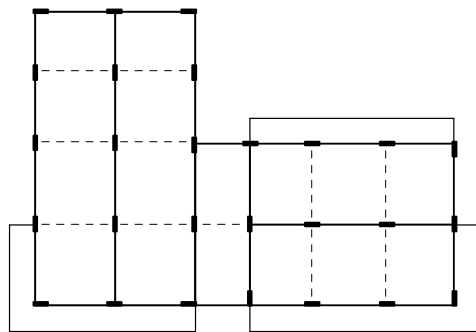


Spostamenti classe di duttilità "A"

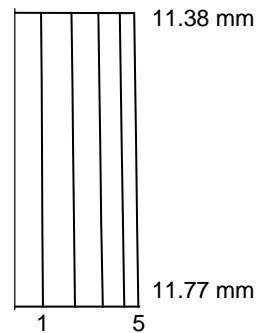
Rotazione non
trascurabile per forze
in direzione y



La parte destra
andrebbe irrigidita



Spostamenti
per F_x



mediamente, spostamenti
analoghi nelle due direzioni
(ma i massimi per F_y sono
maggiori di circa il 25%)

Spostamenti per forze in
direzione x uniformi

Periodo proprio della struttura (Metodo di Rayleigh)

Una buona stima del periodo si ottiene:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N m_i u_i^2}{\sum_{i=1}^N F_i u_i}}$$

m_i : massa di piano

F_i : Forza di piano

u_i : spostamento del baricentro di piano
(provocato dalla forze F_i)

Periodo proprio della struttura (direzione x)

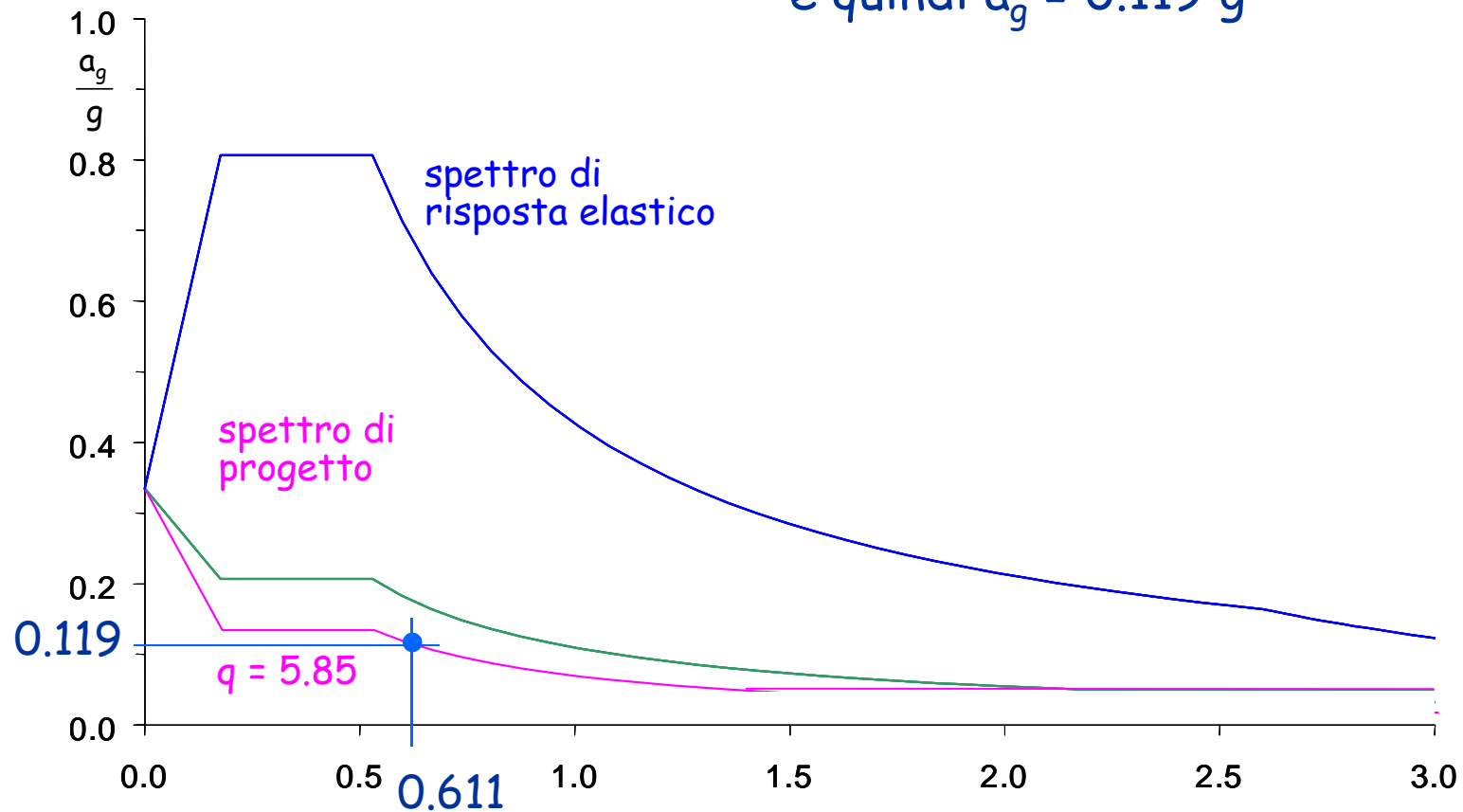
Piano	m (kN s ² /m)	F _x (kN)	u _x (mm)	F _x u _x (kN m)	m u _x ² (kN m s ²)
Torrino+V	313.1	506.4	11.628	5888.2	42.34
IV	334.9	435.9	10.307	4492.7	35.58
III	334.9	330.2	8.292	2738.2	23.03
II	334.9	224.6	5.652	1269.2	10.70
I	297.2	105.5	2.646	279.2	2.08
somma				14667.4	113.72

$$T_x = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N m_i u_{xi}^2}{\sum_{i=1}^N F_{xi} u_{xi}}}$$

$$T_x = 0.553 \text{ s}$$

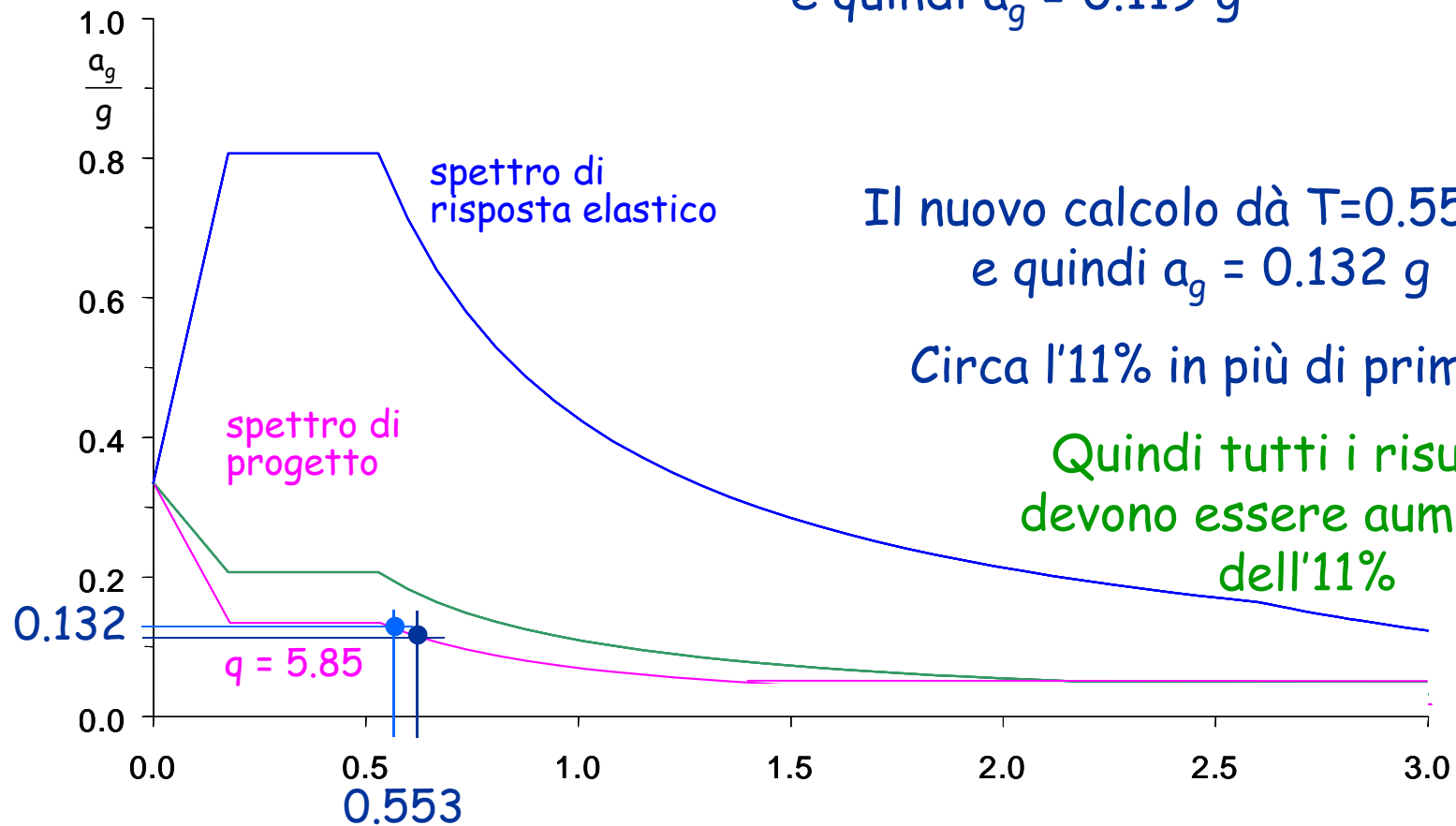
Esempio - ordinata spettrale

Si era ipotizzato $T=0.611$ s
e quindi $a_g = 0.119$ g



Esempio - ordinata spettrale

Si era ipotizzato $T=0.611$ s
e quindi $a_g = 0.119$ g



Il nuovo calcolo dà $T=0.553$ s
e quindi $a_g = 0.132$ g

Circa l'11% in più di prima

Quindi tutti i risultati
devono essere aumentati
dell'11%

Sollecitazioni per forze in direzione x senza incremento per rotazione

Piano	Taglio globale (kN)	Taglio pilastro (kN)	Momento pilastro (kNm)	Momento trave (kNm)
5	549.6	42.3	67.6	33.8
4	968.2	74.5	119.2	93.4
3	1285.3	98.9	158.2	138.7
2	1500.9	115.5	184.7	171.5
1 testa	1593.8	122.6	176.5	180.6
piede			309.0	

Sollecitazioni per forze in direzione x senza incremento per rotazione

Taglio previsto e taglio massimo riscontrato, per pilastri allungati in x

Piano	Taglio previsto (kN)	Taglio max (kN)
5	42.3	39.12
4	74.5	69.41
3	98.9	92.07
2	115.5	108.93
1	122.6	111.18

Il taglio massimo è abbastanza uniforme
I valori sono leggermente minori rispetto alle previsioni

Nota:
nei pilastri di estremità il taglio è minore
(circa il 50% ai piani superiori, il 75% al piede del I ordine)

Nota: i valori devono essere aumentati del rapporto 0.131/0.119 (circa 11%)

Sollecitazioni per forze in direzione x senza incremento per rotazione

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Momento previsto (kNm)	Momento max (kNm)
5	67.6	70.93
4	119.2	122.75
3	158.2	155.93
2	184.7	175.03
1 testa	176.5	153.45
piede	309.0	246.78

Il momento massimo è abbastanza uniforme

I valori corrispondono alle previsioni ai piani superiori, sono abbastanza più piccoli a quelli inferiori

Nota:

nei pilastri di estremità il momento è minore (circa il 50-60% ai piani superiori, l'85% al piede del I ordine)

Sollecitazioni per forze in direzione x senza incremento per rotazione

Travi emergenti dei telai in direzione x

Piano	Momento previsto (kNm)	Momento max (kNm)
5	33.8	37.57
4	93.4	90.00
3	138.7	133.66
2	171.5	166.76
1	180.6	174.68

Il momento massimo è abbastanza uniforme,

sia come distribuzione in pianta che in base alla posizione nel telaio (incluse campate di estremità)

I valori corrispondono bene alle previsioni

Periodo proprio della struttura (direzione y)

Applicando la formula di Rayleigh

si trova
$$T_y = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N m_i u_{yi}^2}{\sum_{i=1}^N F_{yi} u_{yi}}}$$

$$T_y = 0.552 \text{ s}$$

Quasi identico all'altra direzione

Si ha anche per questa direzione un incremento dell'accelerazione di circa l'11%

Sollecitazioni per forze in direzione y senza incremento per rotazione

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Taglio previsto (kN)	Taglio max, sin (kN)	Taglio max, des (kN)
5	42.3	27.31	44.93
4	74.5	50.93	82.85
3	98.9	68.24	112.27
2	115.5	80.52	135.83
1	122.6	89.89	122.95

Il taglio varia in base alla posizione in pianta a causa della rotazione

I valori massimi sono leggermente maggiori rispetto alle previsioni, tranne al I ordine (5-15% a seconda dei piani)

Nota: i valori devono essere aumentati del rapporto 0.131/0.119 (circa 11%)

Sollecitazioni per forze in direzione y

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Momento previsto (kNm)	Momento max, sin (kNm)	Momento max, des (kNm)
5	67.6	50.26	82.29
4	119.2	90.90	147.14
3	158.2	116.18	190.12
2	184.7	131.15	220.89
1 testa	176.5	125.69	165.35
piede	309.0	197.91	277.27

Il momento varia in base alla posizione in pianta a causa della rotazione

I valori massimi sono leggermente maggiori rispetto alle previsioni, tranne al I ordine (15-20% a seconda dei piani)

Sollecitazioni per forze in direzione y

Travi emergenti dei telai in direzione y

Piano	Momento previsto (kNm)	Momento max, sin (kNm)	Momento max, des (kNm)
5	33.8	26.45	44.37
4	93.4	65.80	111.80
3	138.7	95.71	166.11
2	171.5	119.36	205.49
1	180.6	130.89	212.06

Il momento varia in base alla posizione in pianta a causa della rotazione

I valori massimi sono leggermente maggiori rispetto alle previsioni (15-20% a seconda dei piani)

Discussione dei risultati: analisi modale

Un mare di numeri. Come non perdersi?

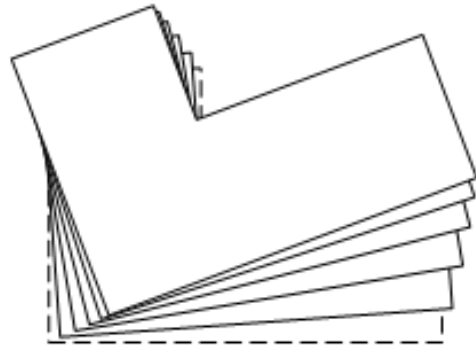
Analisi modale

- 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?

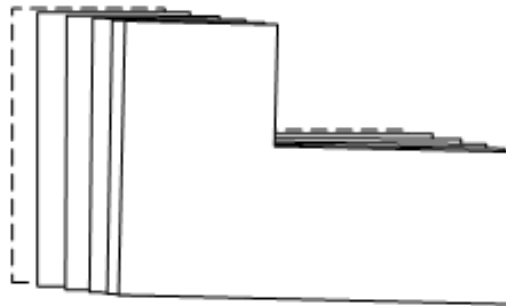
Un mare di numeri. Come non perdersi? Analisi modale

- 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 i momenti massimi nei pilastri e nelle travi
 - rispettano le previsioni o no?

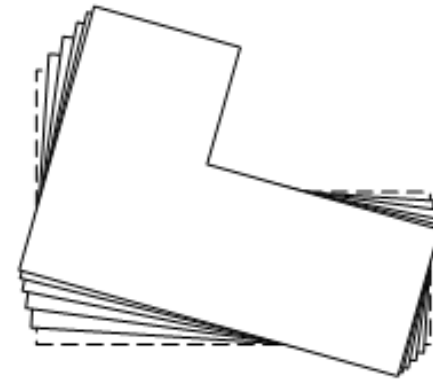
Deformate modali



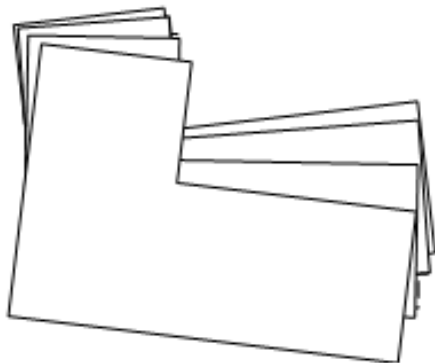
Modo 1



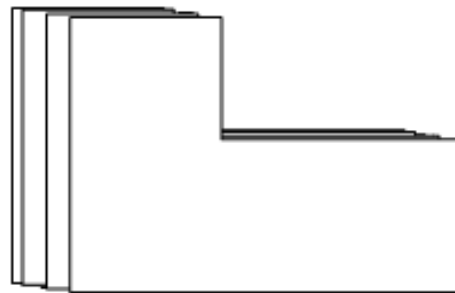
Modo 2



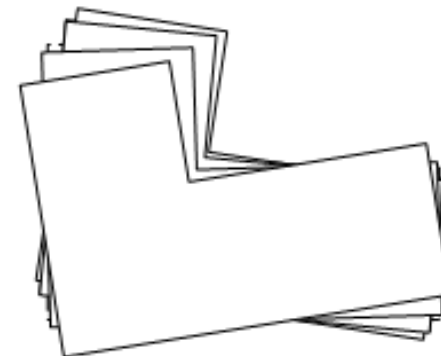
Modo 3



Modo 4



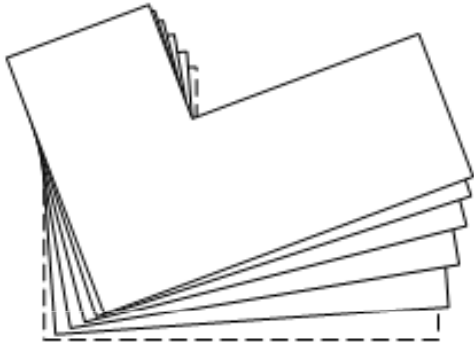
Modo 5



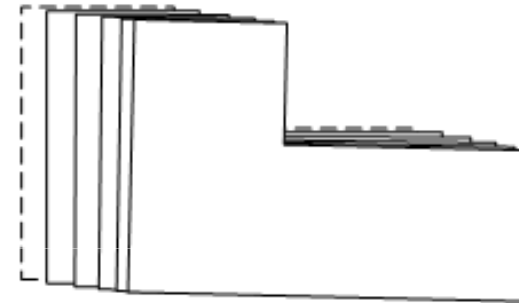
Modo 6

Deformate modali

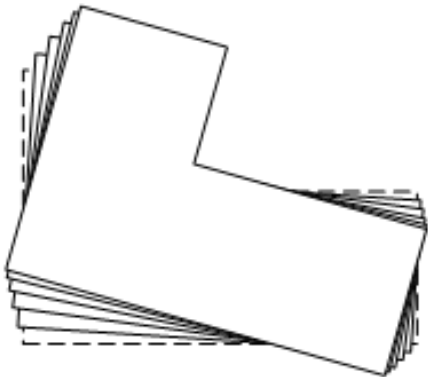
Modo 1 $T = 0.582 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.553 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.463 \text{ s}$

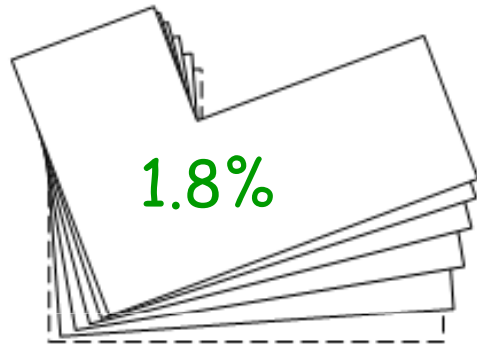


Il modo 2 è sostanzialmente di traslazione secondo x

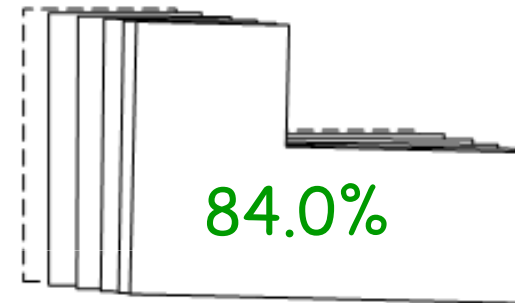
I modi 1 e 3 sono accoppiati (traslazione secondo y e rotazione)

Masse partecipanti, sisma x

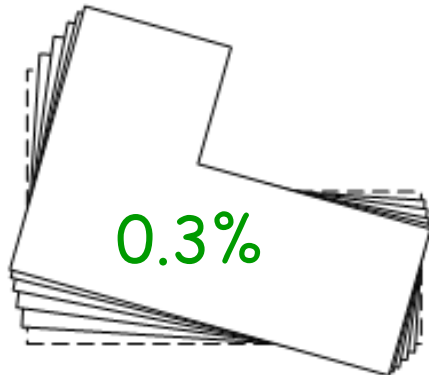
Modo 1 $T = 0.582 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.553 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.463 \text{ s}$

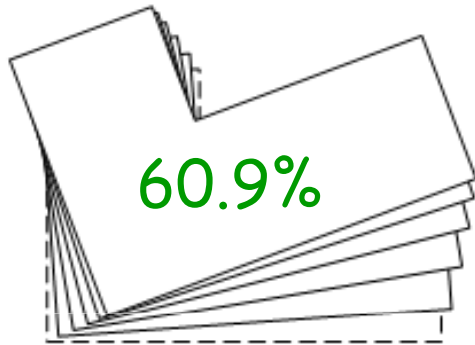


Il modo 2 dà il contributo massimo

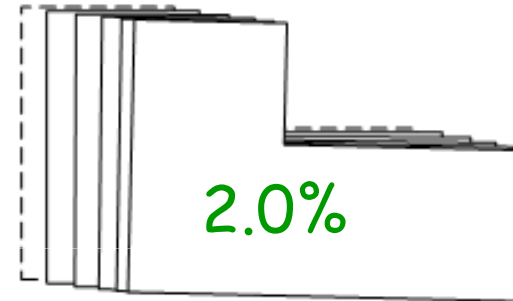
Il modo 5, di traslazione x con spostamenti nei due versi, dà un ulteriore contributo (8.9%)

Masse partecipanti, sisma y

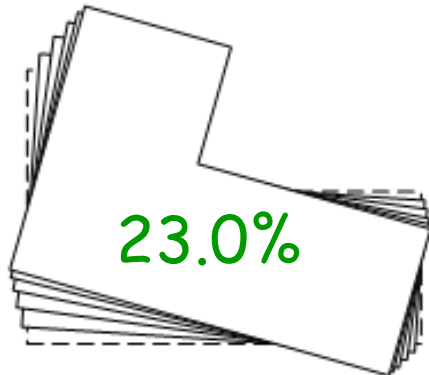
Modo 1 $T = 0.582 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.553 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.463 \text{ s}$



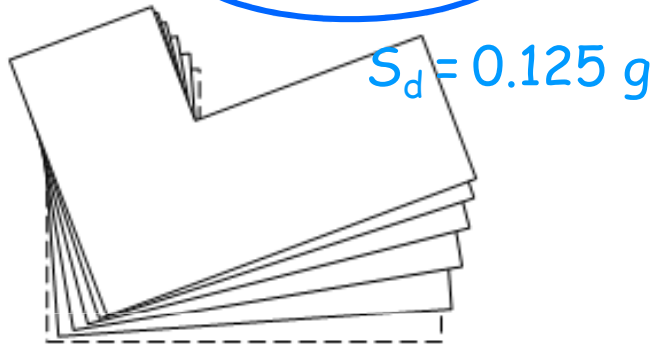
I modi 1 e 3 danno il contributo massimo

Il modo 4, di traslazione y e rotazione con spostamenti nei due versi, dà un ulteriore contributo (6.9%)

Periodi dei modi predominanti

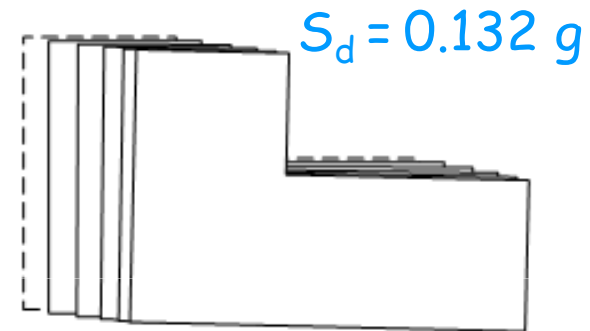
Modo 1

$$T = 0.582 \text{ s}$$



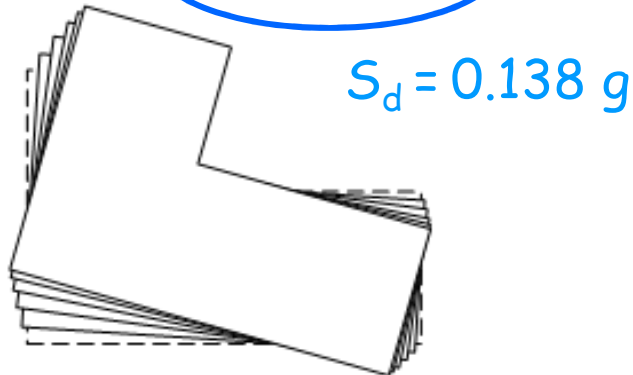
Modo 2

$$T = 0.553 \text{ s}$$



Modo 3

$$T = 0.463 \text{ s}$$



Periodi stimati: ~~0.611 s~~

$$T_x = 0.553 \text{ s} \quad S_d = 0.132 \text{ g}$$

$$T_y = 0.552 \text{ s} \quad S_d = 0.132 \text{ g}$$

I periodi sono analoghi

Le ordinate spettrali sono quindi analoghe

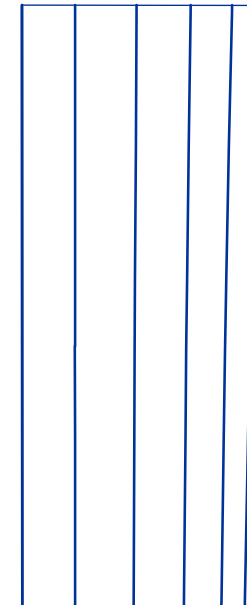
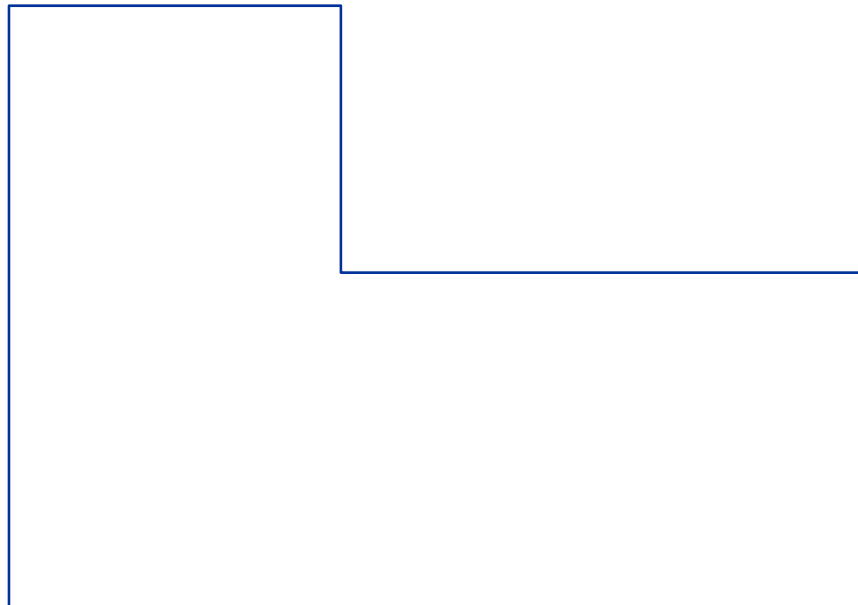
Inviluppo modale sistema x

1.71

4.10

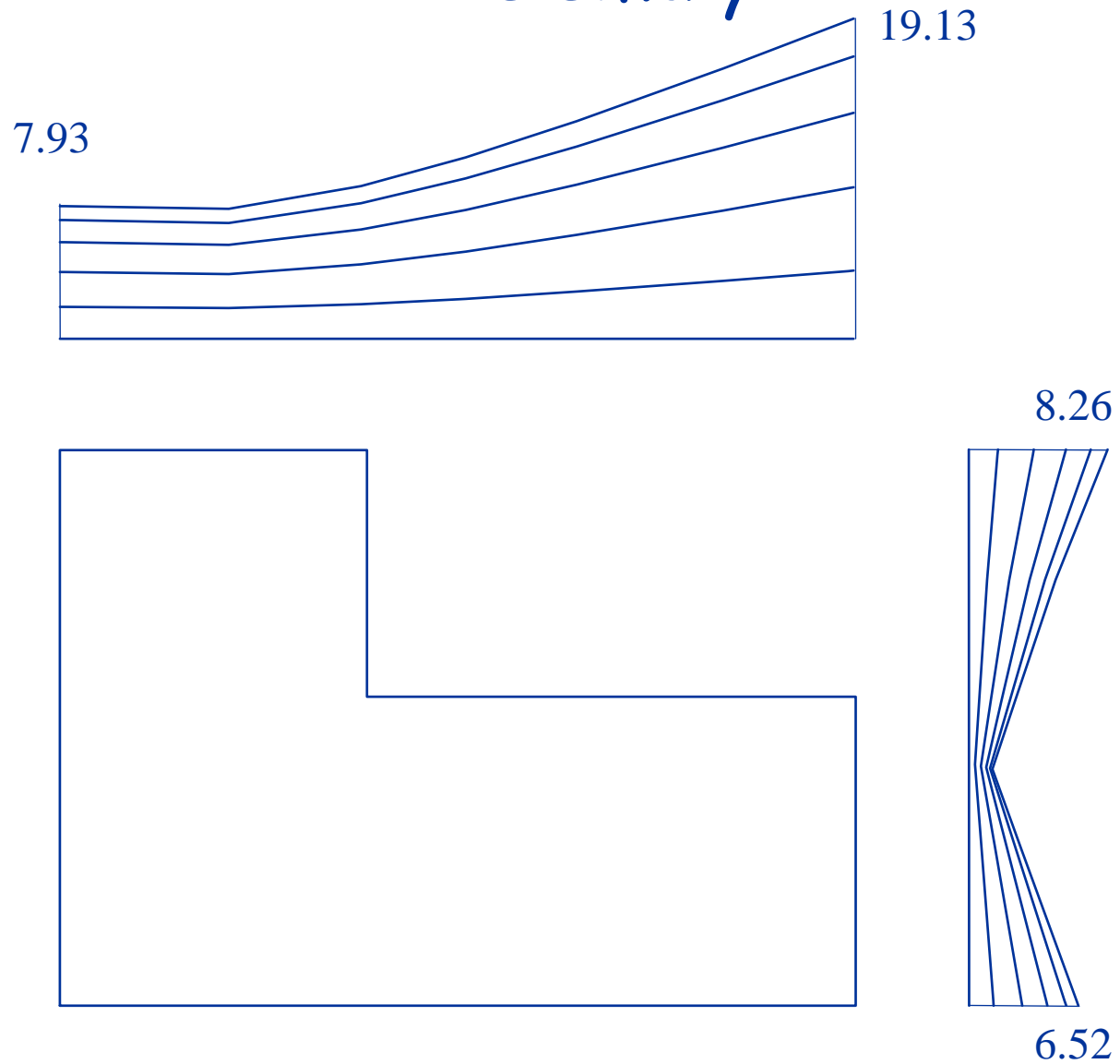


13.06

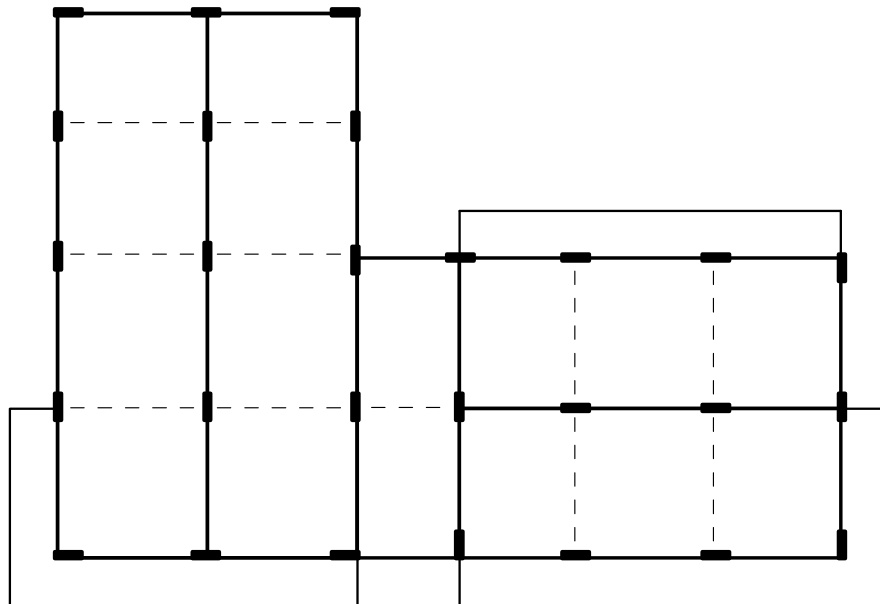


12.28

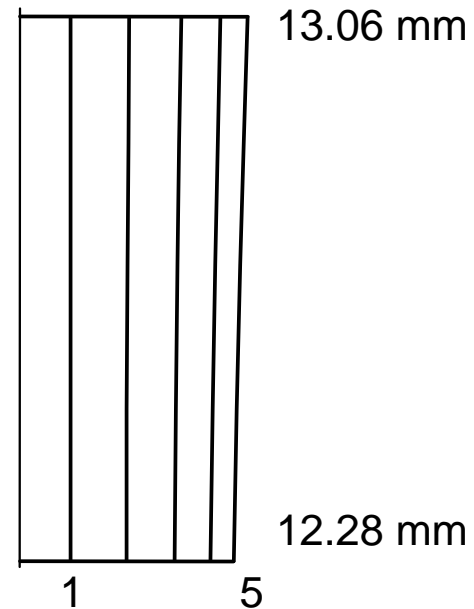
Inviluppo modale sisma y



Spostamenti, involuppo modale



Spostamenti per sisma x

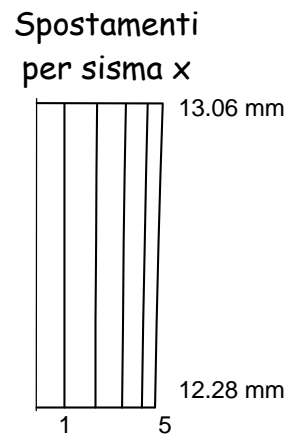
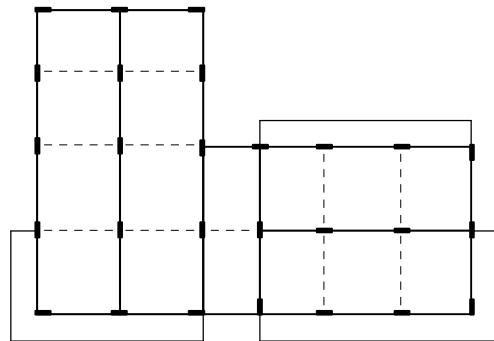
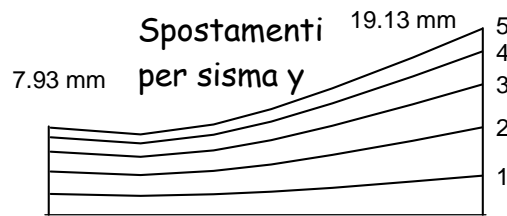


Spostamenti, inviluppo modale

Rotazione non trascurabile per sisma y (spostamenti dovuti ai modi 1 e 3)



La parte destra andrebbe irrigidita

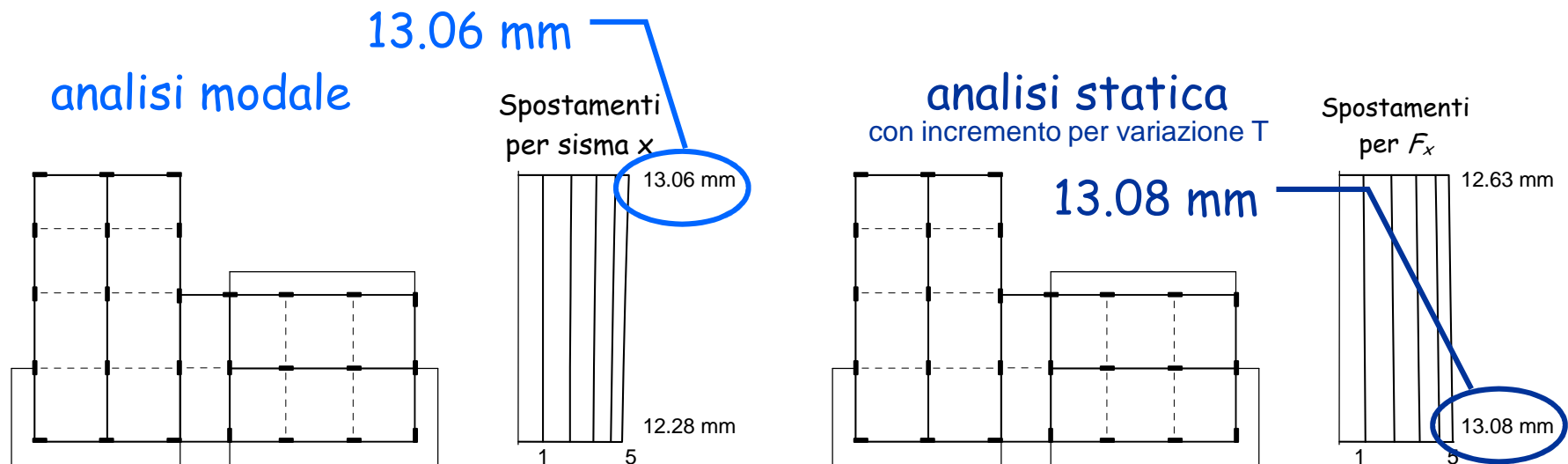


gli spostamenti massimi per sisma y sono maggiori di circa il 50% rispetto a quelli per sisma x

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

Spostamenti confronto tra analisi modale e statica

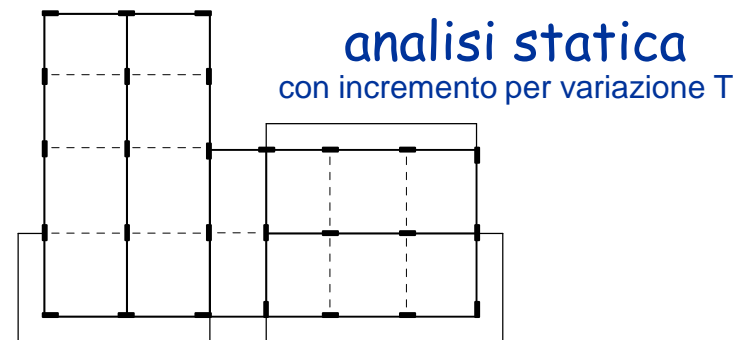
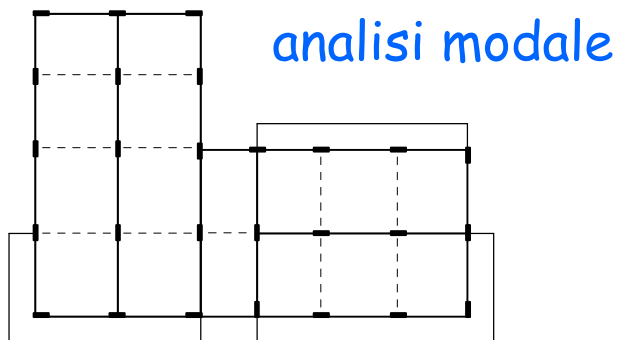
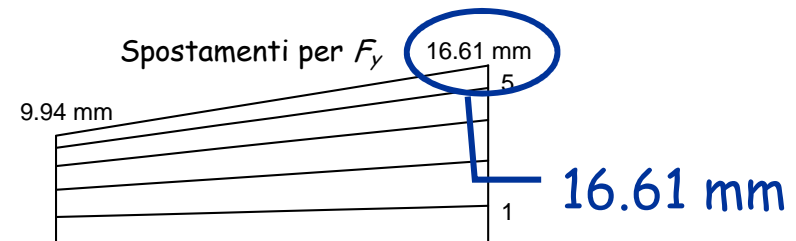
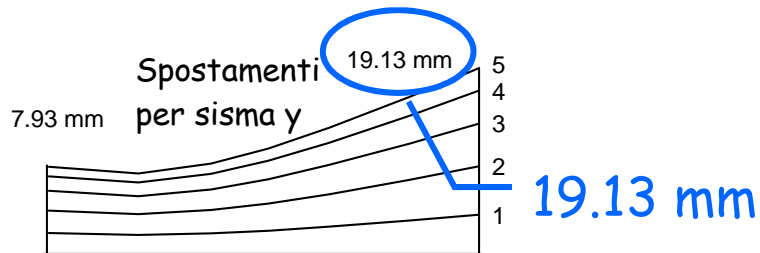
Sisma x: analisi modale - spostamenti uguali



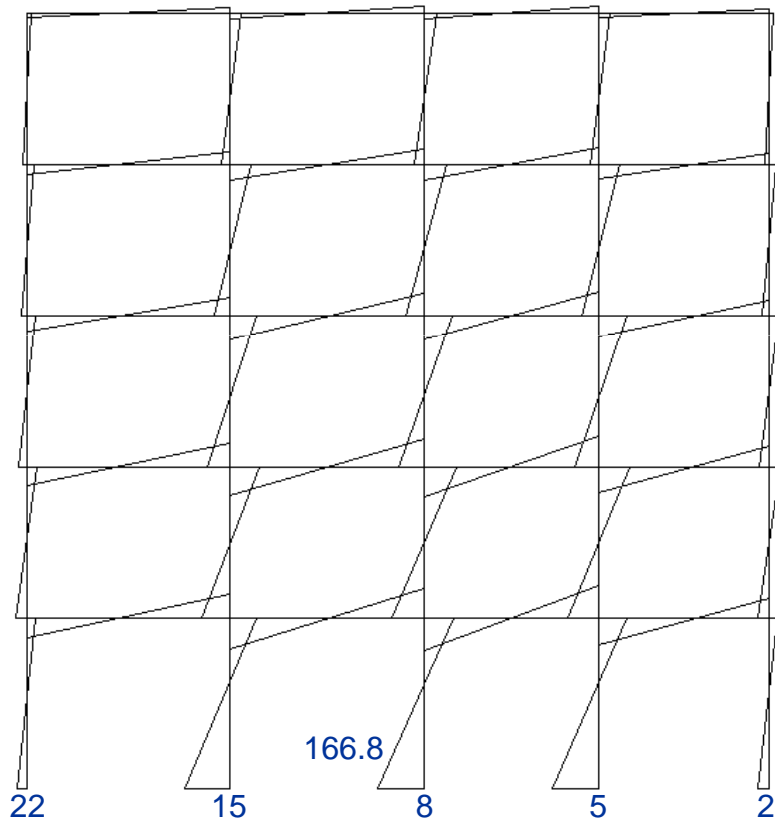
Spostamenti confronto tra analisi modale e statica

Sisma y: l'analisi modale accentua la rotazione

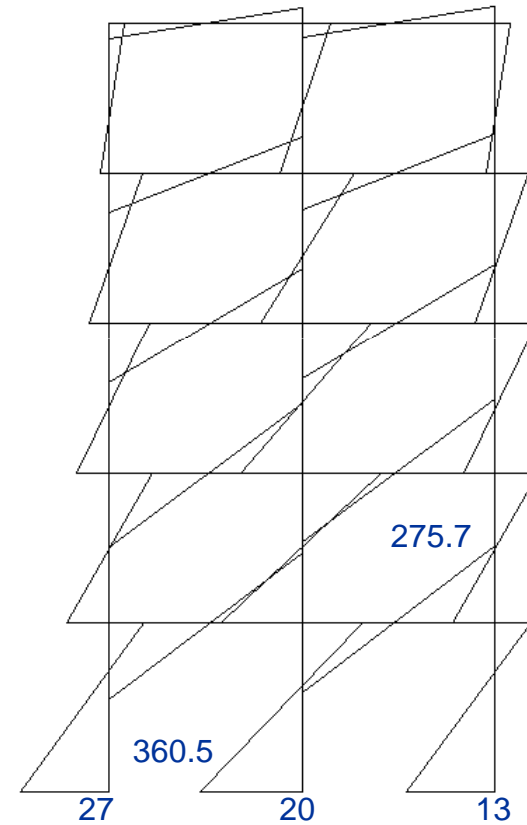
lato destro - spostamenti maggiori (25%)
lato sinistro - spostamenti minori



Sollecitazioni



Telaio 2y



Telaio 7y

Sollecitazioni per sisma in direzione x

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Taglio An. statica (kN)	Taglio An. modale (kN)
5	39.12	42.73
4	69.41	75.81
3	92.07	101.98
2	108.93	122.03
1	111.18	120.36

+11% per
diff. periodo

Il taglio massimo è
abbastanza uniforme

Come per l'analisi statica,
nei pilastri di estremità il taglio
è minore (circa il 50% ai piani
superiori, il 75% al piede del I
ordine)

Analisi statica e modale
forniscono valori
sostanzialmente uguali

Sollecitazioni per sisma in direzione x

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Momento An. statica (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	70.93	77.13
4	122.75	134.37
3	155.93	173.30
2	175.03	196.46
1 testa	153.45	167.40
piede	246.78	265.99

+11%

Il momento massimo è
abbastanza uniforme

Come per l'analisi statica,
nei pilastri di estremità il
momento è minore (circa il
50-60% ai piani superiori,
l'85% al piede del I ordine)

Analisi statica e modale
forniscono valori
sostanzialmente uguali

Sollecitazioni per sisma in direzione x

Travi emergenti dei telai in direzione x

Piano	Momento An. statica (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	37.57	40.76
4	90.00	97.71
3	133.66	146.61
2	166.76	186.77
1	174.68	203.18

+11%

Il momento massimo è
abbastanza uniforme,

sia come distribuzione in pianta
che in base alla posizione nel
telaio (incluse campate di
estremità)

Analisi statica e modale
forniscono valori
sostanzialmente uguali

Sollecitazioni per sisma in direzione y (max, des)

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Taglio An. statica (kN)	Taglio An. modale (kN)
5	44.93	57.03
4	82.85	105.51
3	112.27	145.08
2	135.83	177.19
1	122.95	159.98

+11%

Il taglio varia molto in base alla posizione in pianta, a causa della rotazione

I valori dell'analisi modale sono maggiori di quelli dell'analisi statica

(dal 10 al 15% a seconda dei piani)

Sollecitazioni per sisma in direzione y (max, des)

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Momento An. statica (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	82.29	103.88
4	147.14	187.92
3	190.12	246.55
2	220.89	287.58
1 testa	165.35	215.55
piede	277.27	360.46

+11%

Il momento varia in base
alla posizione in pianta a
causa della rotazione

I valori dell'analisi modale
sono maggiori di quelli
dell'analisi statica

(dal 10 al 15% a seconda dei piani)

Sollecitazioni per sisma in direzione y (max, des)

Travi emergenti dei telai in direzione y

Piano	Momento An. statica (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	44.37	56.03
4	111.80	141.06
3	166.11	212.26
2	205.49	265.79
1	212.06	275.67

+11%

Il momento varia in base alla posizione in pianta a causa della rotazione

I valori dell'analisi modale sono maggiori di quelli dell'analisi statica

(dal 10 al 15% a seconda dei piani)

Sollecitazioni per sisma in direzione y (min, sin)

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Taglio An. statica (kN)	Taglio An. modale (kN)
5	27.31	24.81
4	50.93	45.19
3	68.24	61.30
2	80.52	73.31
1	89.89	79.02

+11%

Il taglio varia molto in base alla posizione in pianta, a causa della rotazione

I valori dell'analisi modale sono minori di quelli dell'analisi statica (circa il 15%)

Sollecitazioni per sisma in direzione y (min, sin)

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Momento An. statica (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	50.26	45.08
4	90.90	80.71
3	116.18	104.66
2	131.15	119.18
1 testa	125.69	110.19
piede	197.91	174.34

+11%

Il momento varia in base
alla posizione in pianta a
causa della rotazione

I valori dell'analisi modale
sono minori di quelli
dell'analisi statica
(circa il 15%)

Sollecitazioni per sisma in direzione y (min, sin)

Travi emergenti dei telai in direzione y

Piano	Momento An. statica (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	26.45	23.66
4	65.80	58.18
3	95.71	85.03
2	119.36	107.23
1	130.89	116.65

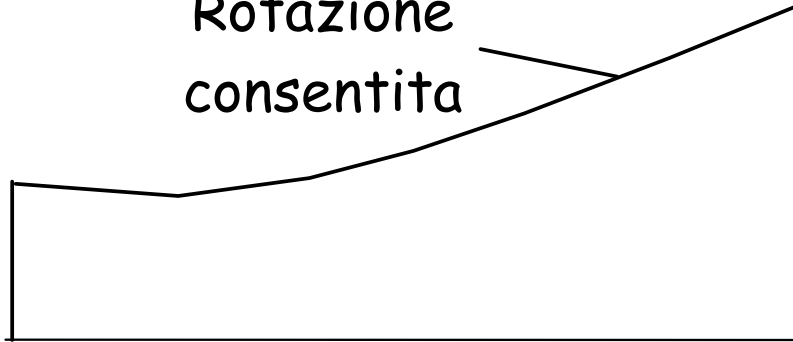
+11%

Il momento varia in base alla posizione in pianta a causa della rotazione

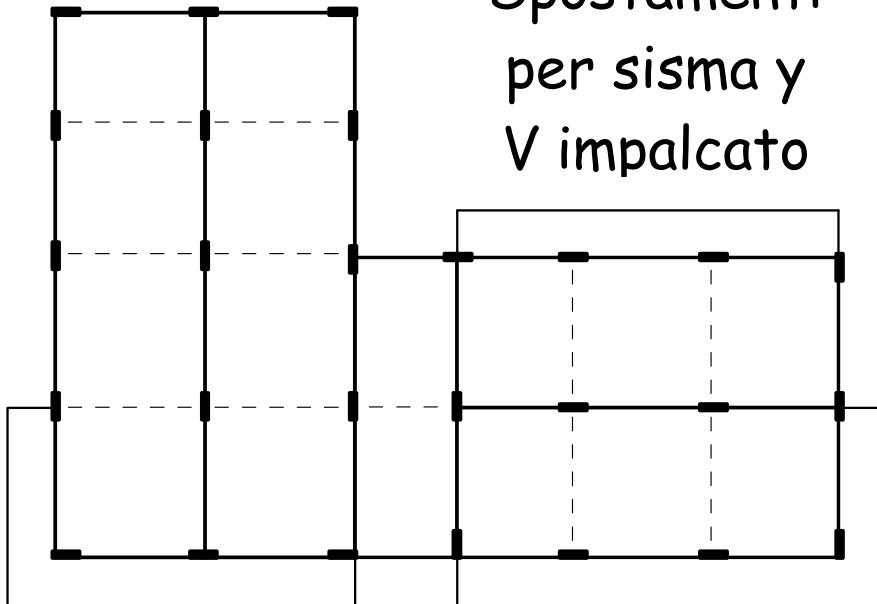
I valori dell'analisi modale sono minori di quelli dell'analisi statica (circa il 15%)

Suggerimento

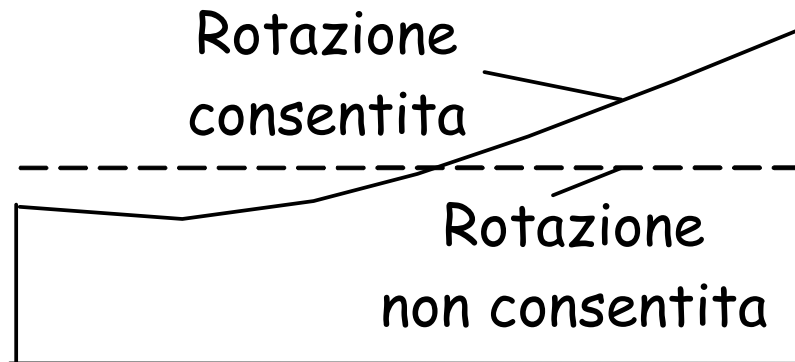
Rotazione
consentita



Spostamenti
per sisma y
V impalcato



Suggerimento

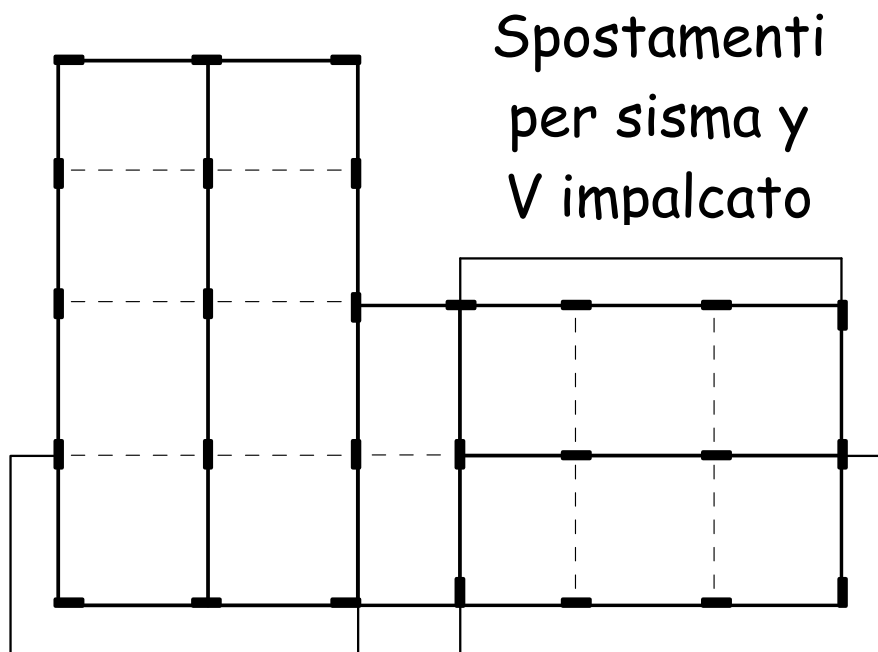


La rotazione riduce gli spostamenti del lato rigido (e quindi le sollecitazioni)

Meglio non ridurre le sollecitazioni di progetto rispetto al caso di traslazione pura

Secondo:

- Comunità scientifica internazionale
- Normativa americana



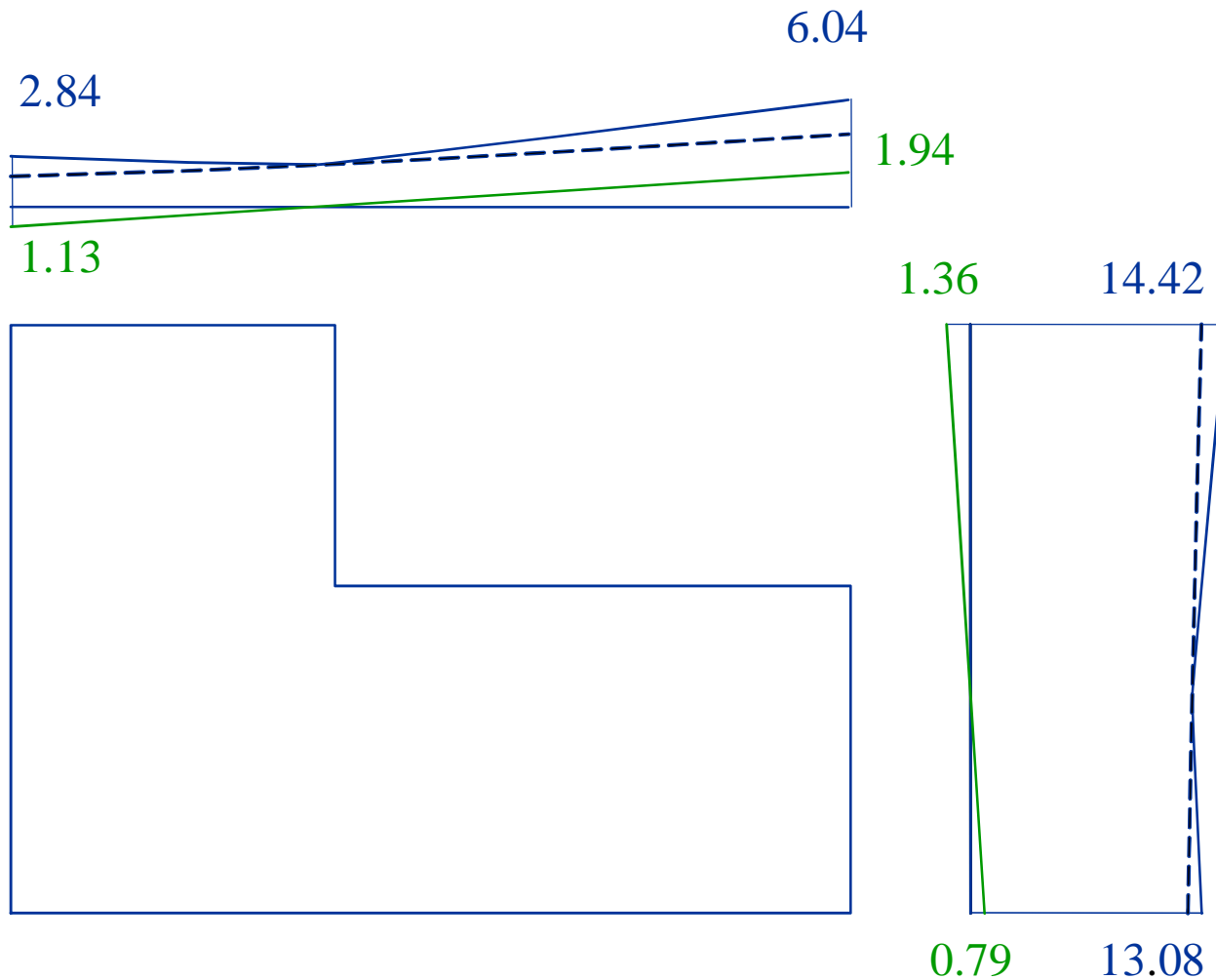
Eccentricità accidentale

Eccentricità accidentale

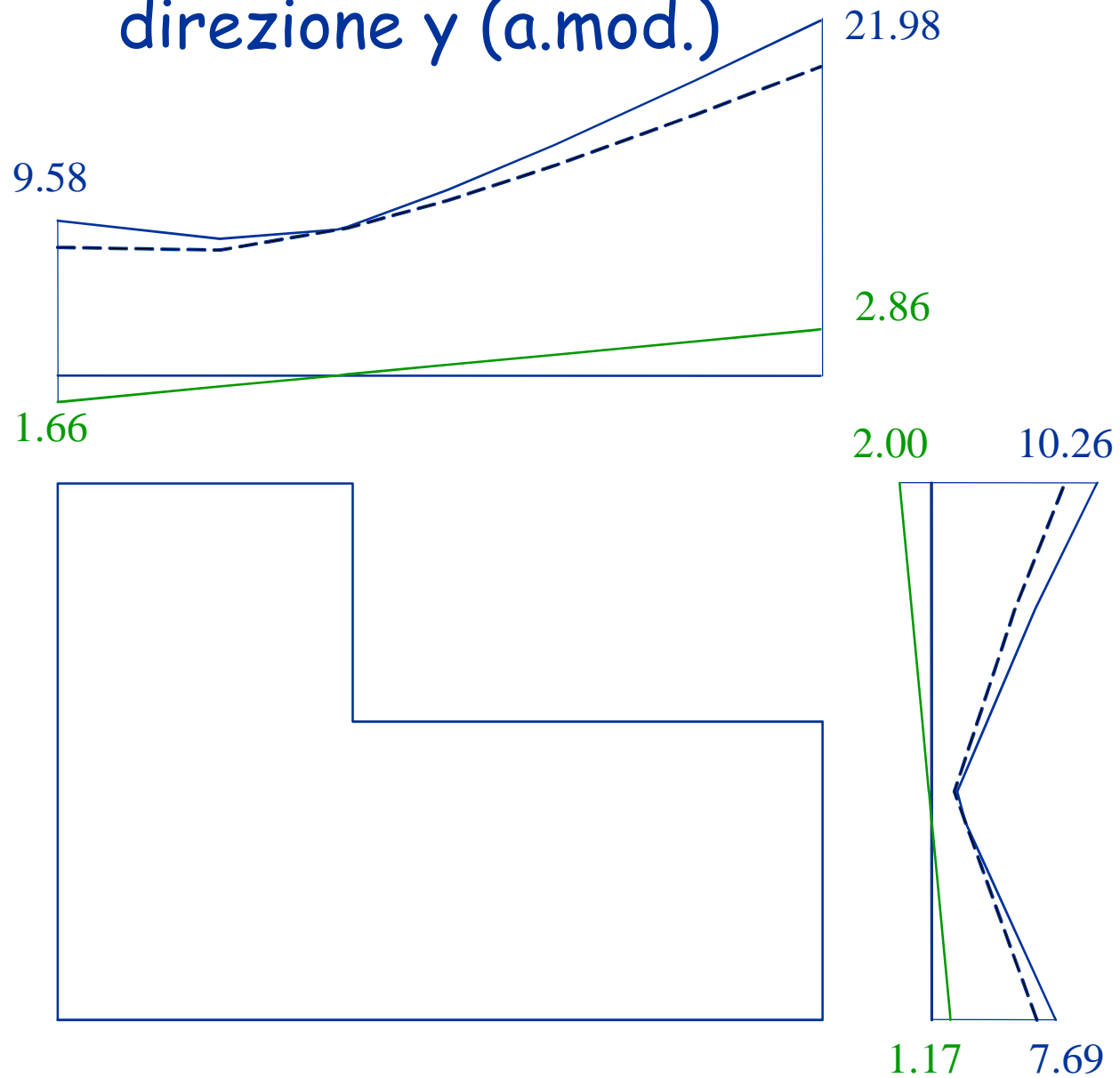
Esame dei risultati

- 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 (a.mod.)



Spostamenti per forze e coppie considerazioni

- Le coppie provocano un incremento di spostamento percentualmente analogo a tutti i piani
- L'incremento va dal 6% (inf) al 10% (sup) nel caso di azioni in direzione x
- L'incremento va dal 16% (sin) al 17% (des) nel caso di azioni in direzione y
- Gli incrementi percentuali δ possono essere stimati con l'espressione semplificata con opportuni valori di k
- Nel caso in esame: $k=0.16$ per dir.x, $k=0.33$ per dir.y
- La formula è suggerita anche dall'OPCM 3431, ma con $k=0.6$

$$\delta = k \frac{x}{L_e}$$

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 6% (inf) al 10% (sup) nel caso di azioni in direzione x
 - dal 16% (sin) al 17% (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

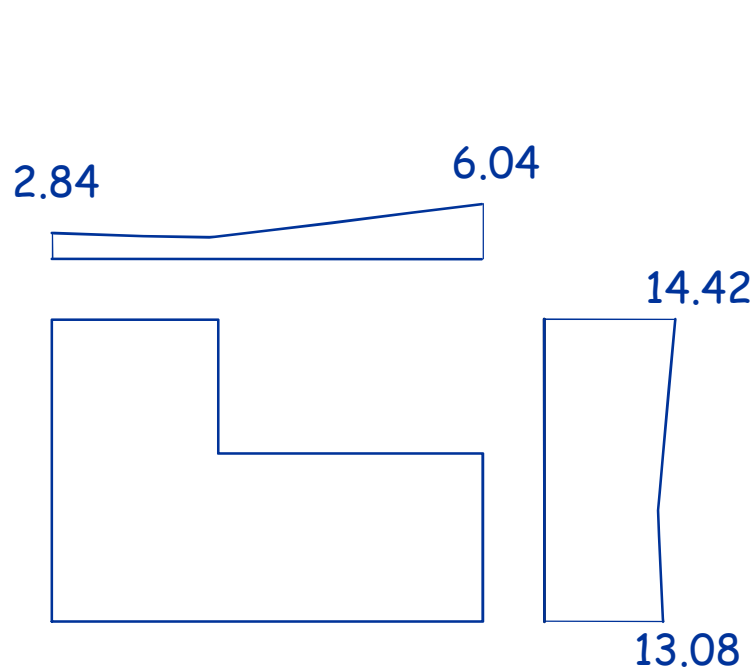
Le componenti orizzontali

“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”

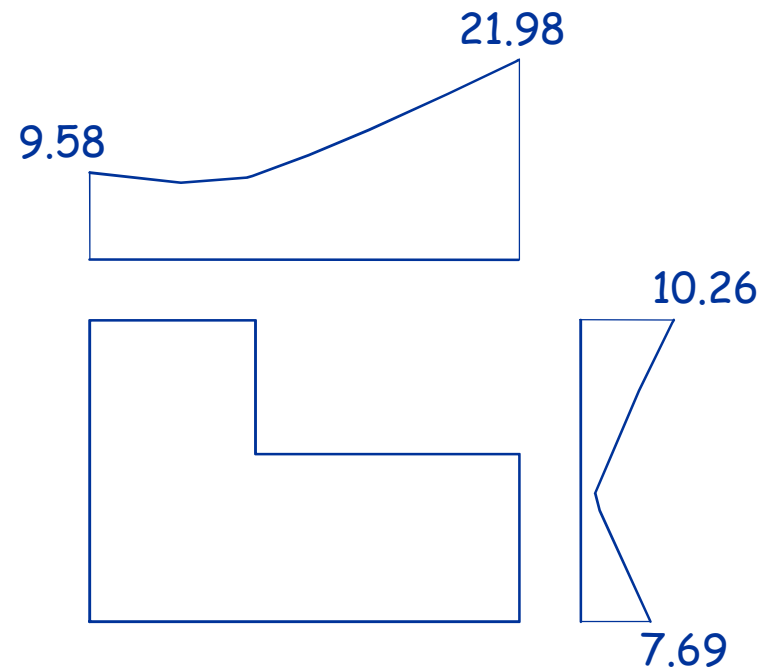
In che modo capire quanta importanza ha questa combinazione?

Ragioniamo ancora esaminando gli spostamenti

Effetto complessivo del sisma separatamente nelle due direzioni

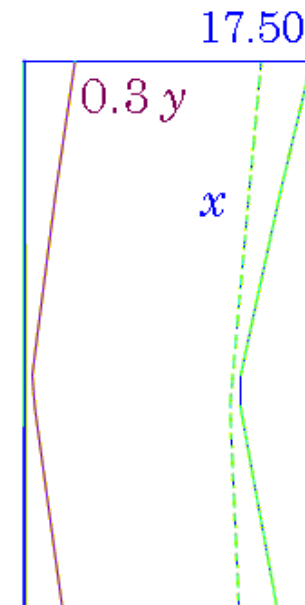
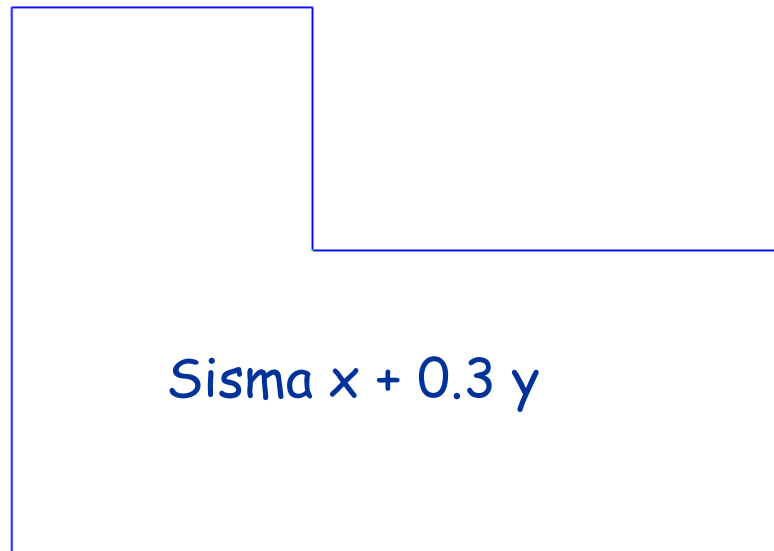
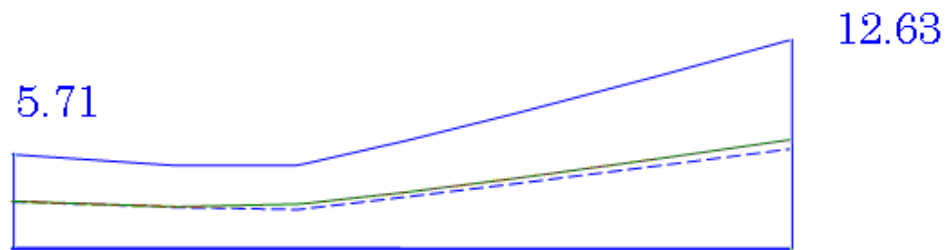
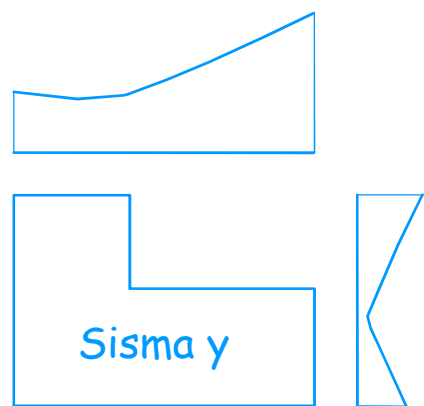
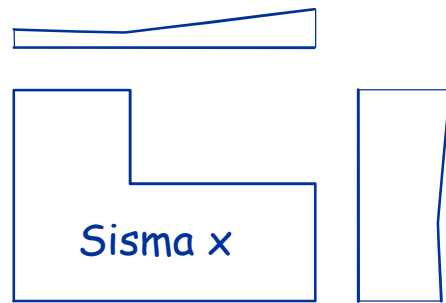


Sisma in
direzione x

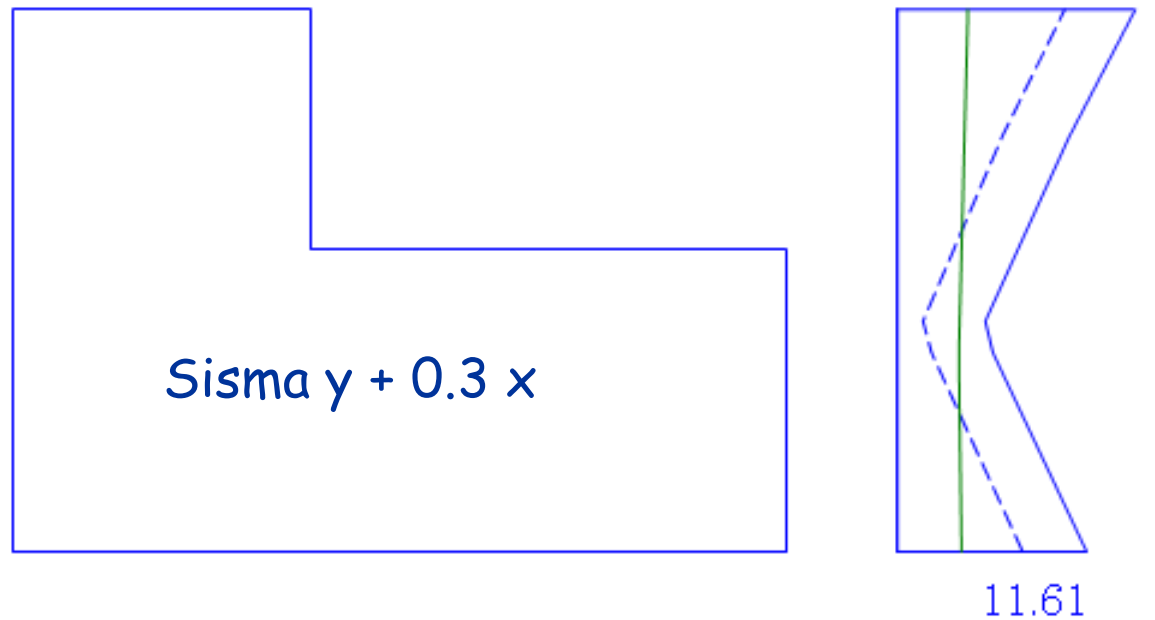
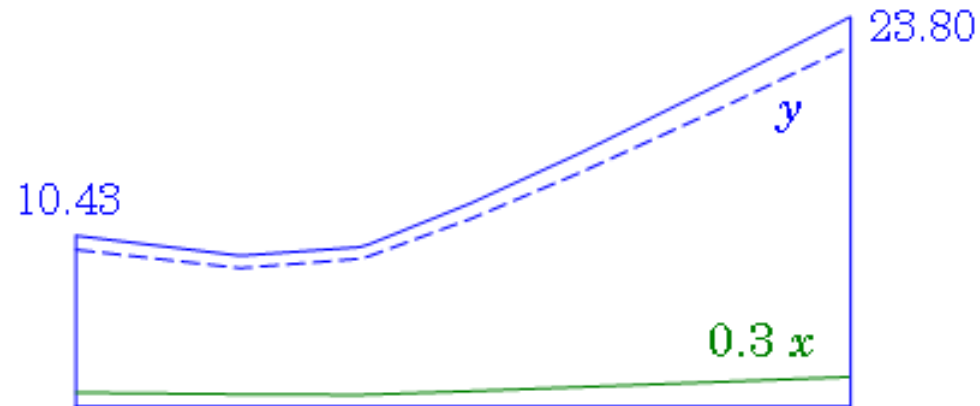
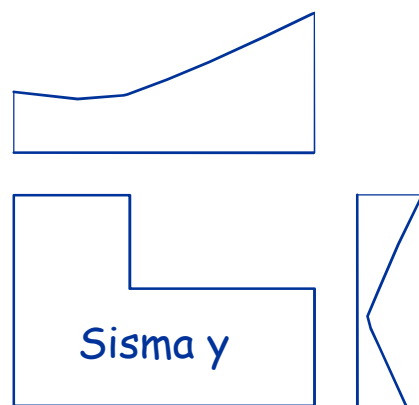
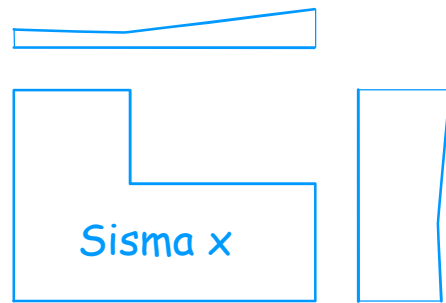


Sisma in
direzione y

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



Inviluppo: sisma y + 0.3 sisma x analisi modale



Commenti

Effetto complessivo

di eccentricità accidentale e combinazione x y

Travi:

- le travi dei telai centrali ne risentono in misura minima
- le travi dei telai di estremità hanno, rispetto allo schema con sole forze, un incremento di caratteristiche di sollecitazione fino a circa il 20%

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 20%, ed inoltre devono essere verificati a pressoflessione deviata con momenti trasversali pari a circa il 40%-60% del massimo

Giudizio complessivo

prima di passare ad una verifica dettagliata

Rispetto alla stima iniziale, fatta in fase di dimensionamento:

- la previsione iniziale del periodo ha sottostimato l'azione sismica di circa un 10%
- la previsione dell'effetto di forze statiche era corretta, ma con leggera sottostima delle sollecitazioni nella parte destra (dovuta alla eccessiva eccentricità masse-rigidezze)
- l'effetto dell'eccentricità accidentale è stato ben stimato
- la contemporanea presenza delle due componenti del sisma è in alcuni casi più gravosa del previsto

Il dimensionamento iniziale è accettabile?

Probabilmente sì,
anche se in alcuni elementi le sollecitazioni sono un po' più grandi del previsto

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

In particolare, sarebbe opportuno irrigidire la parte destra dell'edificio, aumentando le dimensioni di alcuni elementi o girando alcuni pilastri

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

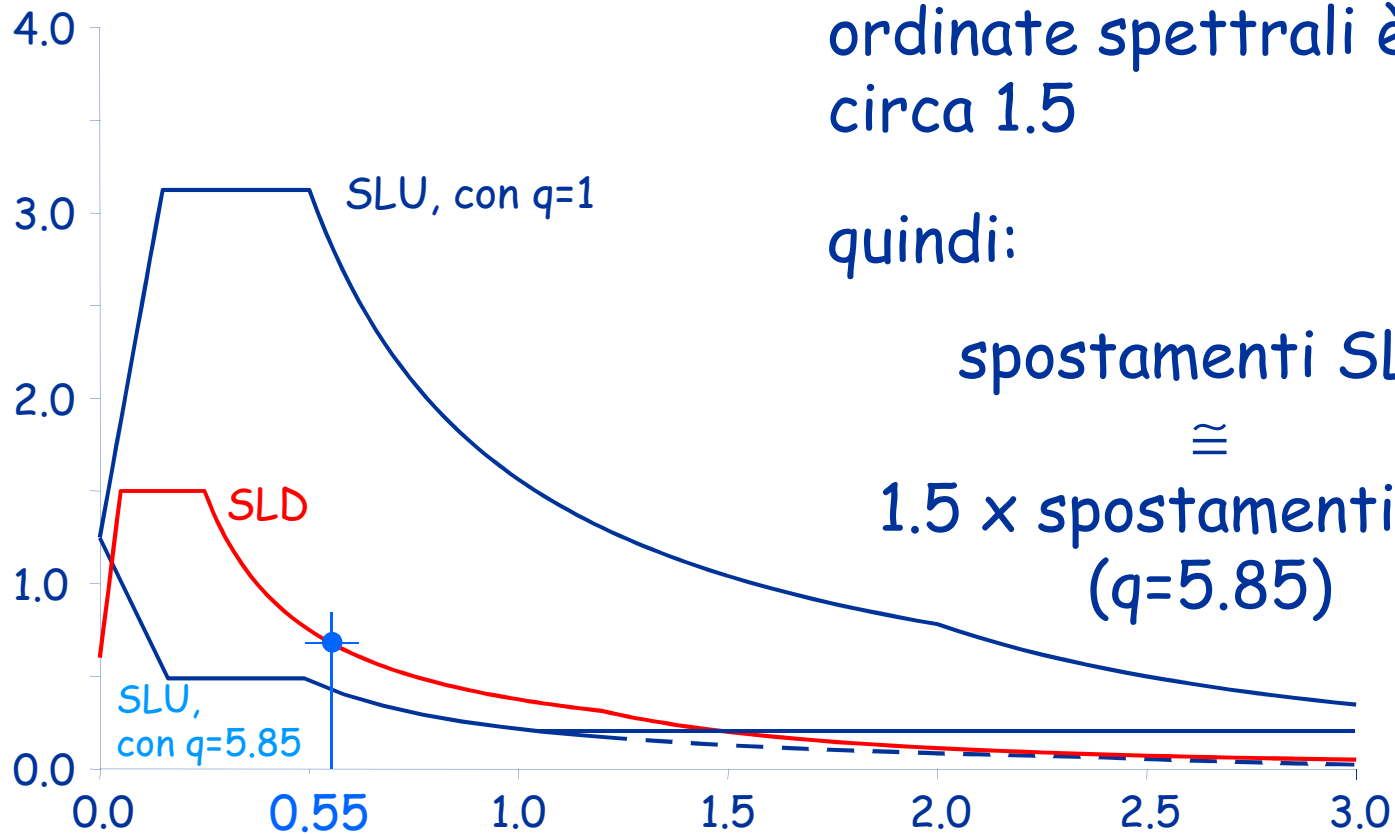
Occorrerebbe ripetere tutto il calcolo, usando gli spettri relativi allo SLD, ma può essere più semplice valutare gli spostamenti a partire da quelli per lo SLU, tenendo conto della differenza di ordinata dei relativi spettri

Spettri per SLU e SLD

nel caso in esame, per un periodo pari a circa 0.55 s il rapporto tra le ordinate spettrali è circa 1.5

quindi:

spostamenti SLD
 \cong
1.5 x spostamenti SLU
($q=5.85$)



Verifica spostamenti per SLD

Spostamento relativo accettabile: $0.005 h$

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

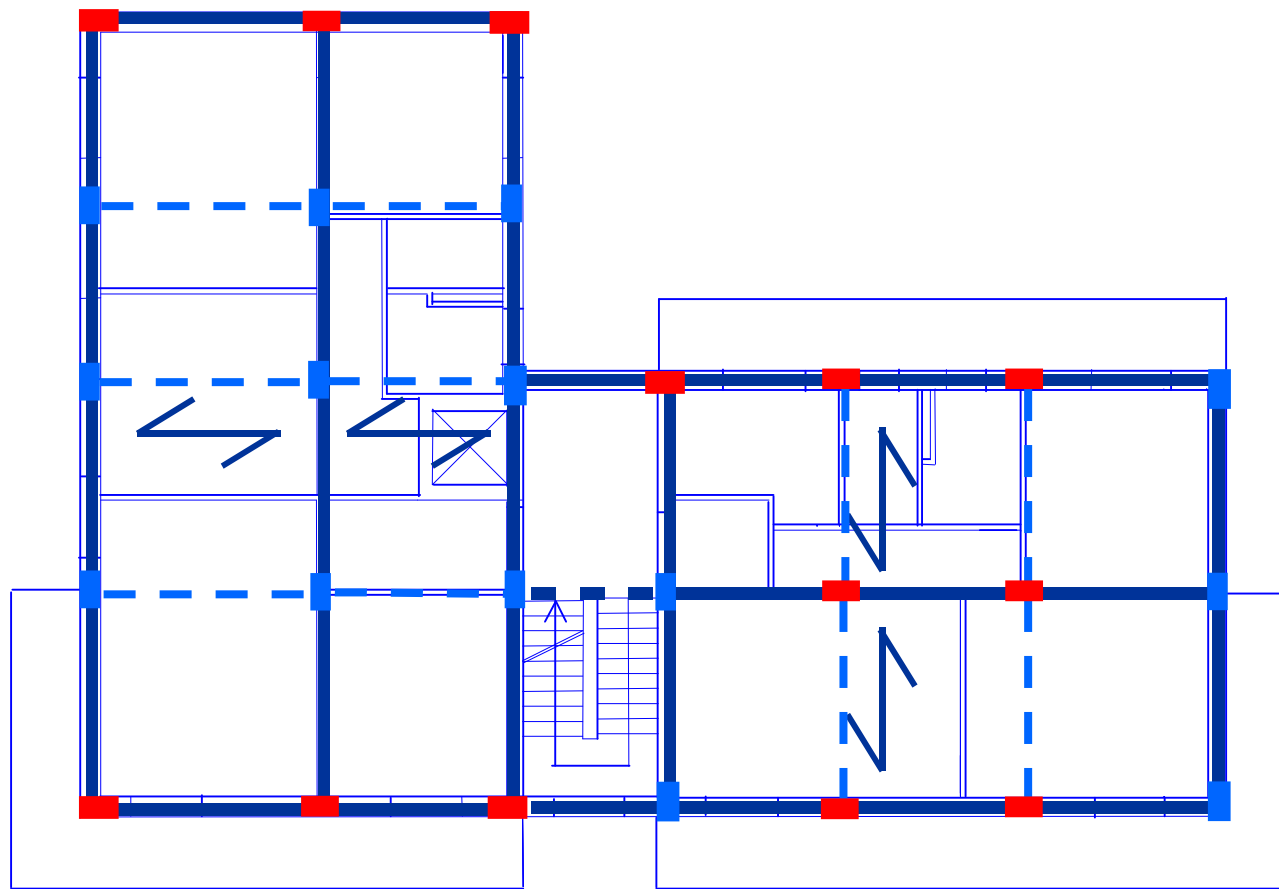
Spostamento relativo massimo,
fornito dall'analisi:

$1.5 \times 6.4 = 9.6 \text{ mm}$
(tra II e I impalcato)

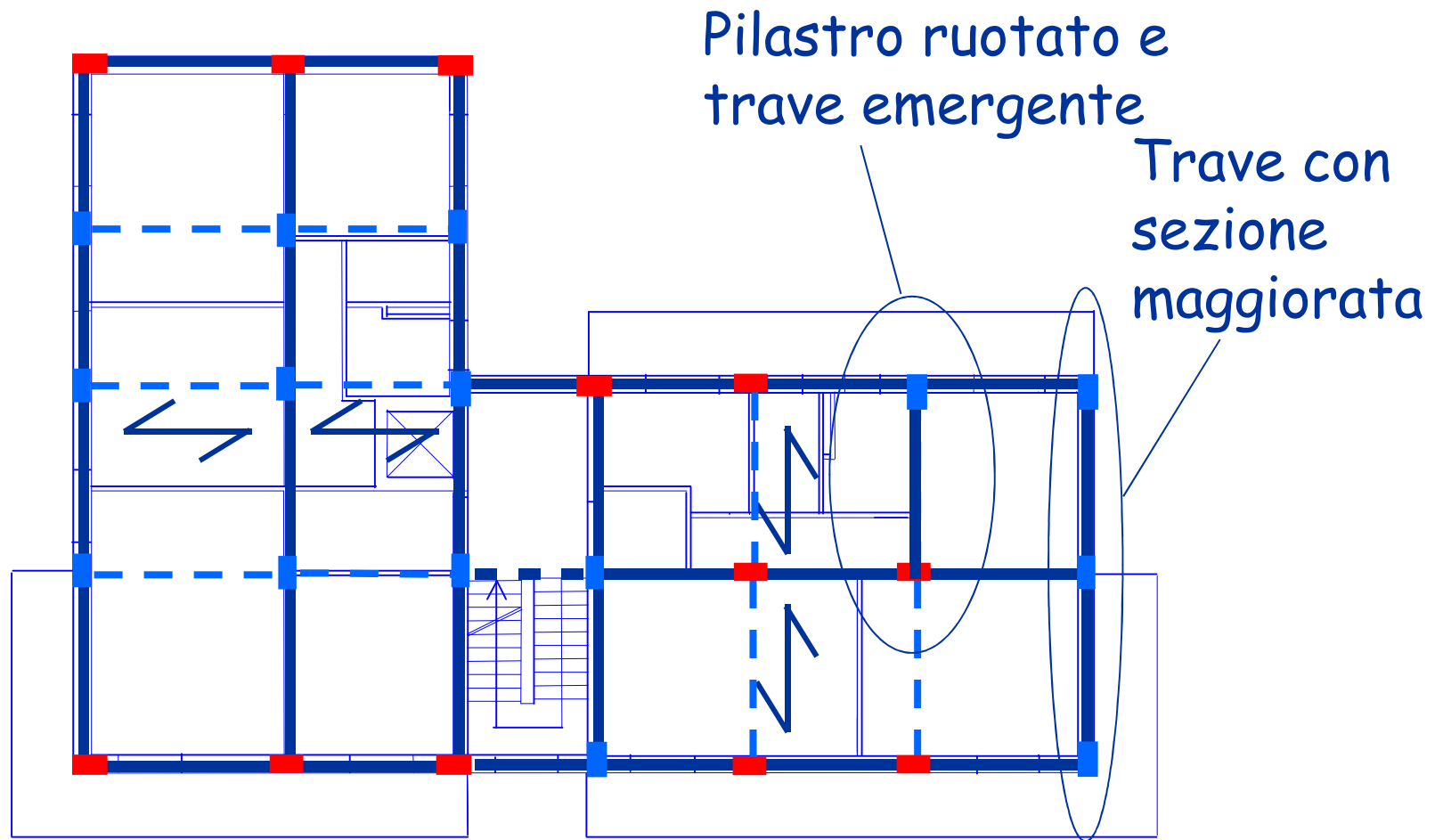
La verifica è soddisfatta

Possibile ridimensionamento

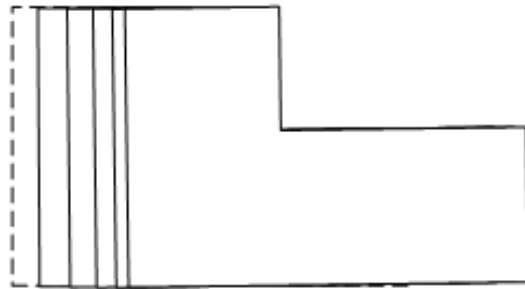
Impostazione della carpenteria



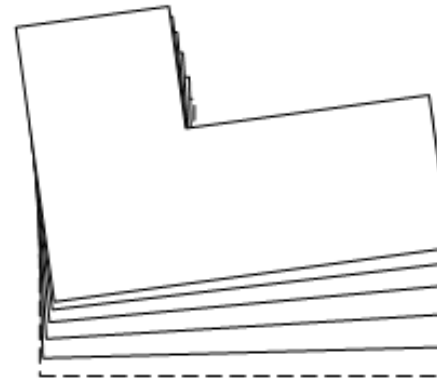
Impostazione della carpenteria con modifiche



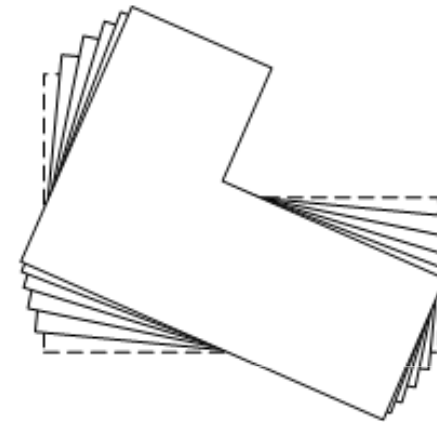
Modi di oscillazione libera



Modo 1



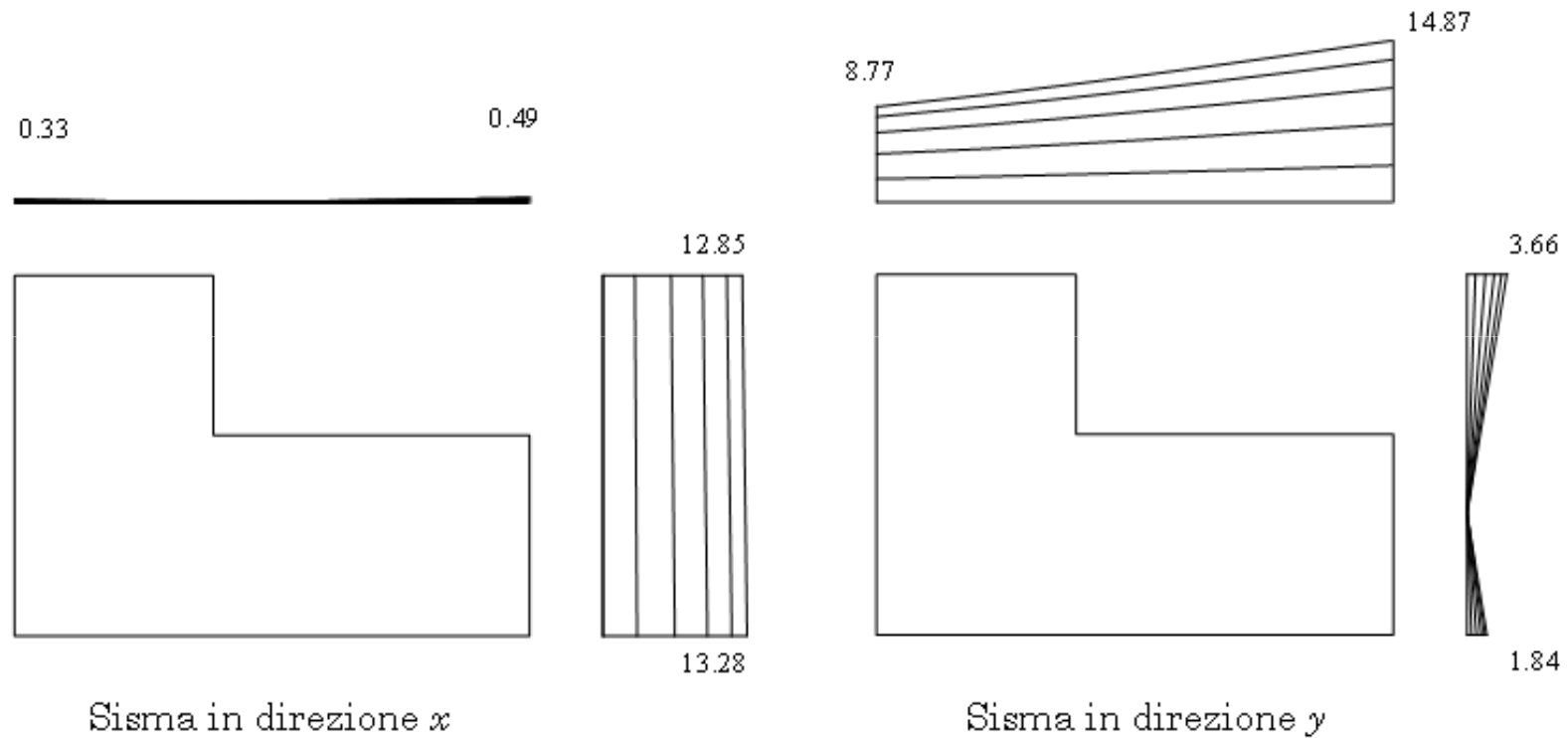
Modo 2



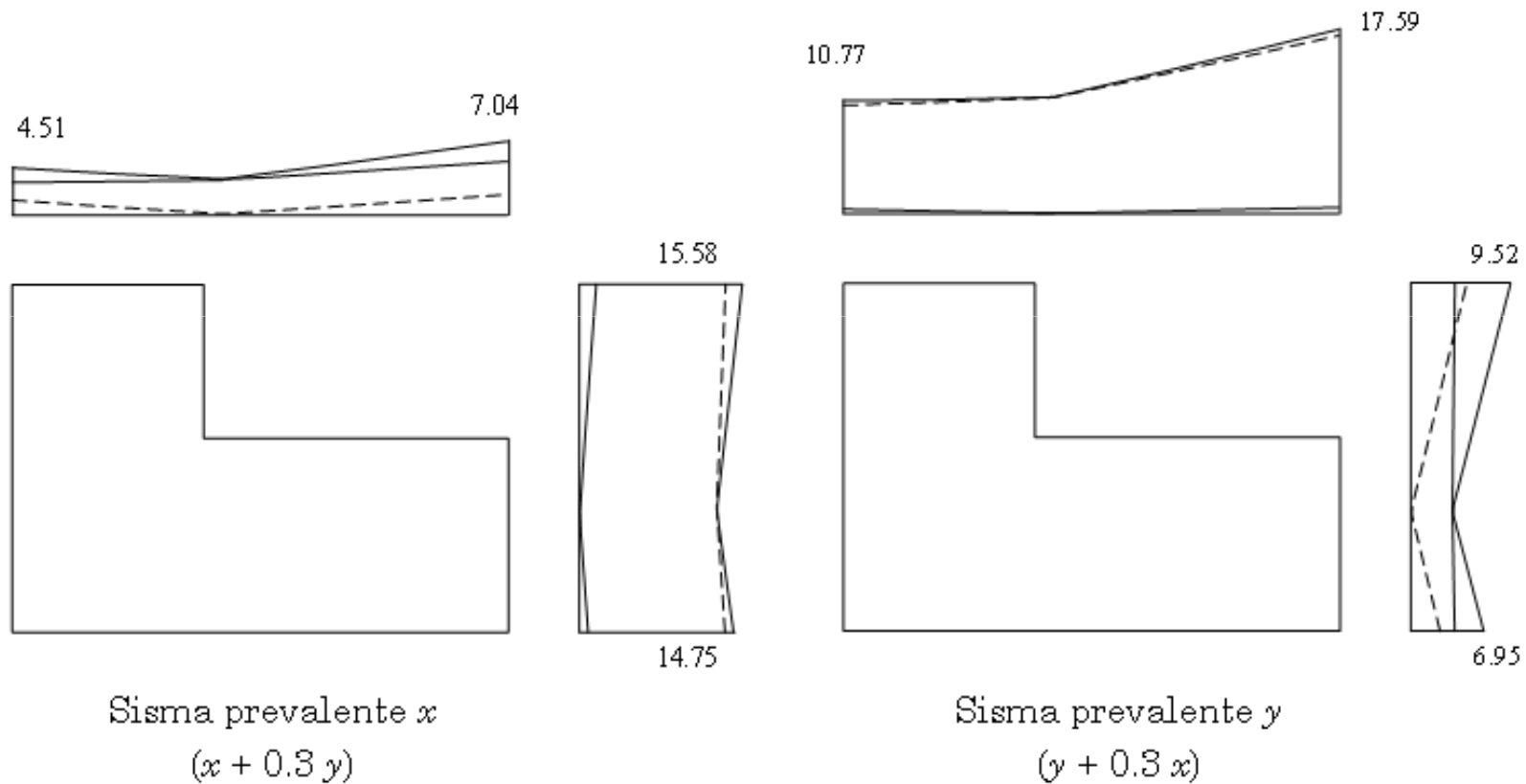
Modo 3

Modo	Periodo T [s]	Massa partecipante x [%]	Massa partecipante y [%]
1	0.567	86.02	0.00
2	0.516	0.01	82.81
3	0.449	0.03	3.29

Inviluppo spostamenti modali

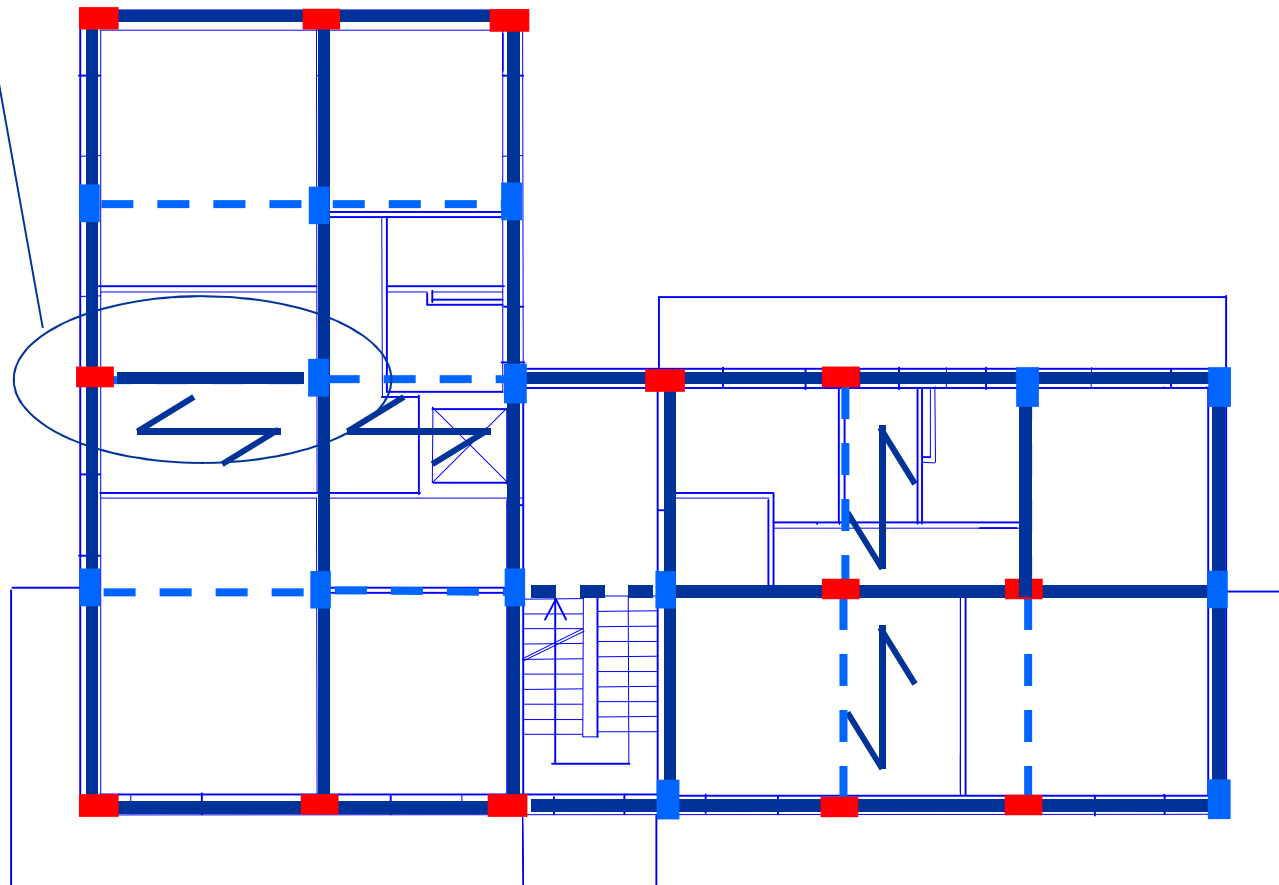


Effetto compressivo



Impostazione della carpenteria

Pilastro ruotato e
trave emergente



Effetto compressivo

