

Università di Catania
Corso di laurea in ingegneria civile strutturale e geotecnica

Costruzioni in zona sismica

Discussione dei risultati - analisi modale, eccentricità
accidentale, combinazione componenti, ridimensionamento

6 dicembre 2012

Aurelio Gheresi

Discussione dei risultati: analisi modale

Un mare di numeri. Come non perdersi?

Analisi modale

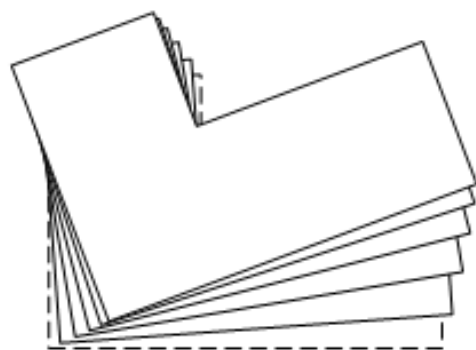
- Esaminare le deformate modali (indipendentemente dalla direzione del sisma)
 - sono disaccoppiate oppure accoppiate?
- Esaminare i periodi dei modi predominanti
 - corrispondono alle previsioni o no?
- Esaminare le masse partecipanti (per ciascuna direzione del sisma) per vedere quali modi danno maggior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

Un mare di numeri. Come non perdersi?

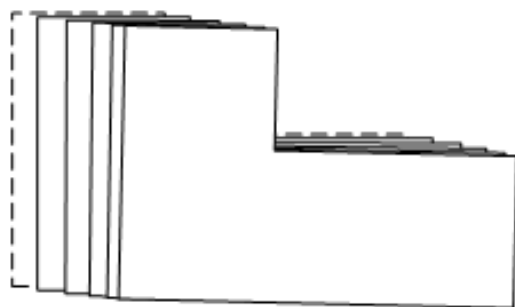
Analisi modale

- 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?

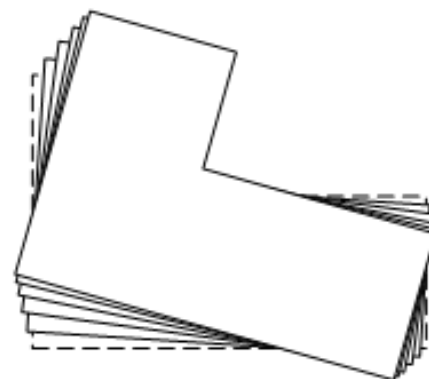
Deformate modali



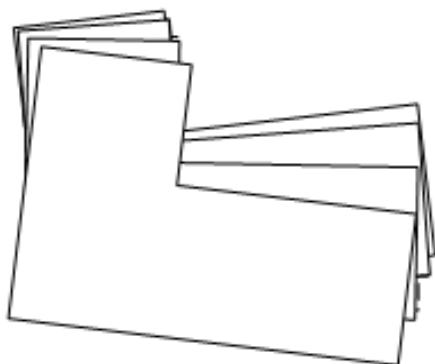
Modo 1



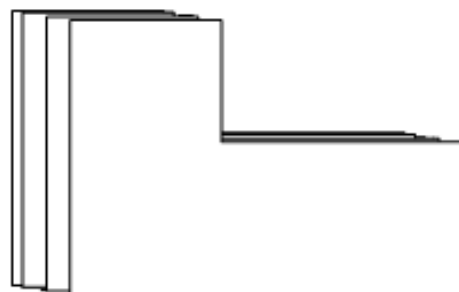
Modo 2



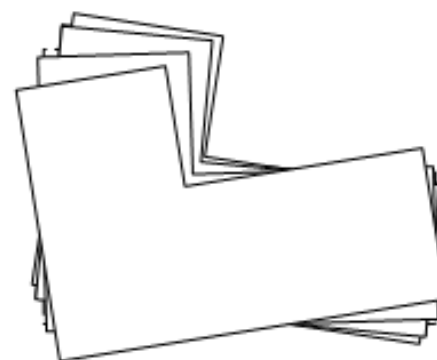
Modo 3



Modo 4



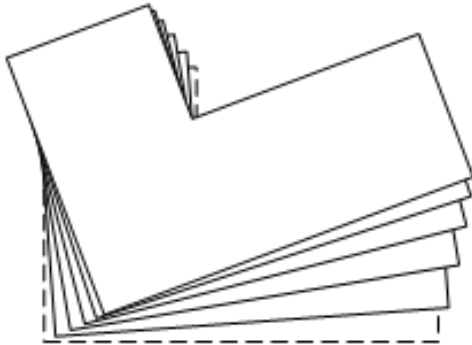
Modo 5



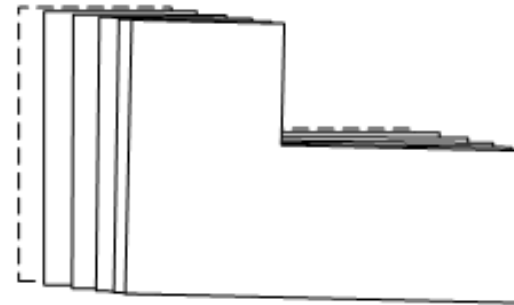
Modo 6

Deformate modali

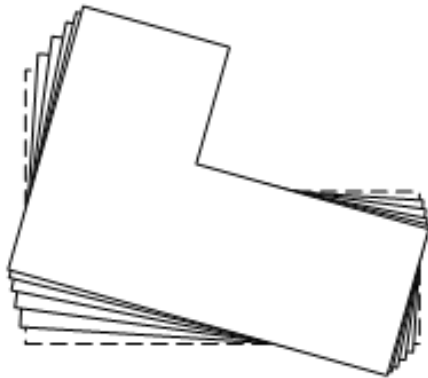
Modo 1 $T = 0.582 \text{ s}$



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



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

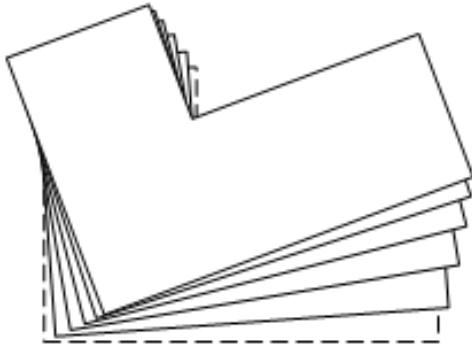


Il modo 2 è sostanzialmente di traslazione secondo x

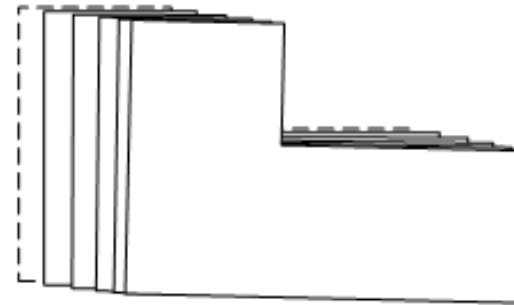
I modi 1 e 3 sono accoppiati (traslazione secondo y e rotazione)

Deformate modali

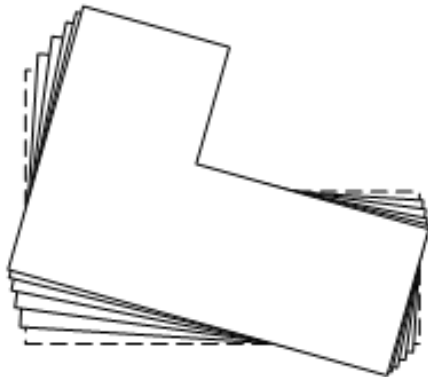
Modo 1 $T = 0.582 \text{ s}$



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



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

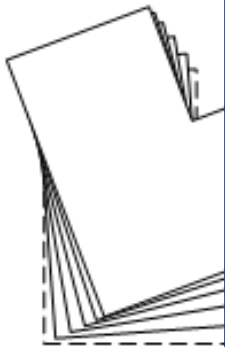


La struttura è torsionalmente rigida perché il rapporto tra periodo traslazionale e rotazionale è maggiore di 1

Sarebbe fortemente deformabile torsionalmente se il rapporto fosse ≤ 0.8

Deformate modali

Modo 1



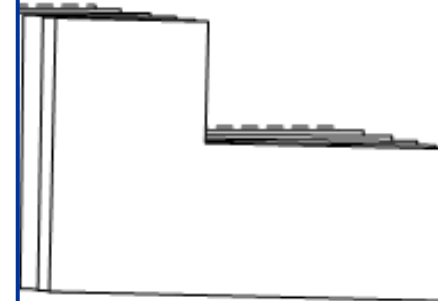
Modo 3



Nota: il confronto dovrebbe essere fatto con riferimento ai modi disaccoppiati (ovvero quelli che si ottengono quando $C_M = C_R$)

In questo caso i due modi x e y avrebbero periodo di 0.55 s, quello rotazionale di 0.495 s circa ed il rapporto sarebbe 1.11

$T = 0.553 \text{ s}$

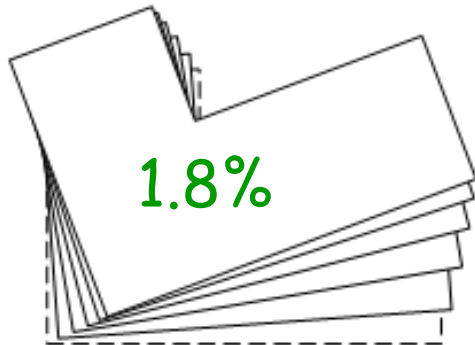


è torsionalmente
il rapporto tra
azionale e
maggiore di 1

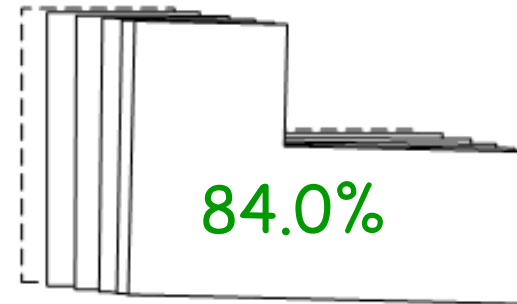
Sarebbe fortemente
deformabile torsionalmente se il
rapporto fosse ≤ 0.8

Masse partecipanti, sisma x

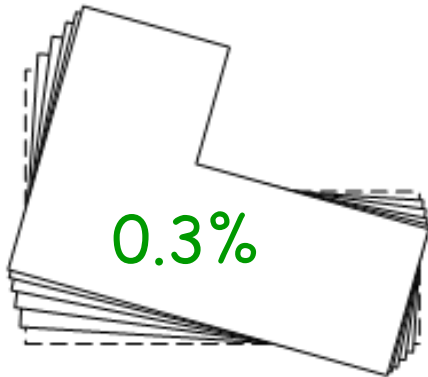
Modo 1 $T = 0.582 \text{ s}$



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



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

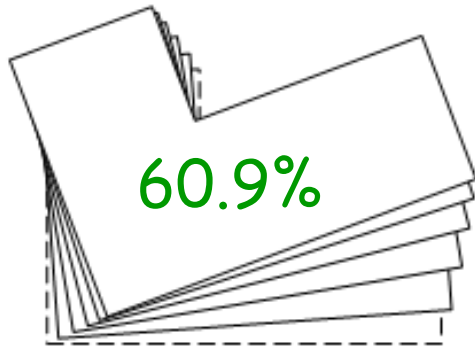


Il modo 2 dà il contributo massimo

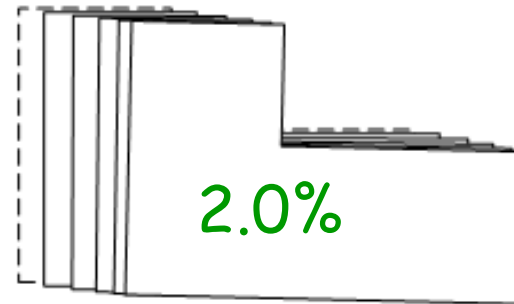
Il modo 5, di traslazione x con spostamenti nei due versi, dà un ulteriore contributo (8.9%)

Masse partecipanti, sisma y

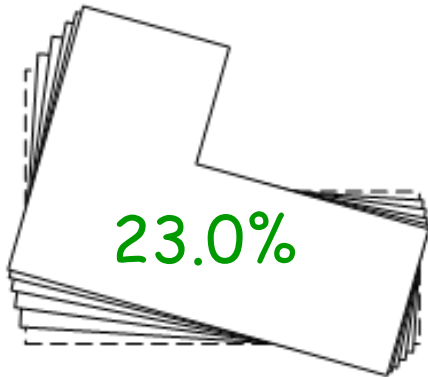
Modo 1 $T = 0.582 \text{ s}$



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



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



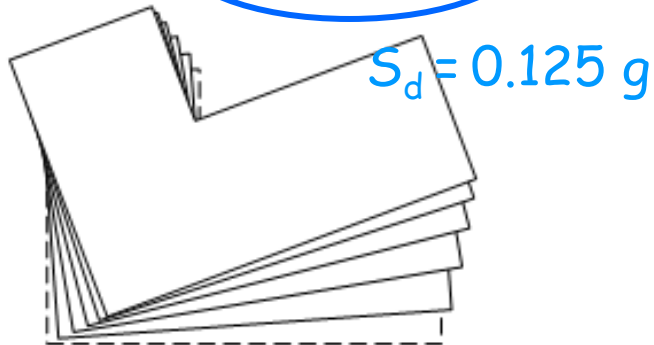
I modi 1 e 3 danno il contributo massimo

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

Periodi dei modi predominanti

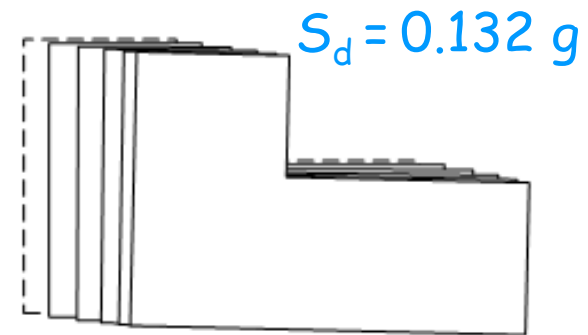
Modo 1

$T = 0.582 \text{ s}$



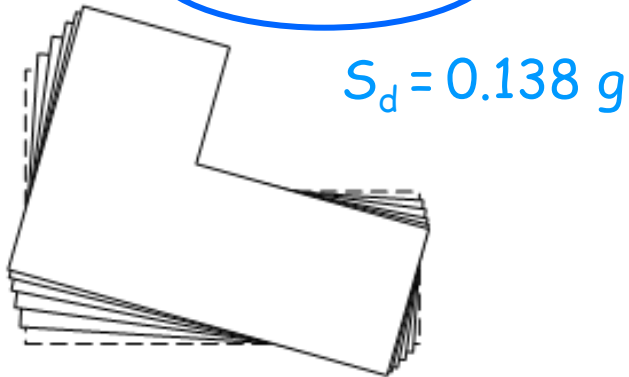
Modo 2

$T = 0.553 \text{ s}$



Modo 3

$T = 0.463 \text{ s}$



Periodi stimati: ~~0.611 s~~

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

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

I periodi sono analoghi

Le ordinate spettrali sono
quindi analoghe

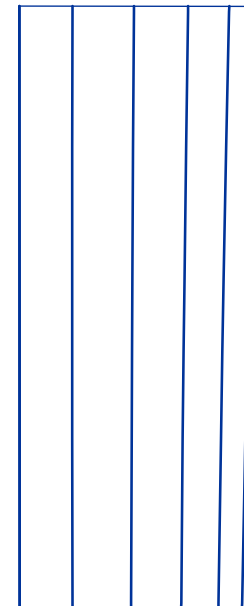
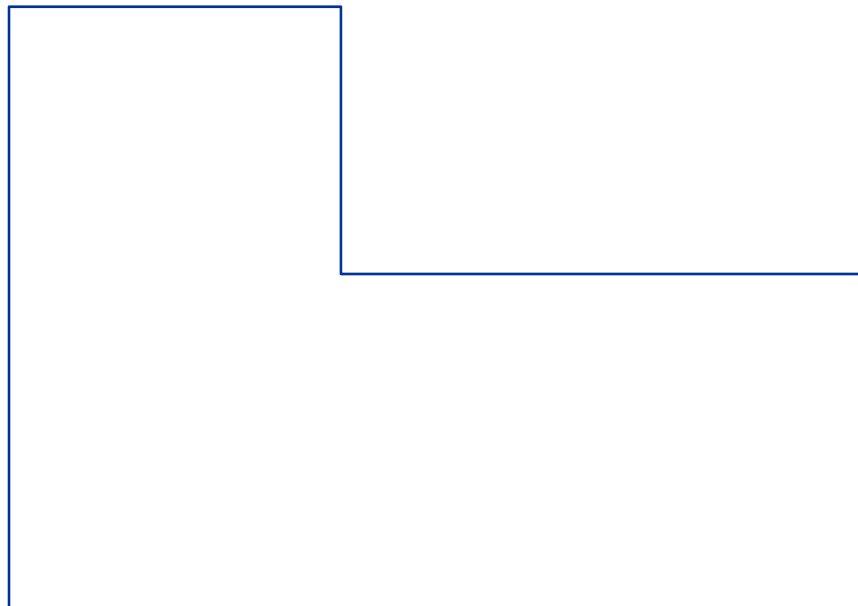
Inviluppo modale sisma x

1.71

4.10

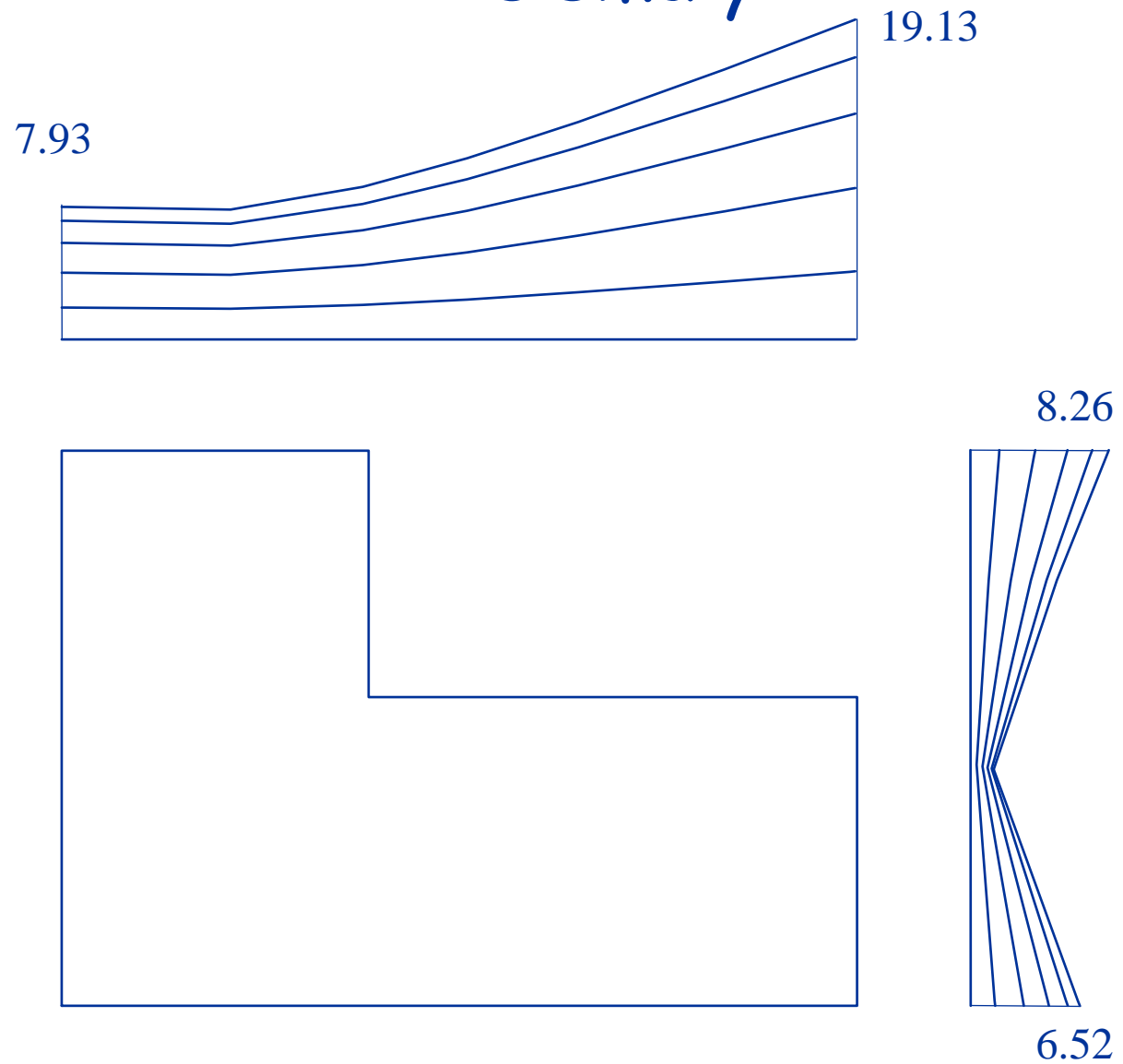


13.06

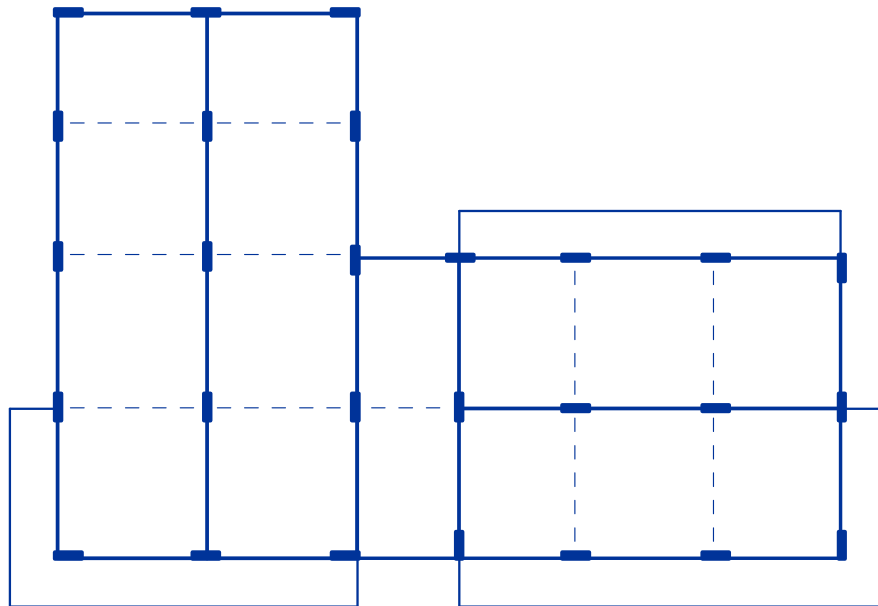


12.28

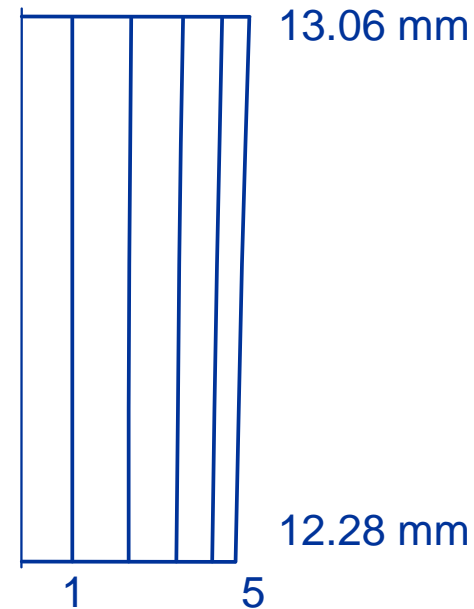
Inviluppo modale sisma y



Spostamenti, inviluppo modale



Spostamenti
per sisma x

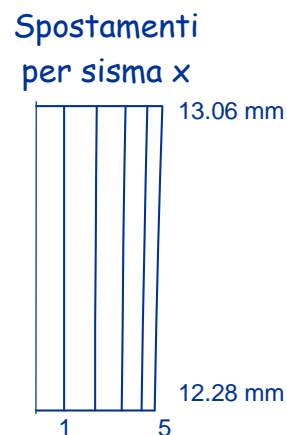
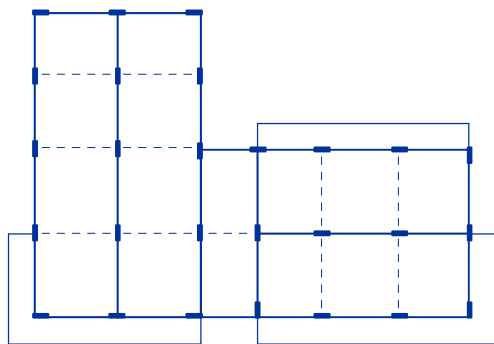


Spostamenti, inviluppo modale

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



La parte destra andrebbe irrigidita

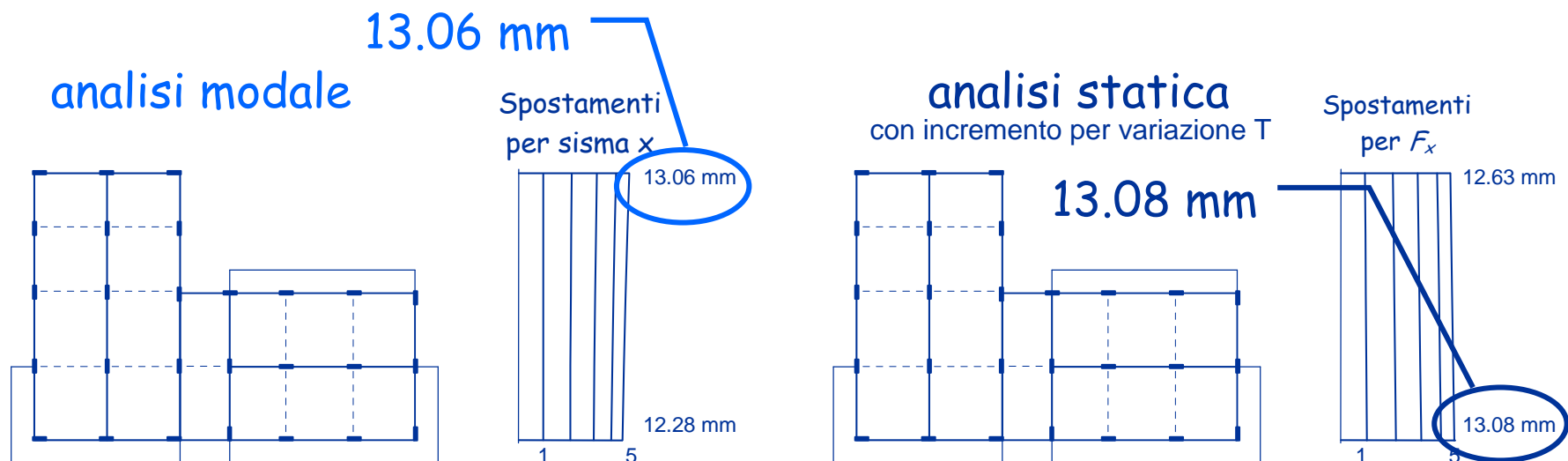


gli spostamenti massimi per sisma y sono maggiori di circa il 50% rispetto a quelli per sisma x

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

Spostamenti confronto tra analisi modale e statica

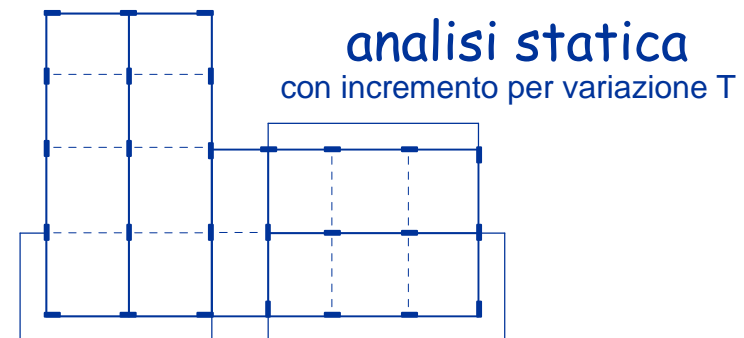
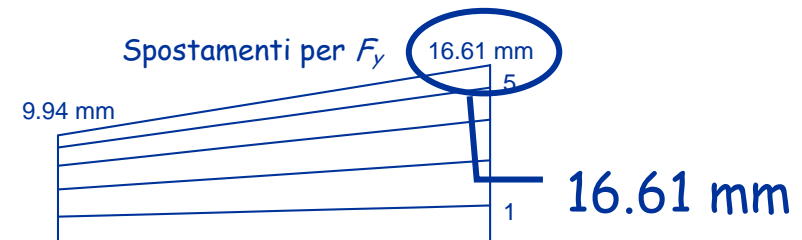
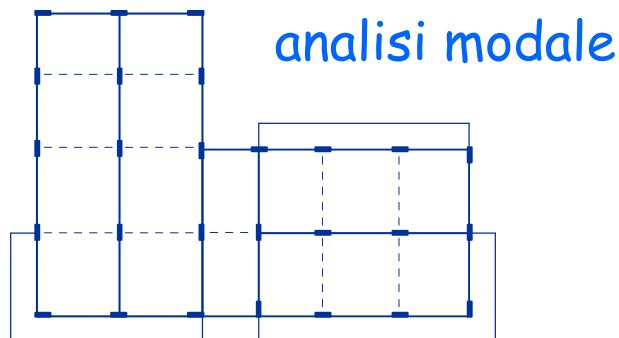
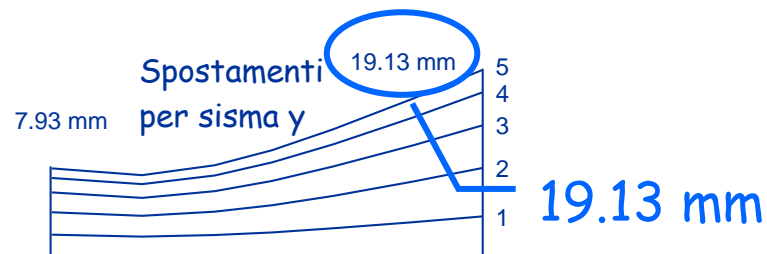
Sisma x: analisi modale - spostamenti uguali



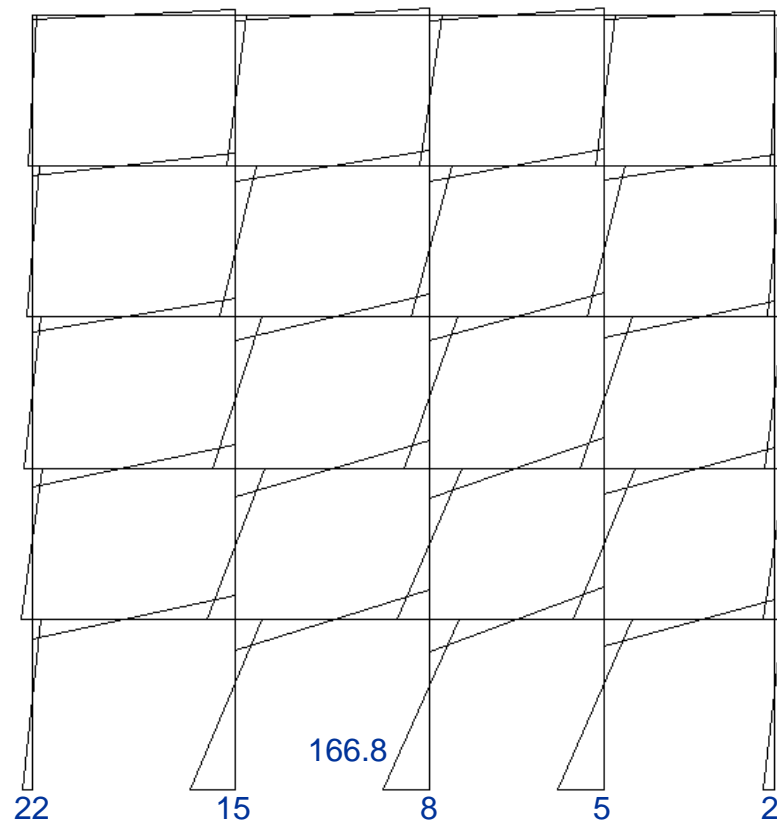
Spostamenti confronto tra analisi modale e statica

Sisma y: l'analisi modale accentua la rotazione

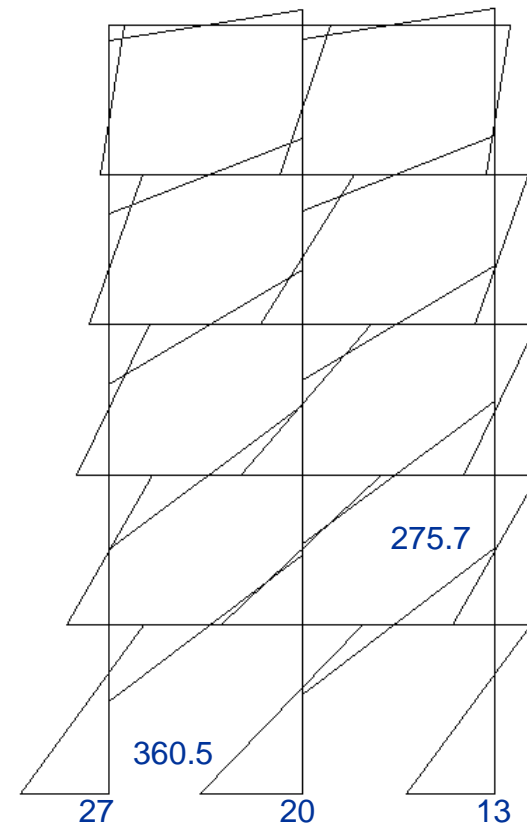
lato destro - spostamenti maggiori (25%)
lato sinistro - spostamenti minori



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

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)

+11%

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

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)

+11%

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

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%)

+11%

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

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%)

+11%

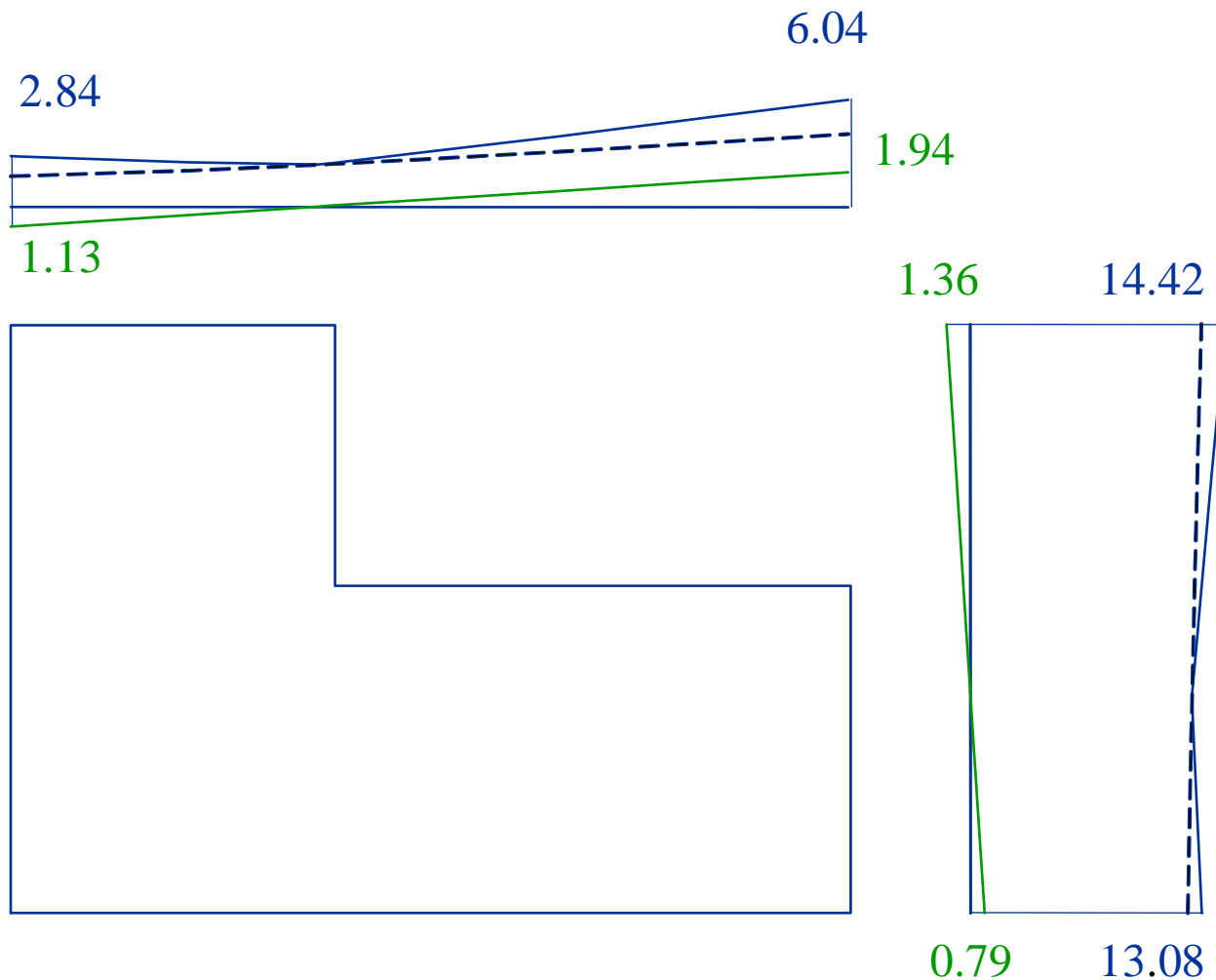
Eccentricità accidentale

Eccentricità accidentale

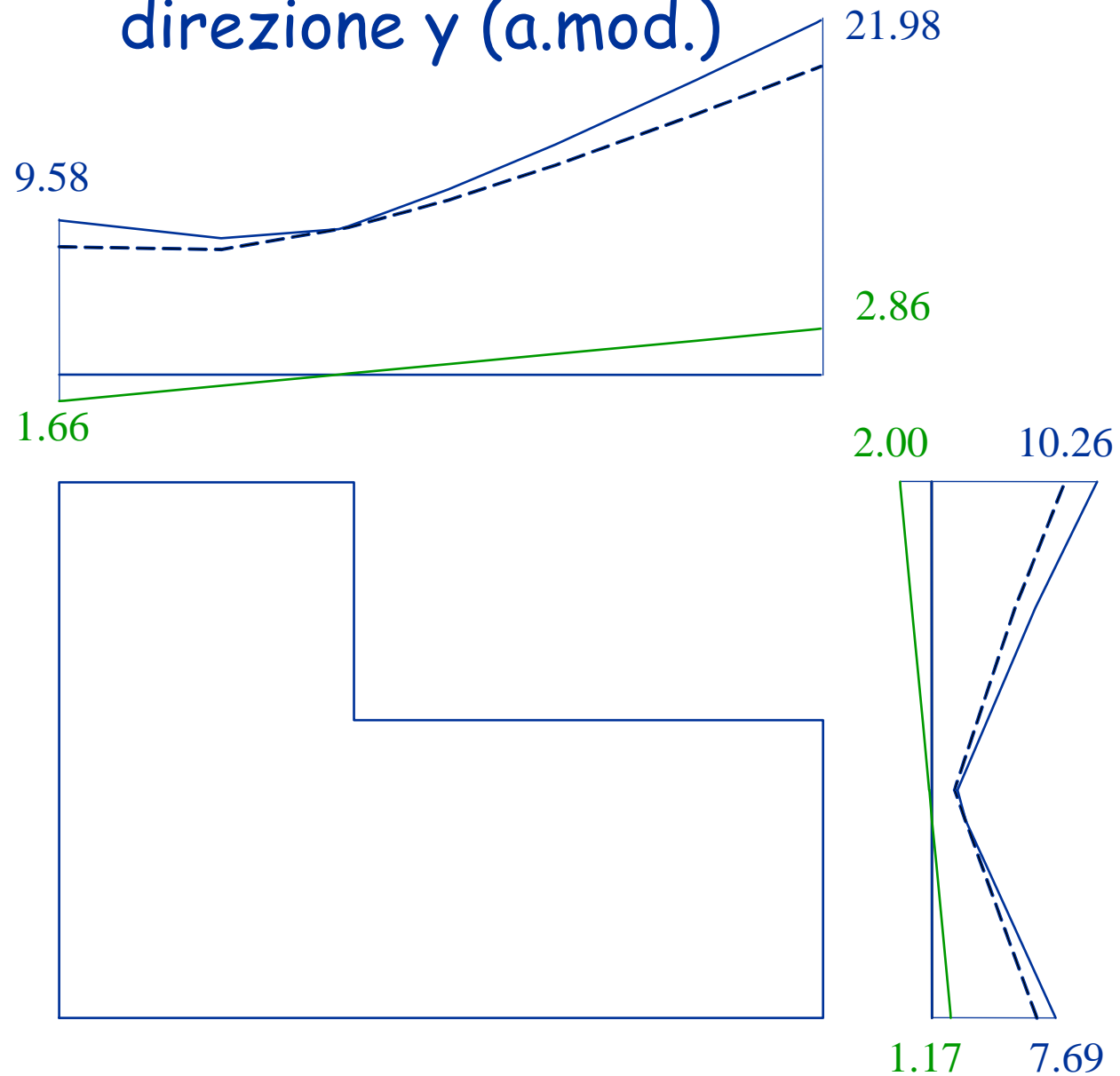
Esame dei risultati

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

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

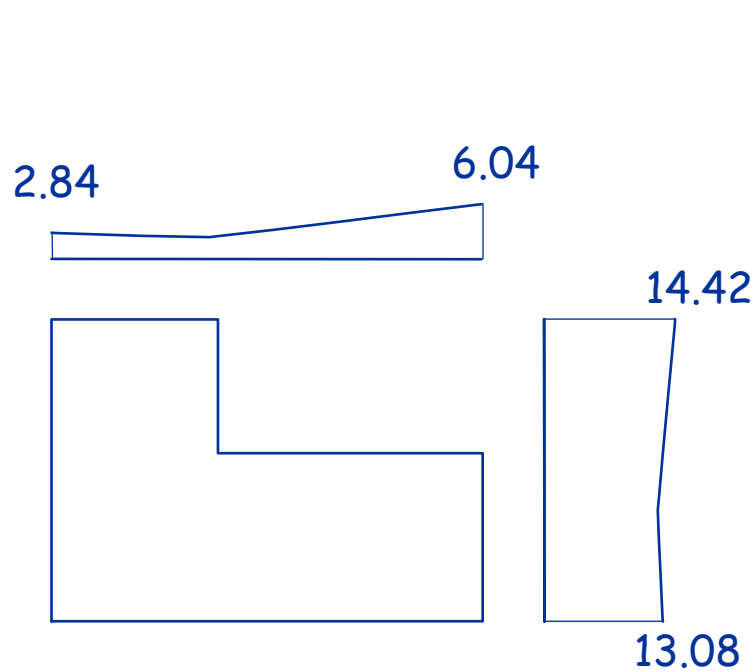
Le componenti orizzontali

"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"

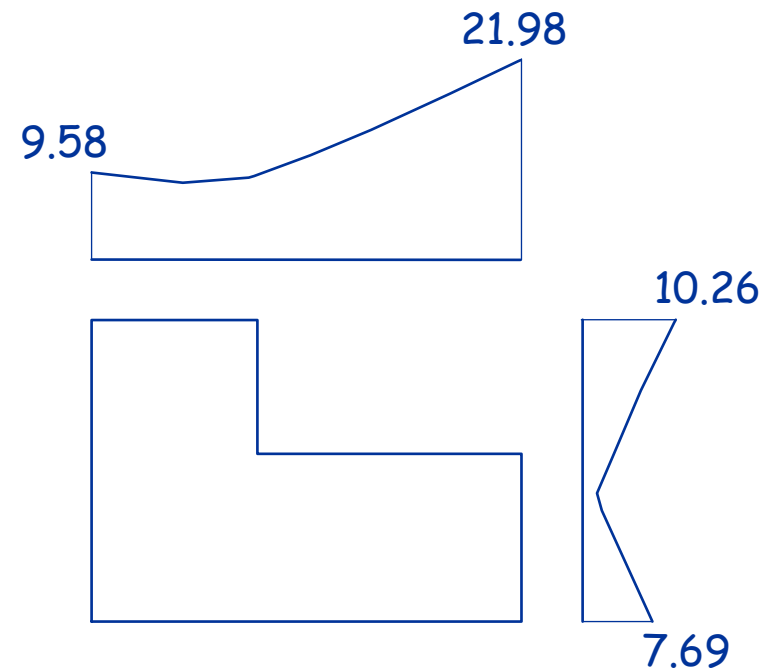
In che modo capire quanta importanza ha questa combinazione?

Ragioniamo ancora esaminando gli spostamenti

Effetto complessivo del sisma separatamente nelle due direzioni

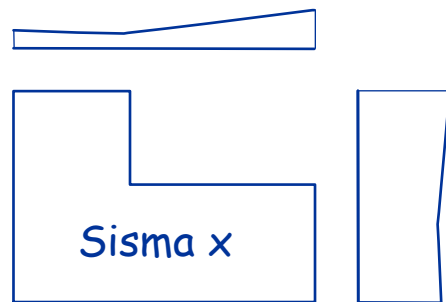


Sisma in
direzione x

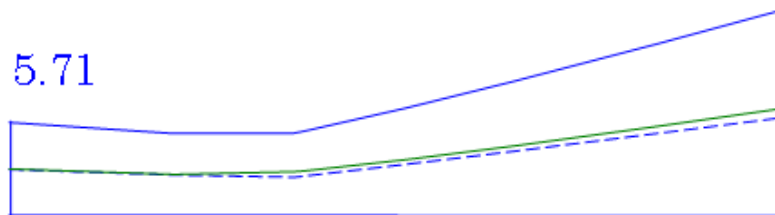


Sisma in
direzione y

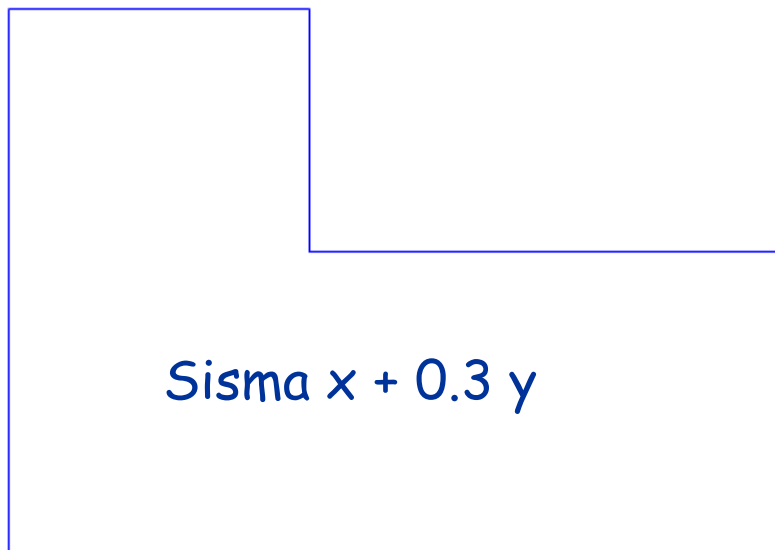
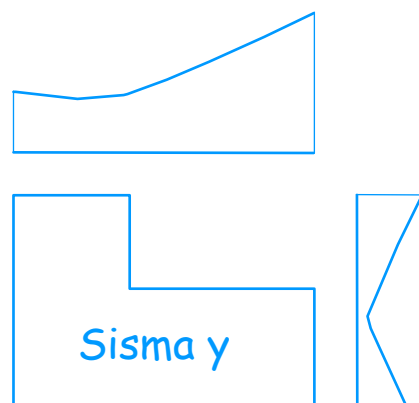
Inviluppo: $\text{sisma } x + 0.3 \text{ sisma } y$ analisi modale



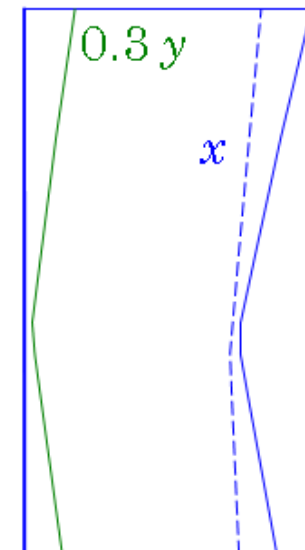
5.71



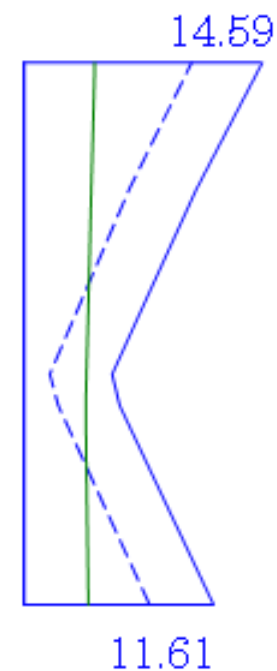
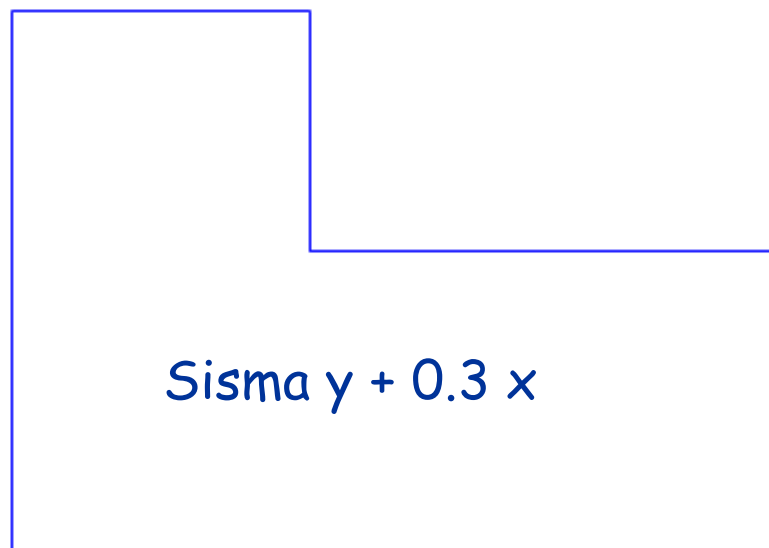
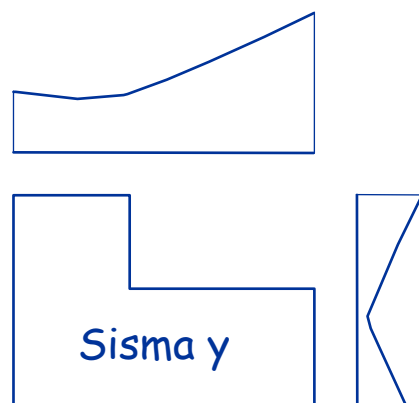
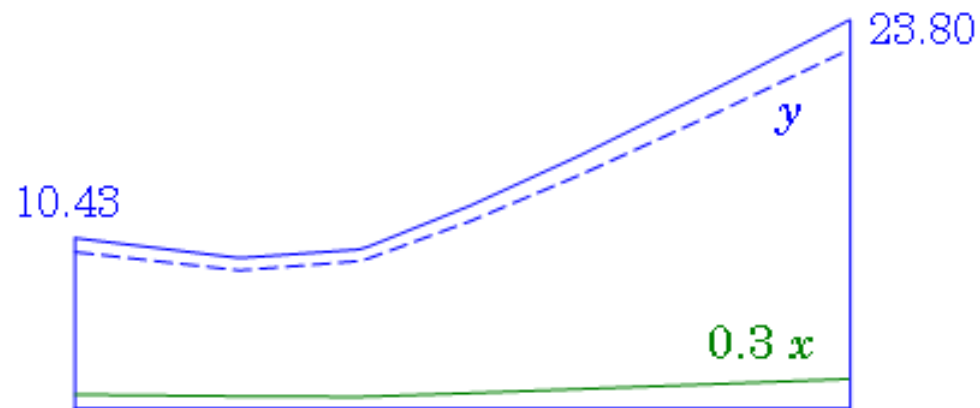
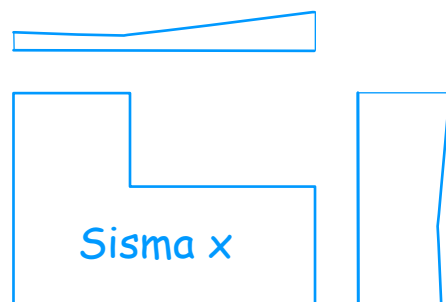
12.63



17.50



Inviluppo: sisma y + 0.3 sisma x analisi modale



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

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

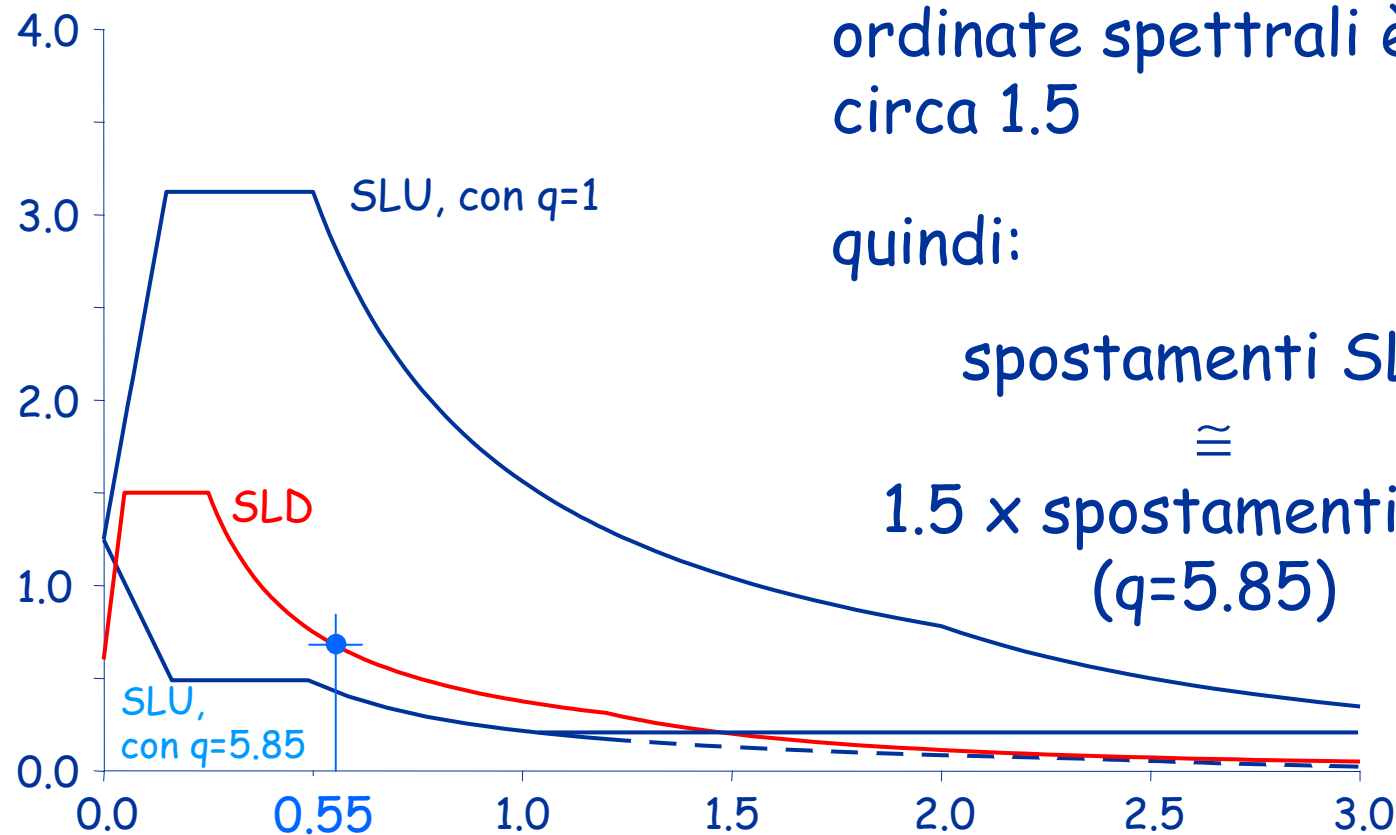
nel caso in esame, per
un periodo pari a circa
0.55 s il rapporto tra le
ordinate spettrali è
circa 1.5

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

Commenti finali

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

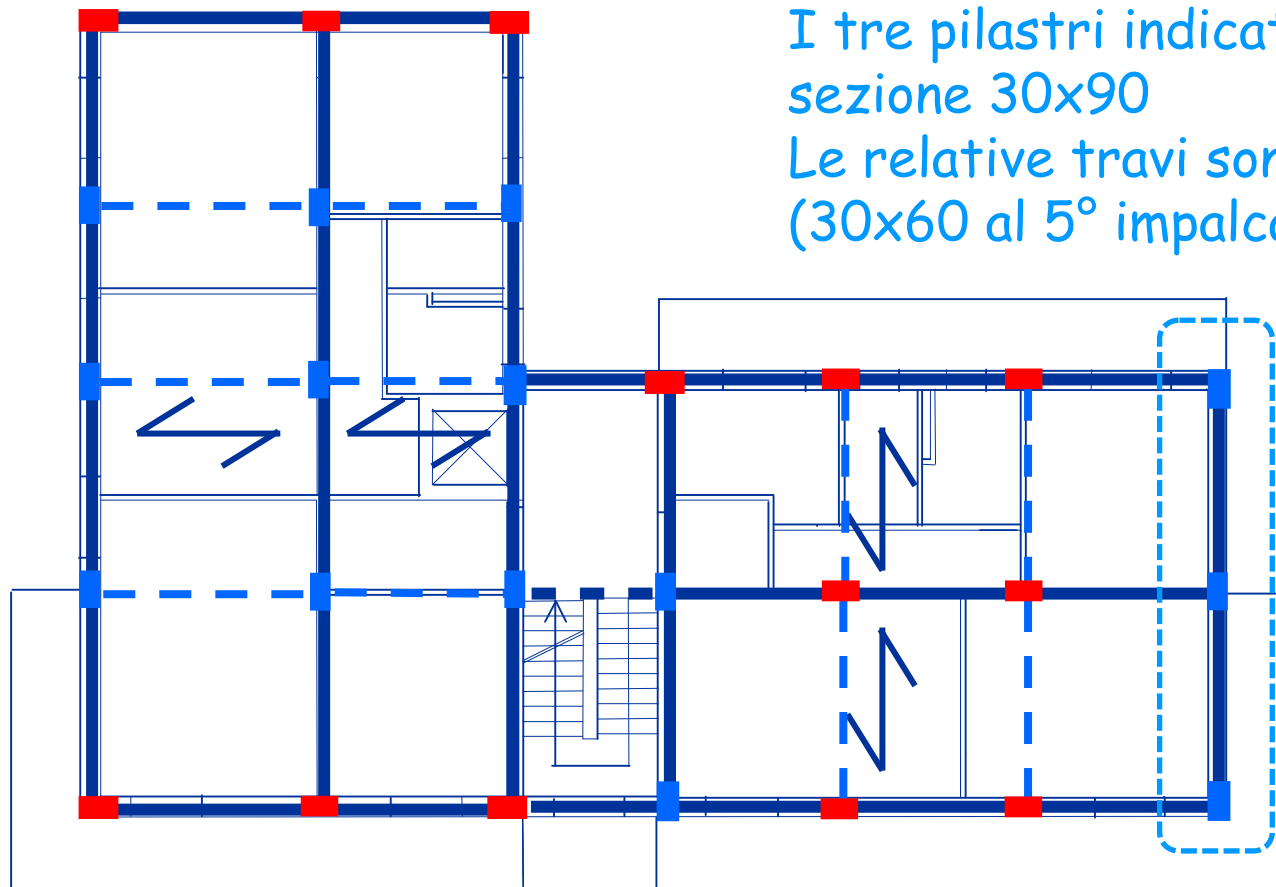
Ridimensionamento della struttura

Esame della carpenteria per quanto riguarda le azioni orizzontali

Variazione effettuata:

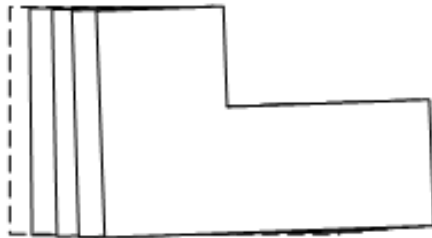
I tre pilastri indicati hanno
sezione 30x90

Le relative travi sono 30x70
(30x60 al 5° impalcato)

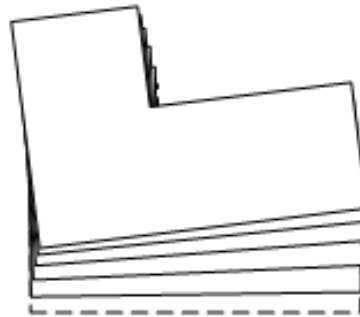


Questi
pilastri
hanno
dimensioni
maggiori
per evitare
che il lato
destro sia
meno rigido

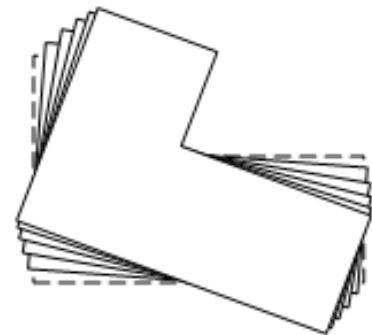
Deformate modali e relativi periodi



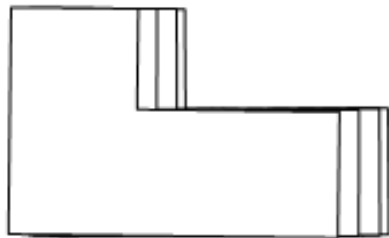
Modo 1 $T = 0.550 \text{ s}$



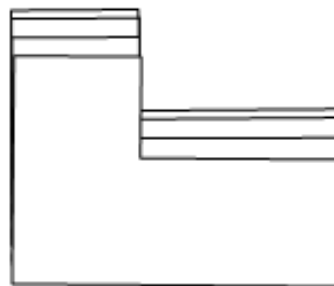
Modo 2 $T = 0.517 \text{ s}$



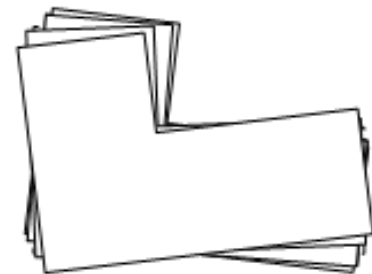
Modo 3 $T = 0.440 \text{ s}$



Modo 4 $T = 0.176 \text{ s}$



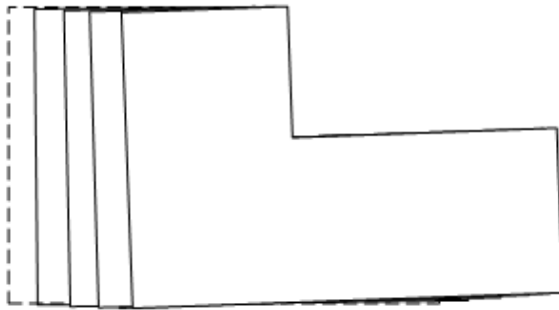
Modo 5 $T = 0.164 \text{ s}$



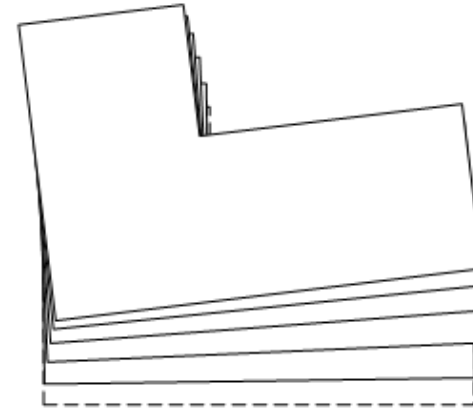
Modo 6 $T = 0.140 \text{ s}$

Deformate modali

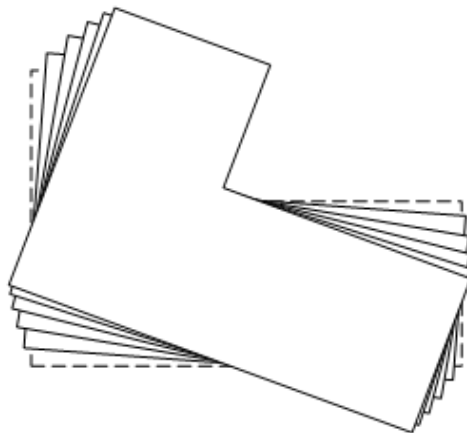
Modo 1 $T = 0.550 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.517 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.440 \text{ s}$

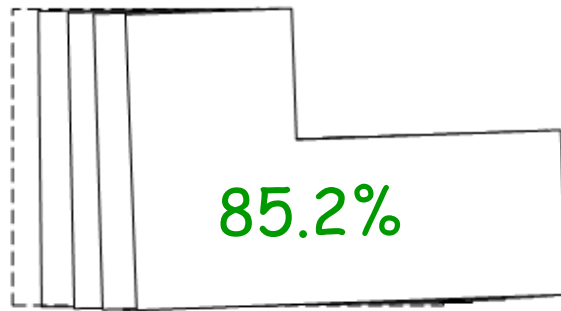


Il modo 1 è sostanzialmente di traslazione secondo x

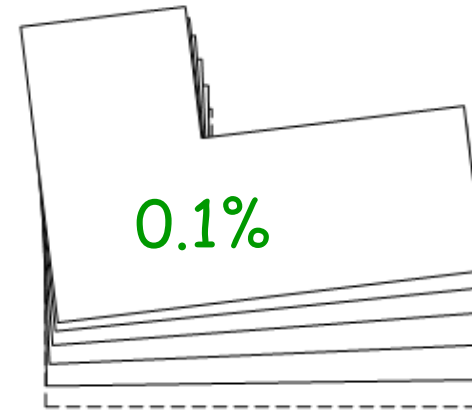
Il modo 2 è di traslazione secondo y accoppiata ad un po' di rotazione

Masse partecipanti, sisma x

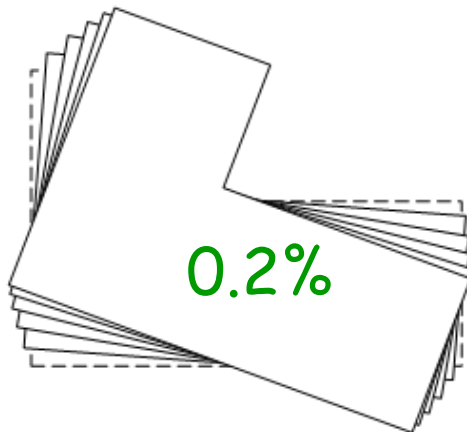
Modo 1 $T = 0.550 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.5173 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.440 \text{ s}$

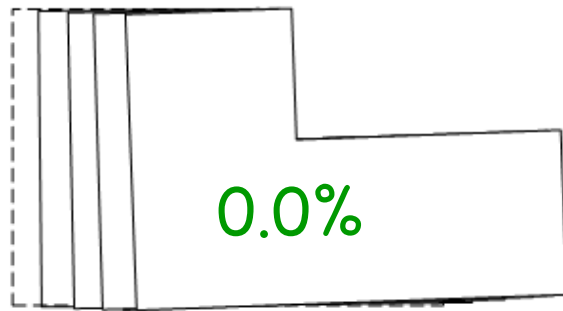


Il modo 1 dà il contributo massimo

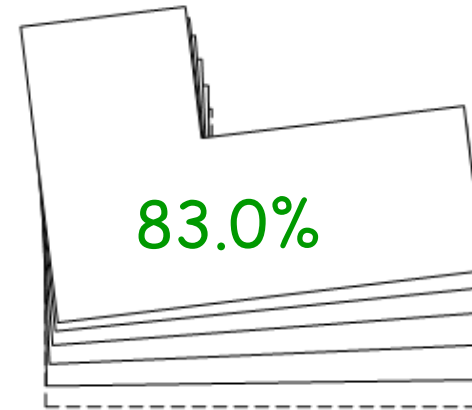
Il modo 4, di traslazione x con spostamenti nei due versi, dà un ulteriore contributo (9.3%)

Masse partecipanti, sisma y

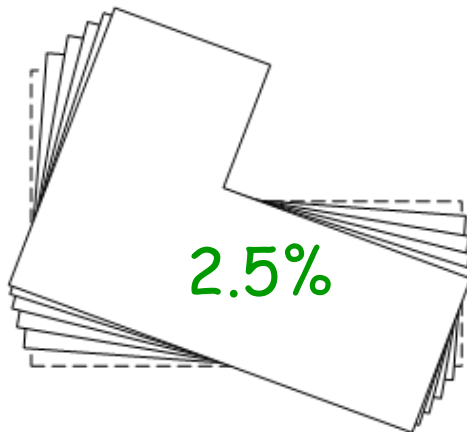
Modo 1 $T = 0.550 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.5173 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.440 \text{ s}$



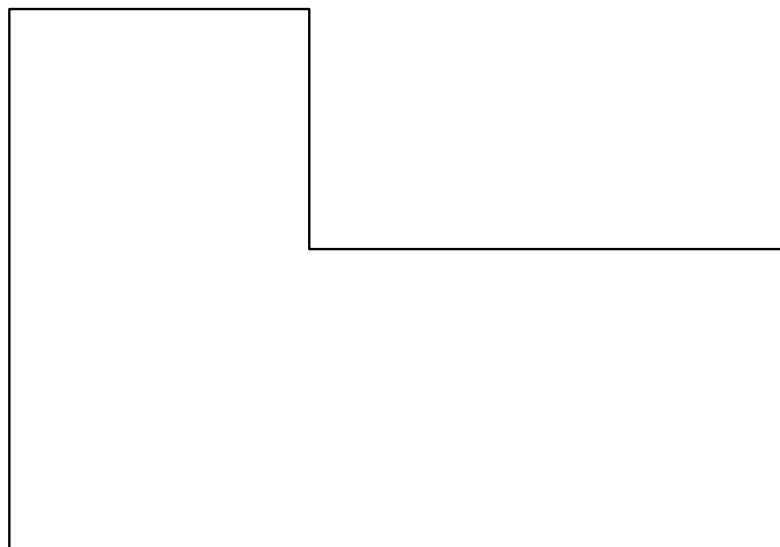
Il modo 2 dà il contributo massimo

Il modo 5, di traslazione x con spostamenti nei due versi, dà un ulteriore contributo (9.6%)

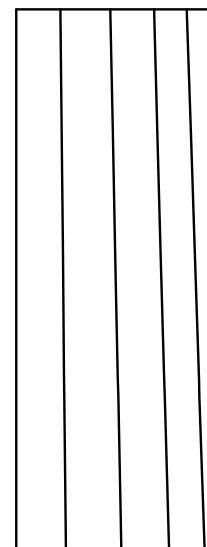
Inviluppo modale sisma x

0.82

1.34

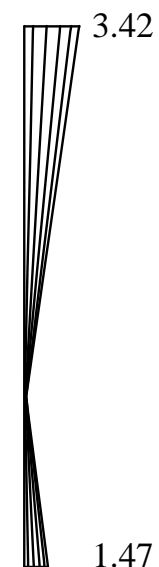
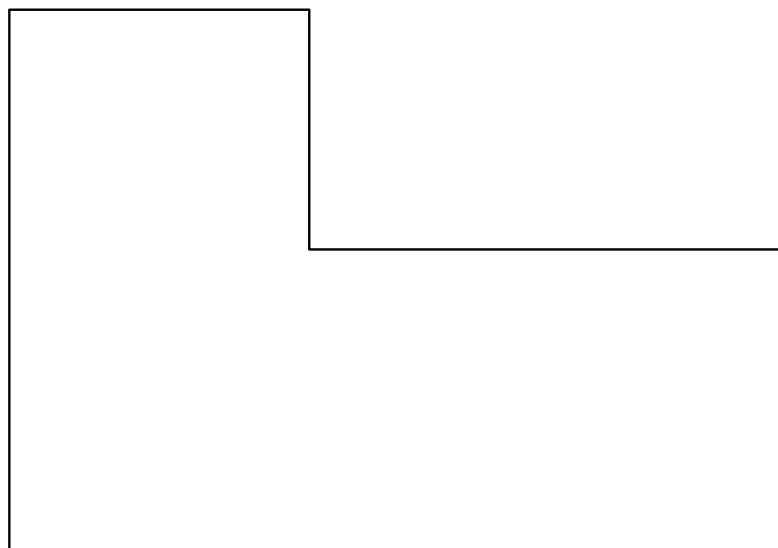
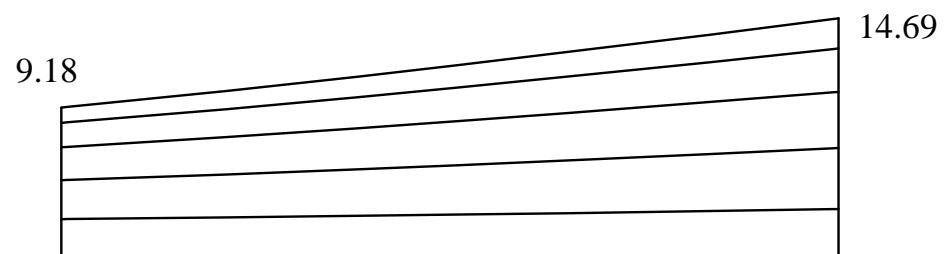


11.94

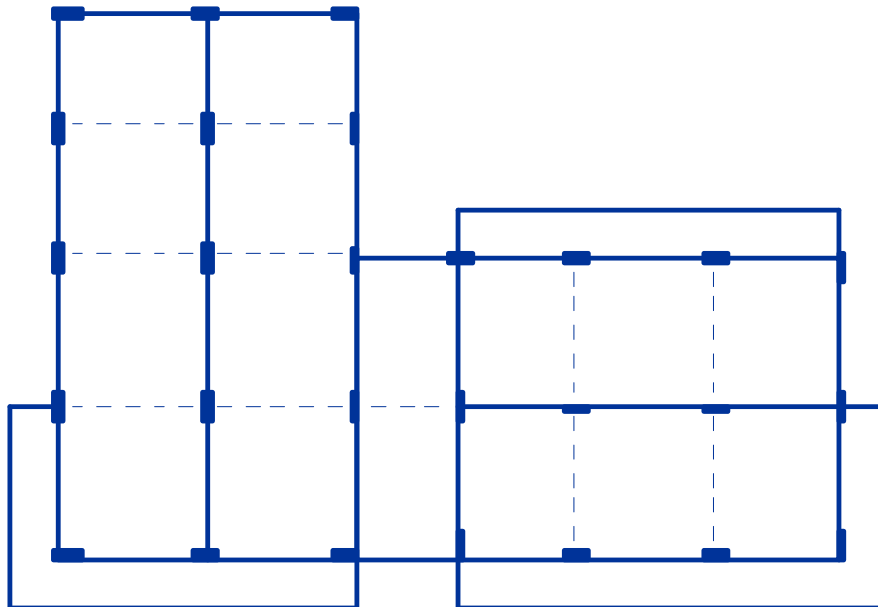
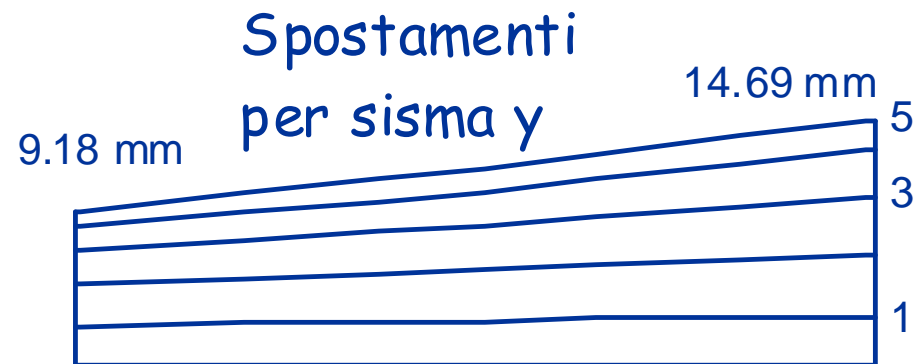


13.13

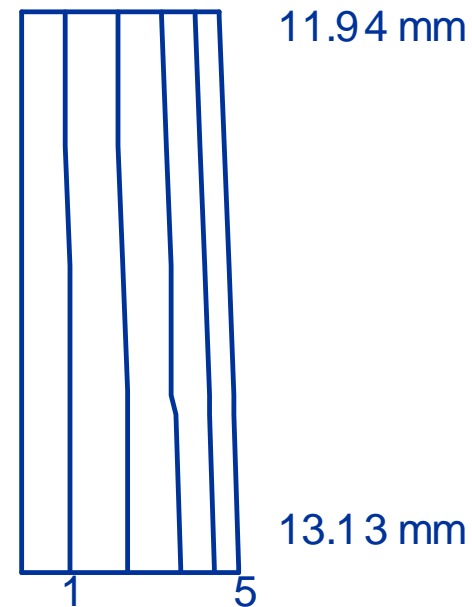
Inviluppo modale sisma y



Spostamenti, inviluppo modale



Spostamenti
per sisma x

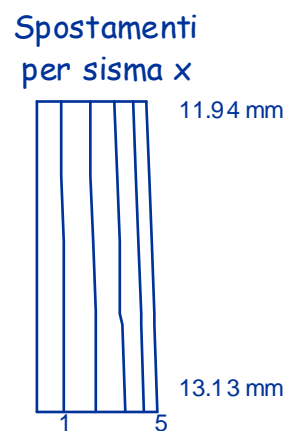
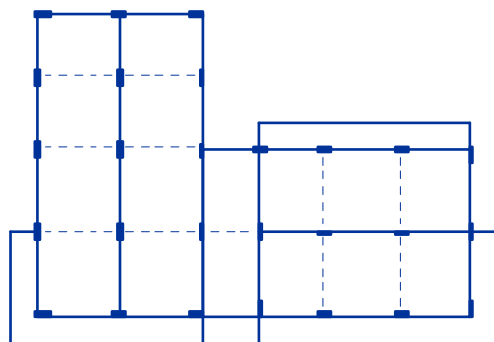


Spostamenti, inviluppo modale

Rotazione per sisma y
non trascurabile, ma in
definitiva accettabile



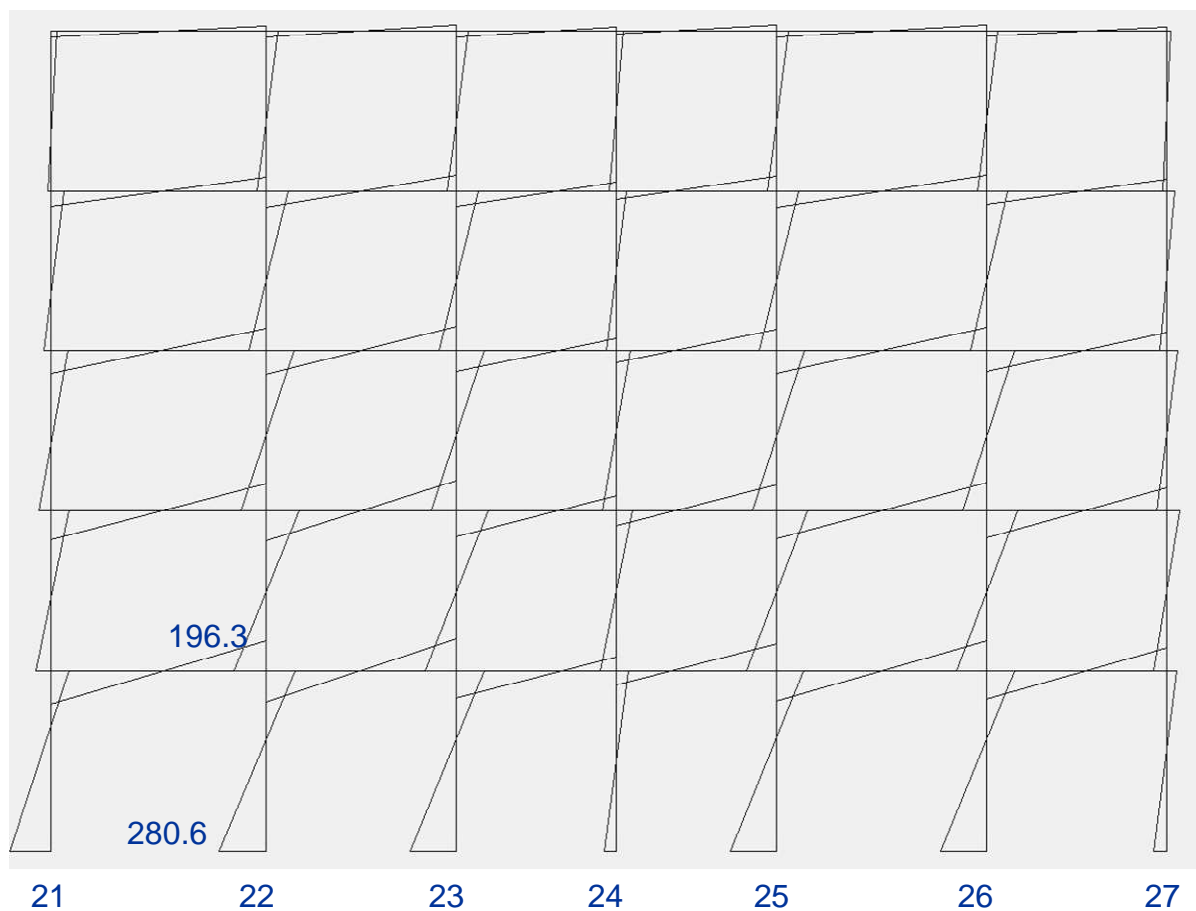
Si potrebbe provare
a indebolire la parte
sinistra



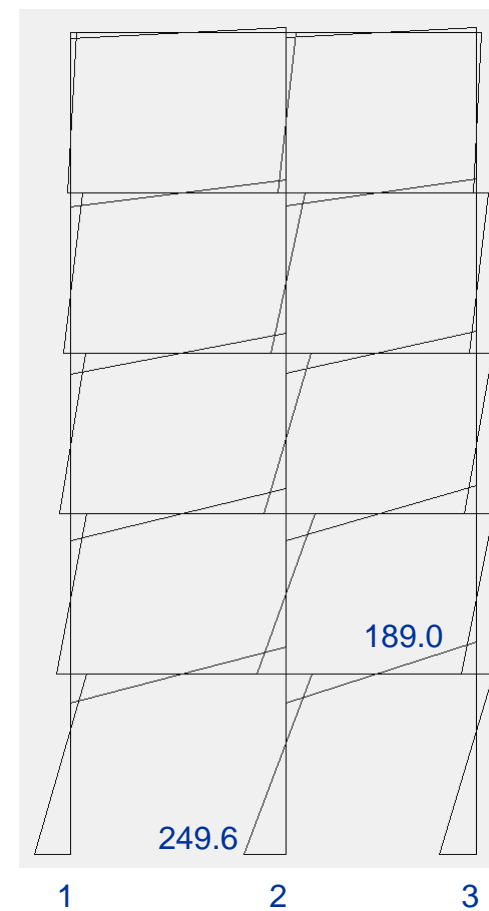
gli spostamenti massimi per
sisma y sono maggiori di
quasi il 20% rispetto a
quelli medi per sisma x

Spostamenti per sisma x
abbastanza uniformi
(vicini a quelli del modo 1)

Sollecitazioni per sisma in direzione x



Telaio 1x

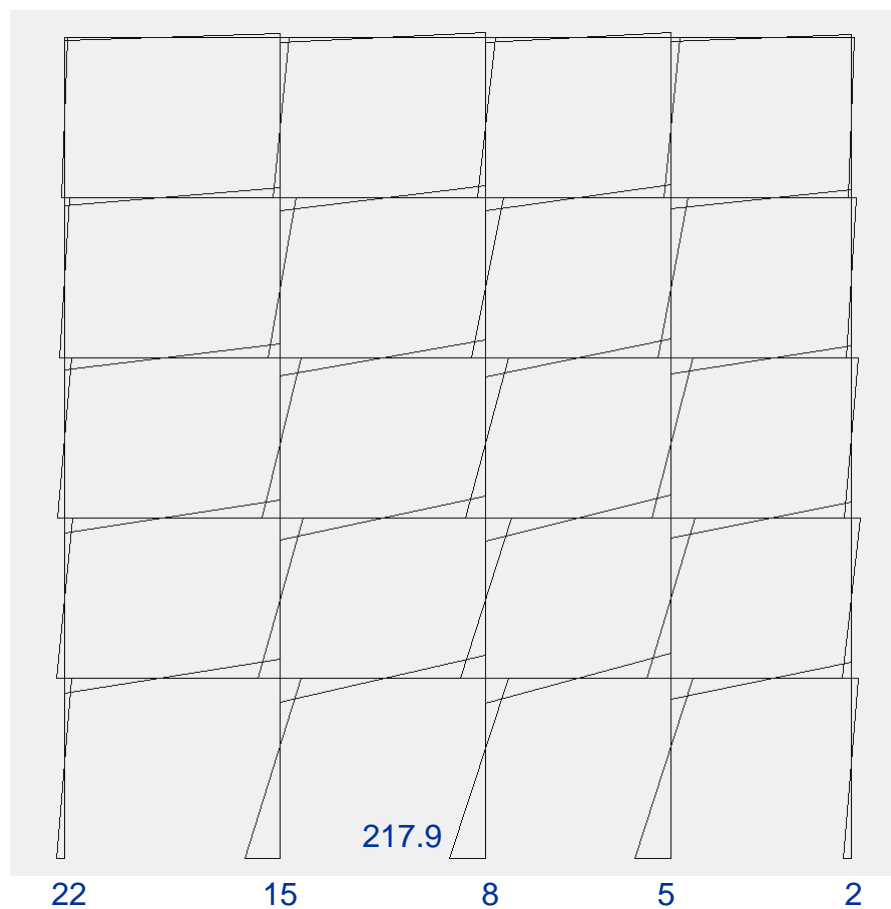


Telaio 5x

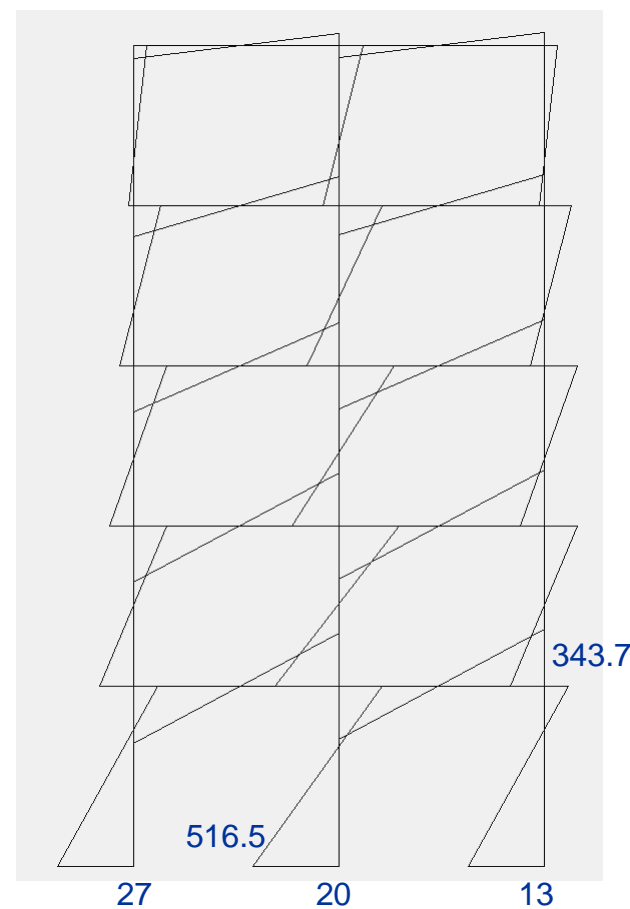
Sollecitazioni per sisma in direzione x

piano	pilastri			travi		
	previsto	telaio 1x	telaio 5x	previsto	telaio 1x	telaio 5x
5	67.6	74.1	61.1	33.8	38.1	33.9
4	119.2	131.8	115.3	93.4	95.2	85.2
3	158.2	170.6	152.6	138.7	141.6	132.9
2	184.7	195.6	176.7	171.5	178.5	170.7
1 testa	176.5	174.9	155.6	180.6	196.3	189.0
1 piede	264.8	280.6	249.6			

Sollecitazioni per sisma in direzione y



Telaio 2y

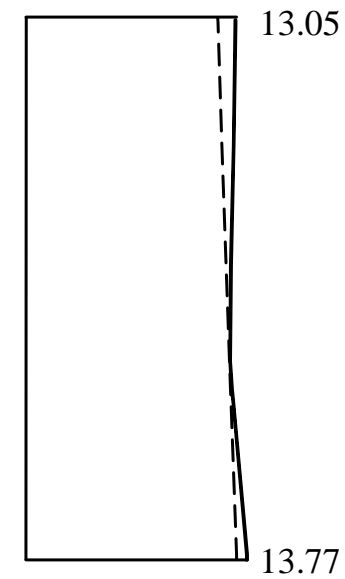
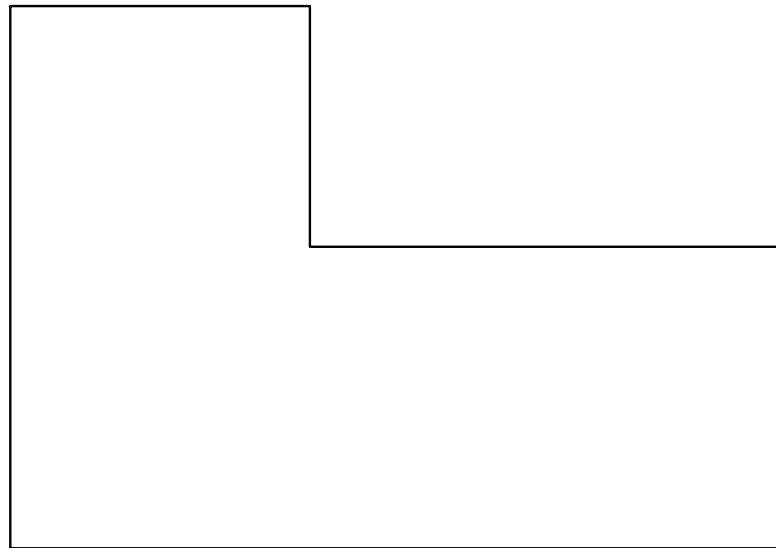


Telaio 7y

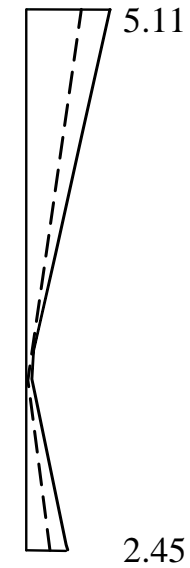
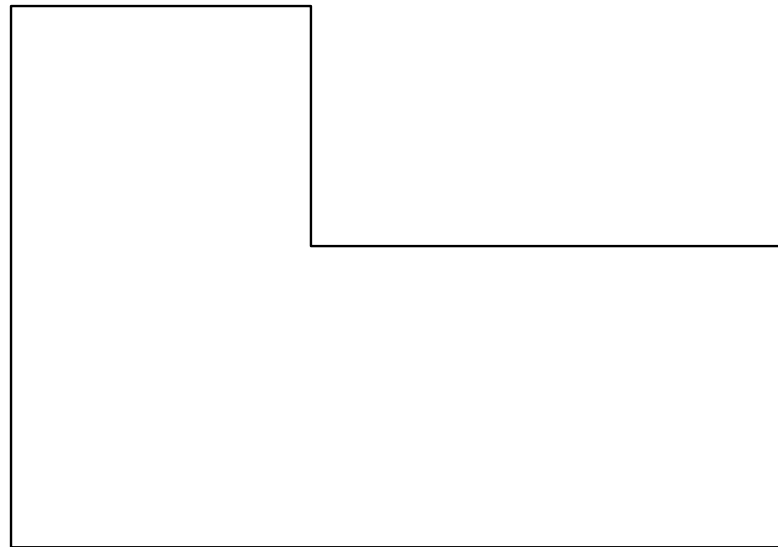
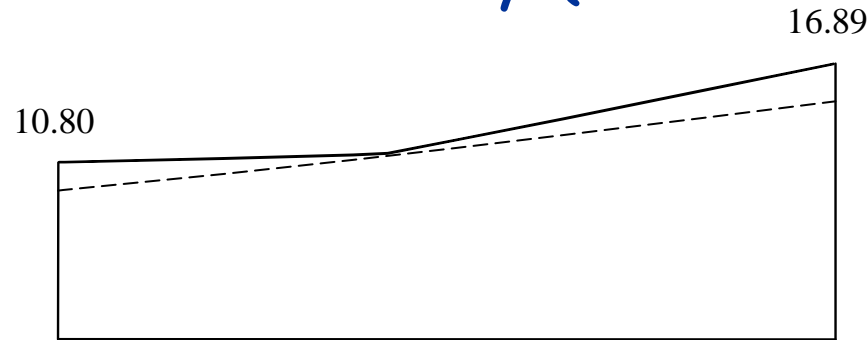
Sollecitazioni per sisma in direzione y

piano	pilastri telaio 2y		pilastri telaio 7y		travi telaio 2y		travi telaio 7y	
	previsto	calcolato	previsto	calcolato	previsto	calcolato	previsto	calcolato
5	57.5	61.1	115.0	146.1	28.7	31.1	57.5	78.0
4	101.3	105.6	202.6	255.2	79.4	76.9	158.8	183.7
3	134.5	135.7	268.9	329.5	117.9	112.7	235.8	273.3
2	157.0	153.0	314.0	361.7	145.7	140.4	291.5	338.9
1 testa	150.1	136.6	300.1	259.6	153.5	149.1	307.1	343.7
1 piede	225.1	217.9	450.2	516.5				

Spostamenti per forze e coppie direzione x (analisi modale)

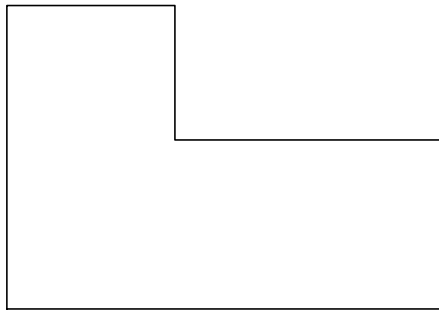


Spostamenti per forze e coppie direzione y (analisi modale)



Effetto complessivo del sisma separatamente nelle due direzioni

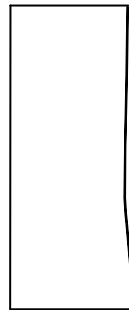
1.88 2.88



Sisma in
direzione x

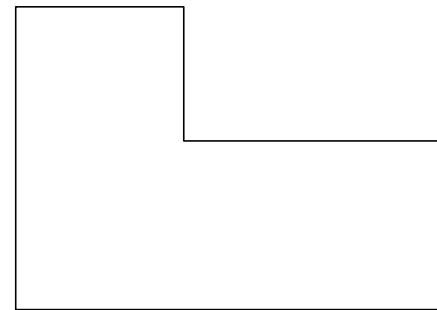
13.05

13.77



10.80

16.89



5.11

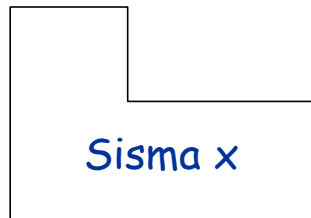
2.45



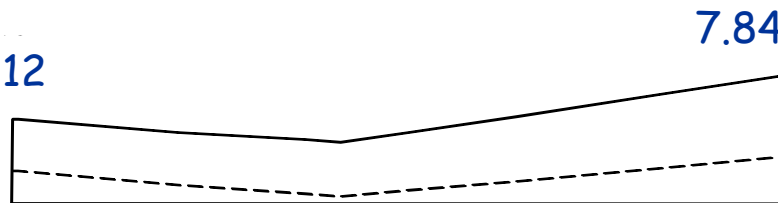
Sisma in
direzione y

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

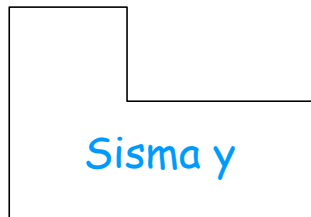
1.88 2.88



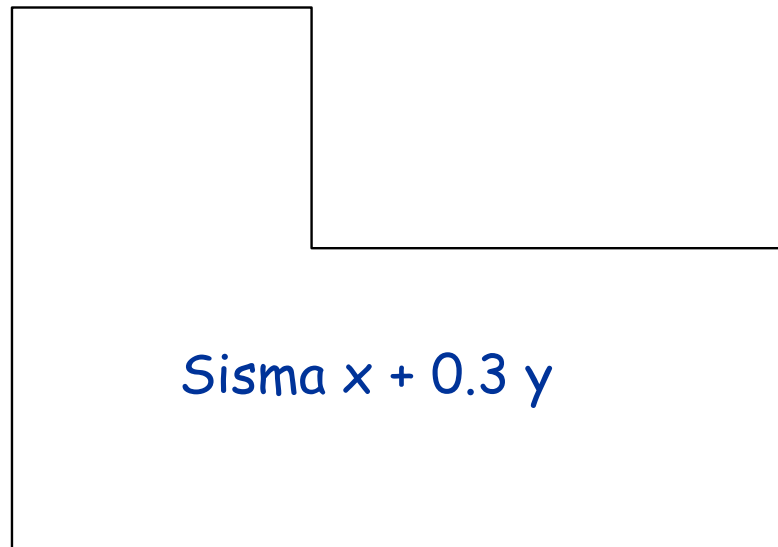
5.12



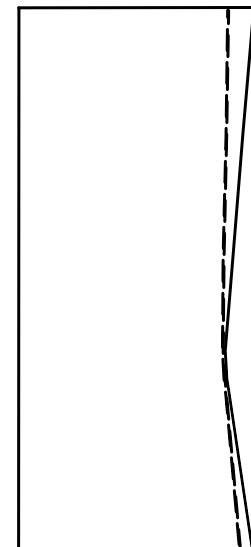
10.80 16.89



$\text{Sisma } x + 0.3 y$

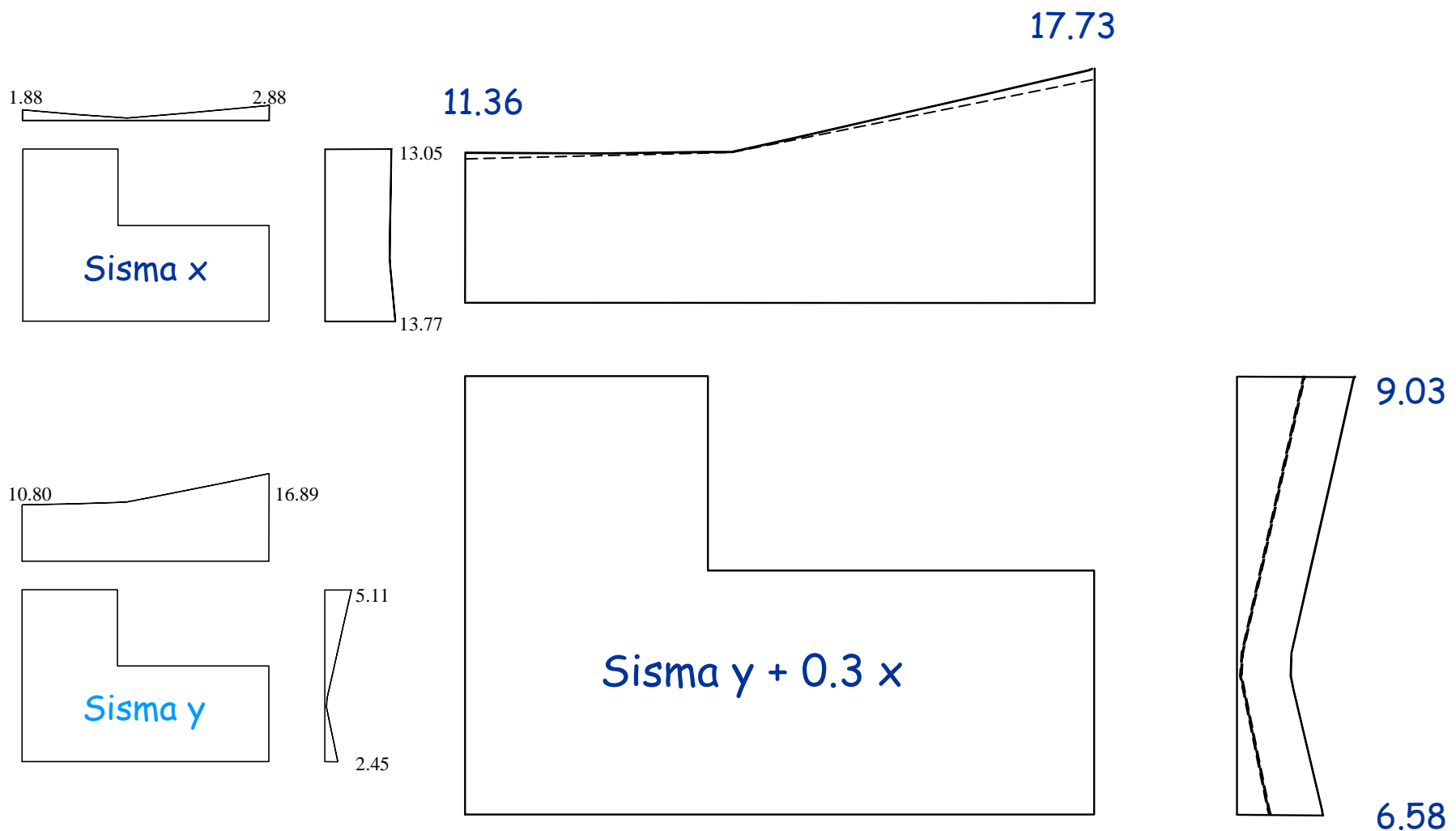


14.59



14.50

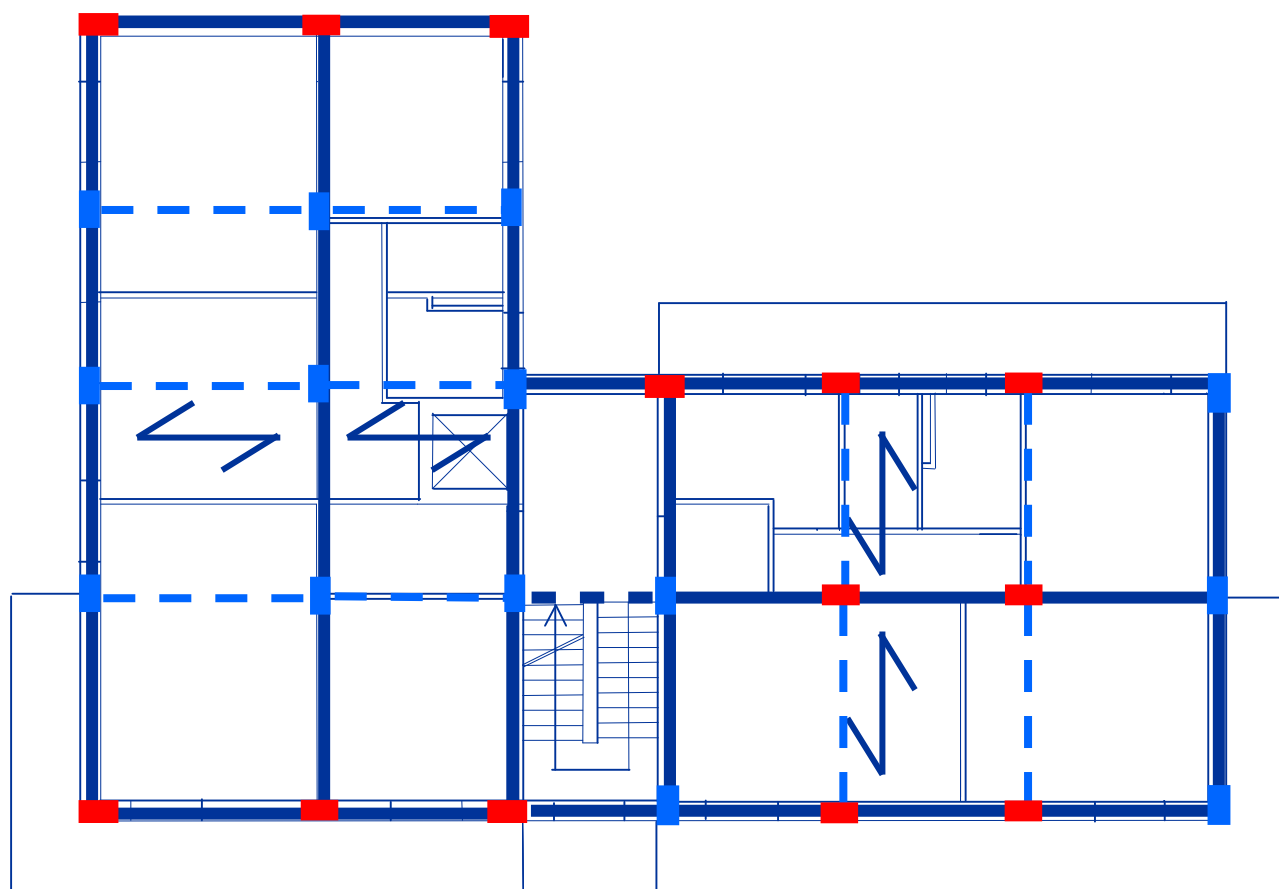
Inviluppo: sisma y + 0.3 sisma x analisi modale



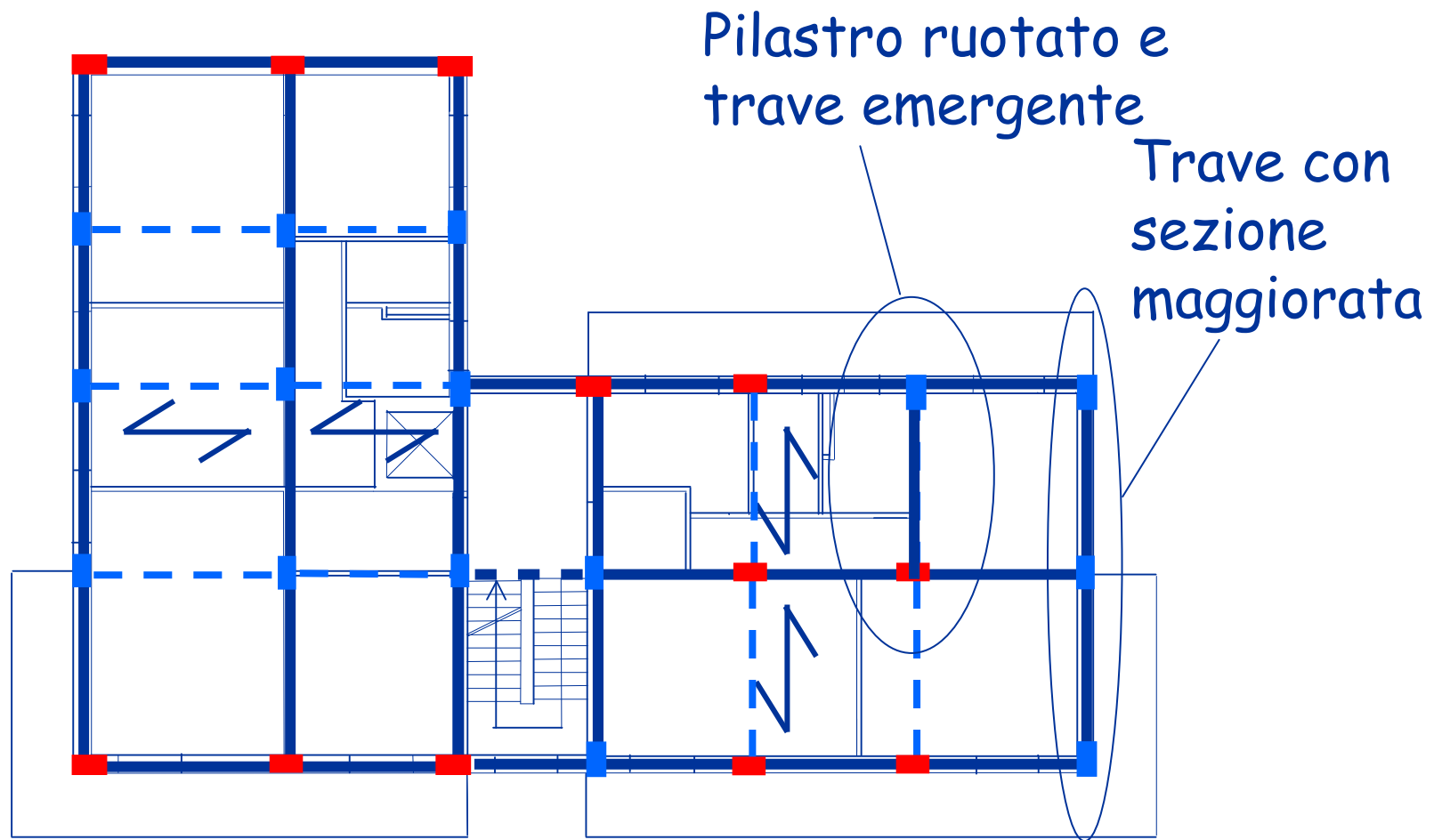
Precedenti tentativi di ridimensionamento

Li lascio solo come ricordo, perché citati nel libro,
ma sono superati dal nuovo ridimensionamento
descritto in precedenza

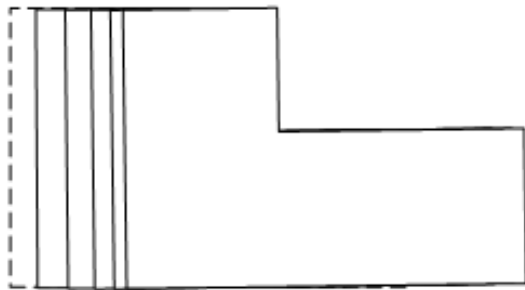
Impostazione della carpenteria



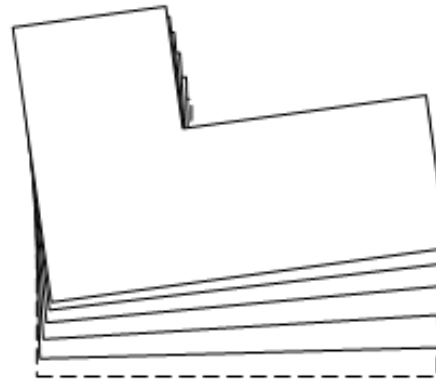
Impostazione della carpenteria con modifiche



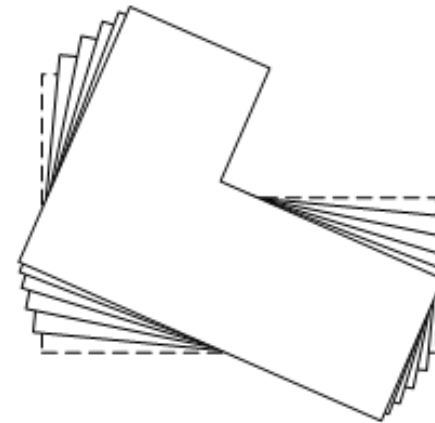
Modi di oscillazione libera



Modo 1



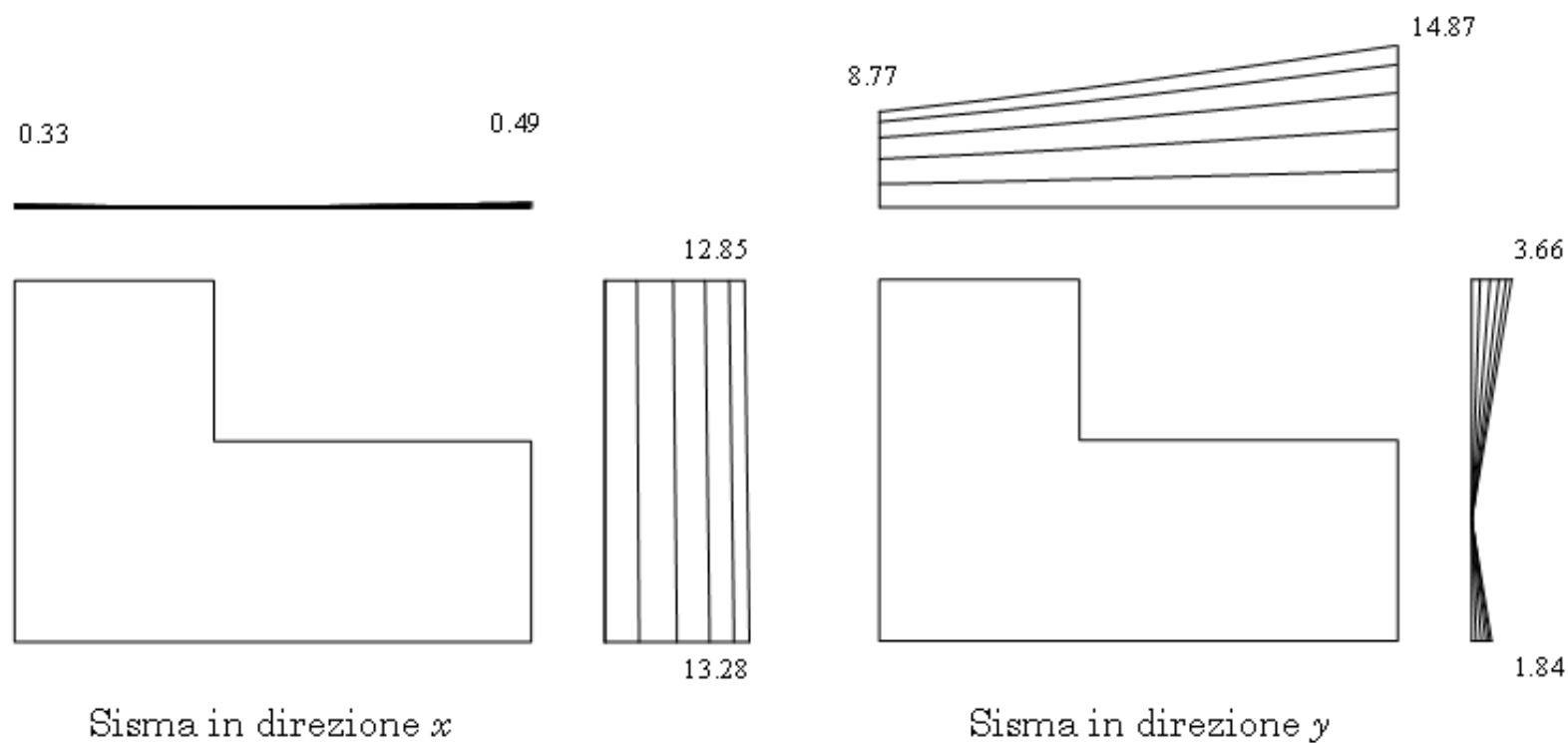
Modo 2



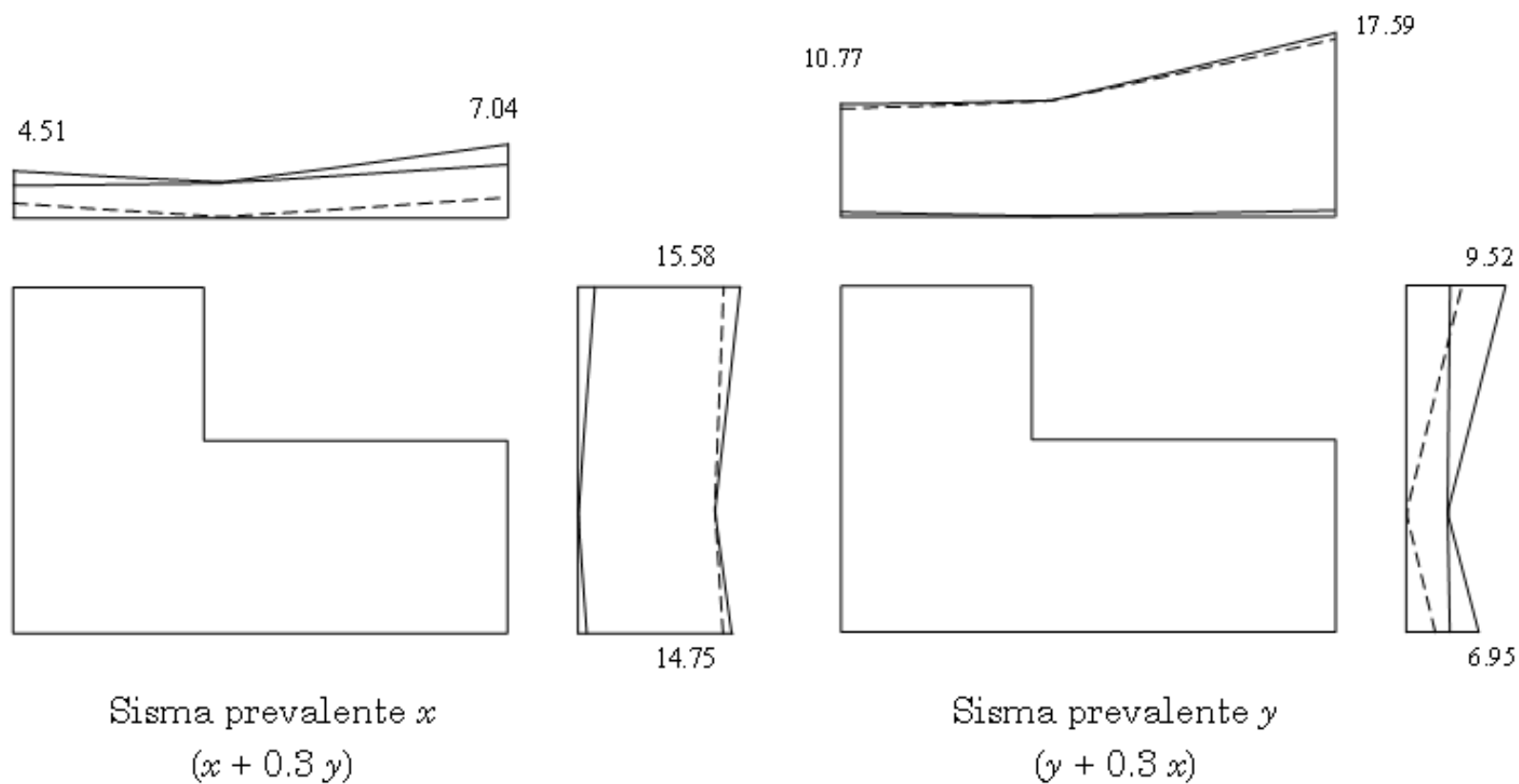
Modo 3

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

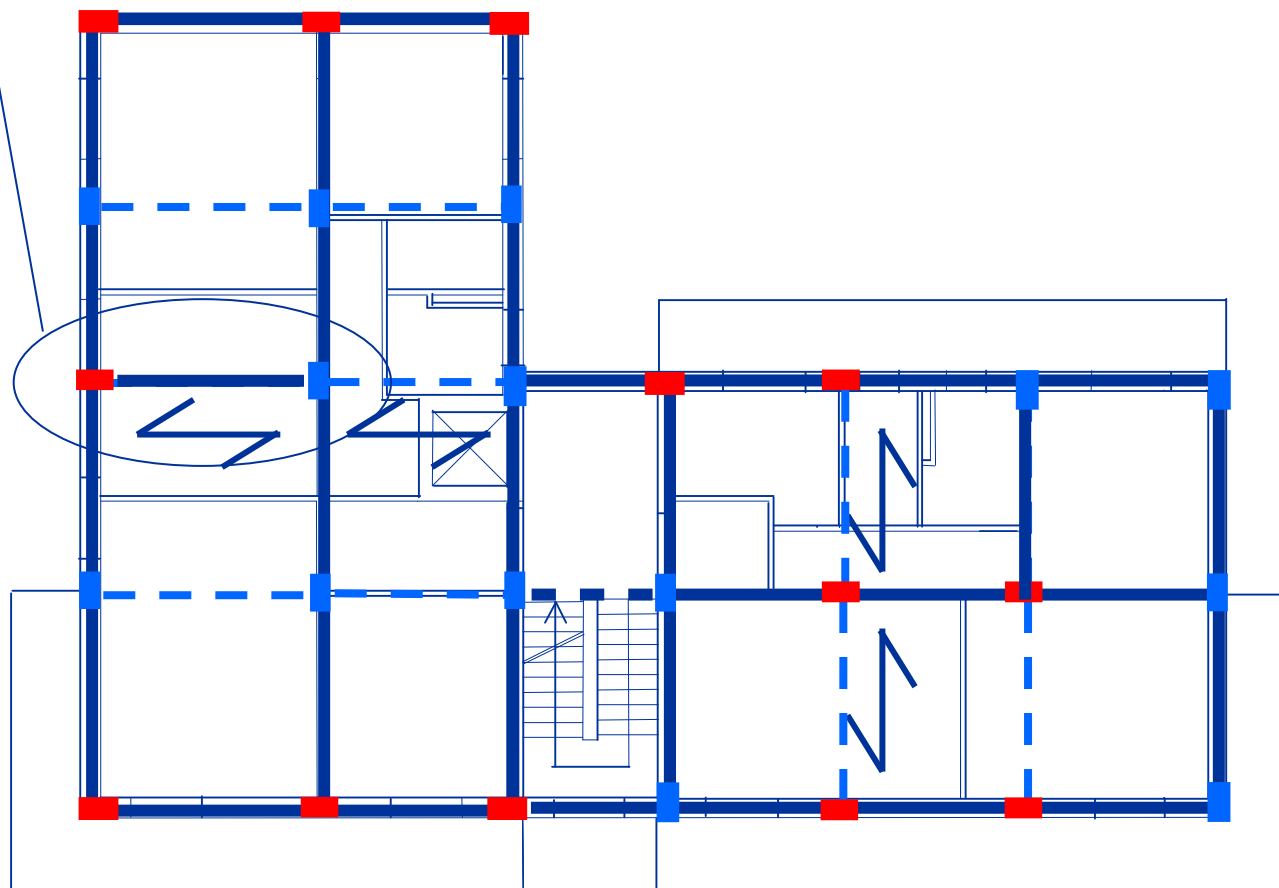


Effetto compressivo



Impostazione della carpenteria

Pilastro ruotato e
trave emergente



Effetto compressivo

