

Corso di aggiornamento

Progettazione strutturale sulla base
delle normative più recenti

**Progetto e verifica di edifici isolati alla base e
validazione del calcolo strutturale eseguito al computer**

Villa Redenta, Spoleto

12-14 febbraio 2009

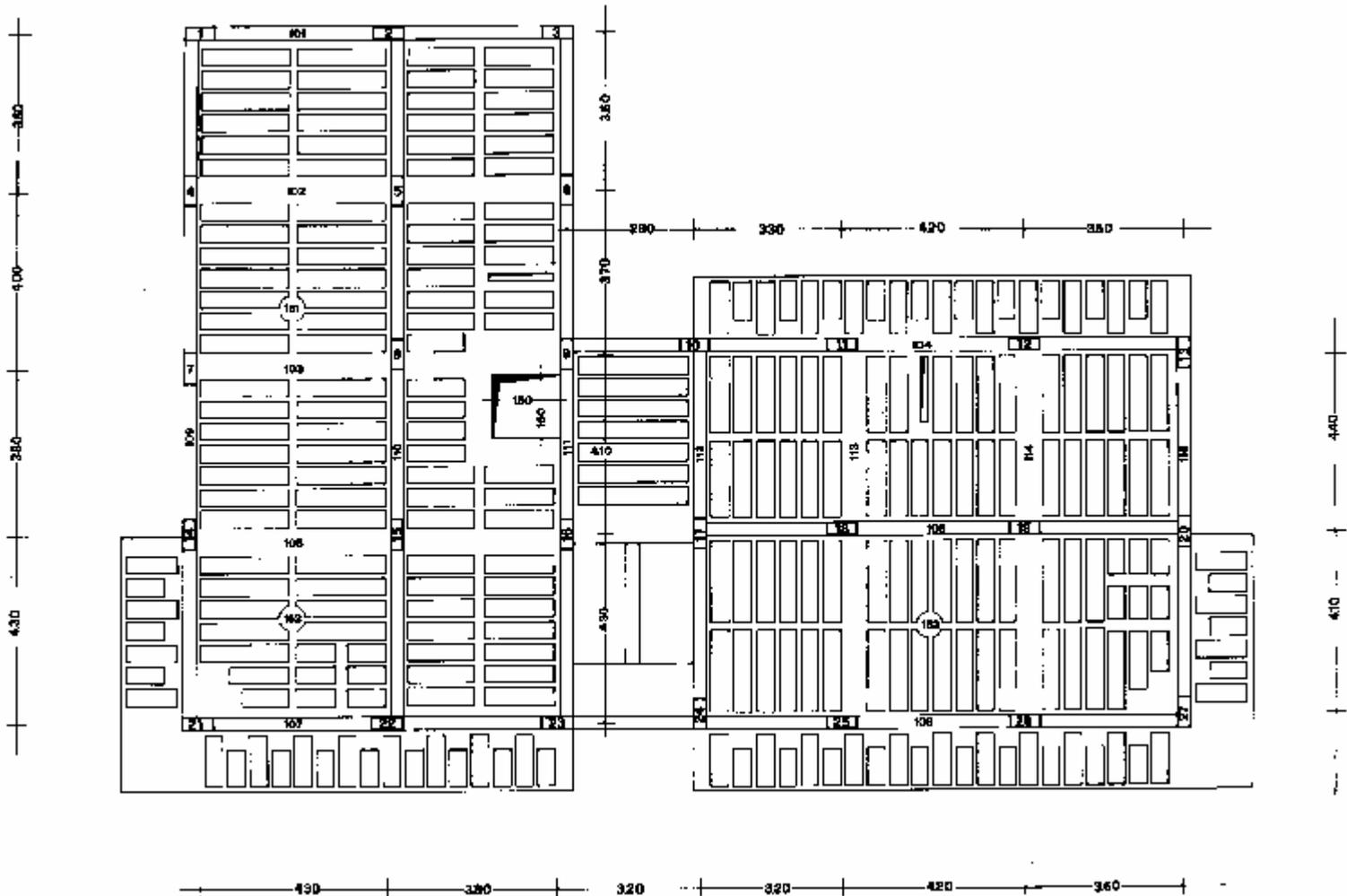
Aurelio Ghersi

Validazione del calcolo strutturale

1. Sono in grado di prevedere il comportamento della struttura?
Cosa mi aspetto?
2. Riesco a capire dai risultati quale comportamento mi indicano per la struttura?
Il comportamento mostrato dai calcoli corrisponde a quello che mi aspetto?
3. Il comportamento della struttura è ottimale o può essere migliorato?

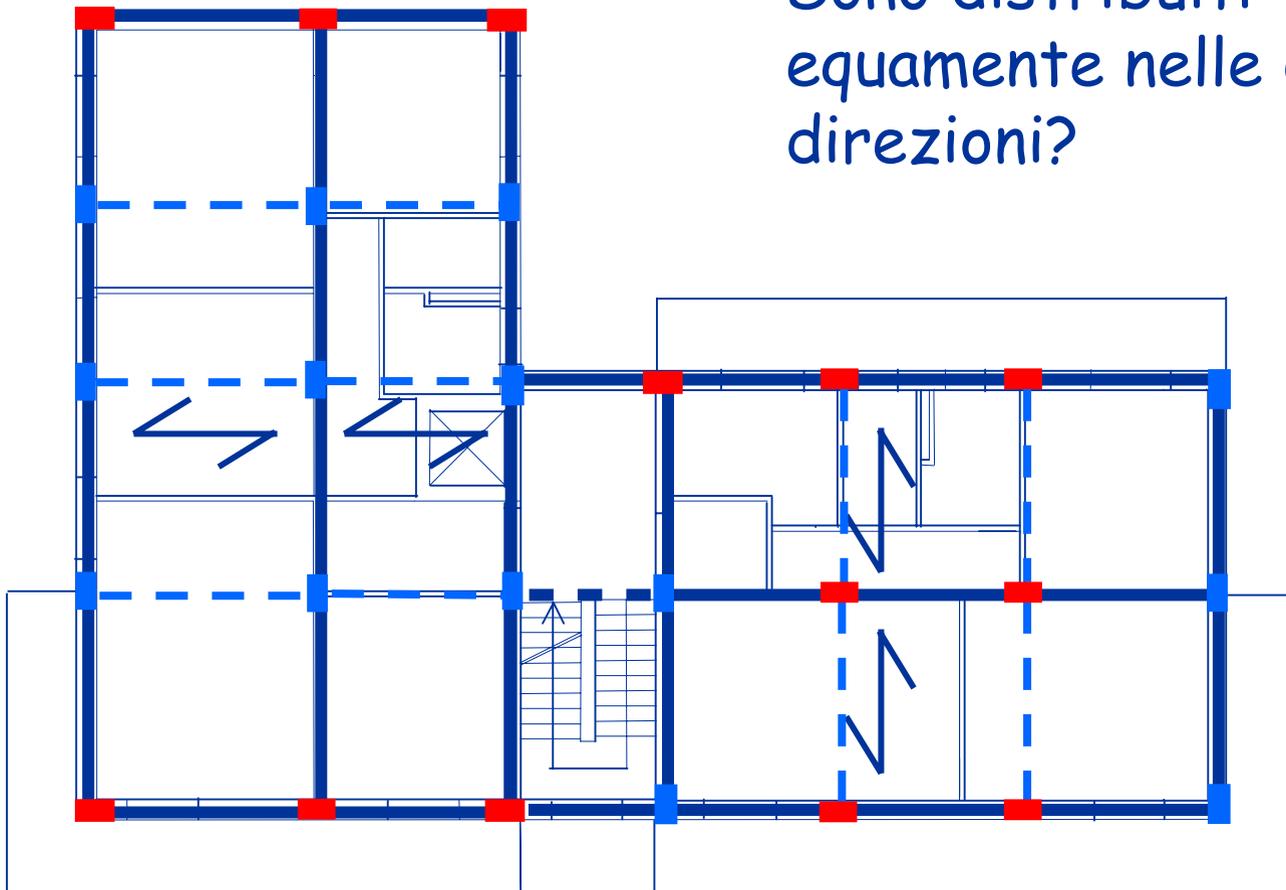
Prevedere il comportamento
della struttura
(per azioni sismiche)

Esempio: carpenteria



Elementi resistenti in ciascuna direzione

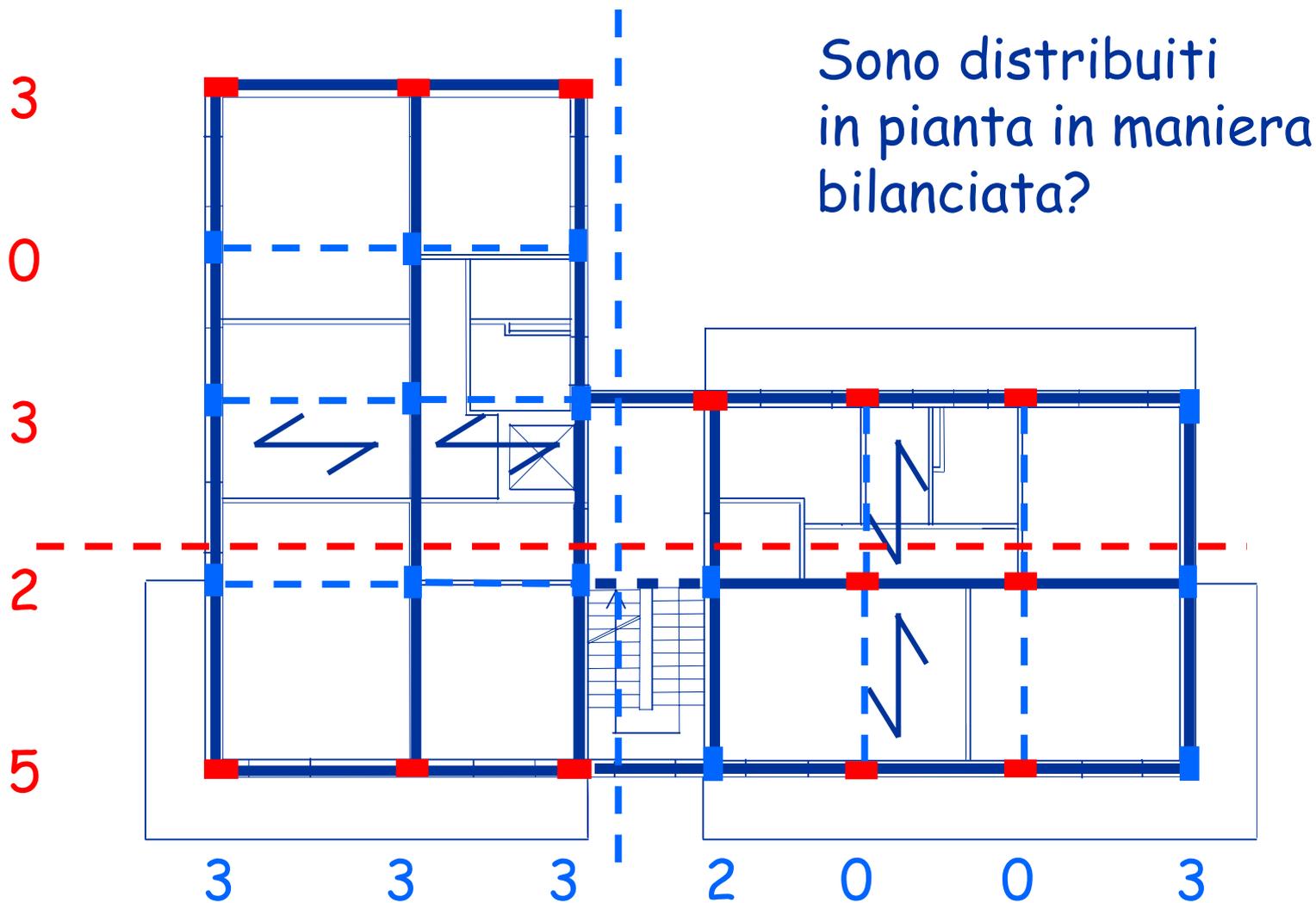
Sono distribuiti
equamente nelle due
direzioni?



13

14

Distribuzione planimetrica degli elementi resistenti



Sono distribuiti in pianta in maniera bilanciata?

Il lato destro è meno rigido?

Stima dell'effetto del sisma

1 - masse

Impalcato	Superficie m ²	Incidenza kN/m ²	Peso kN
Torrino + V	379.9	9.0	3419
IV, III, II	323.5	10.0	3235
I	263.2	10.0	2632

Peso totale = 15756 kN

Stima dell'effetto del sisma

2 - ordinata spettrale

Dipende dal periodo

Si può assumere $T_1 = C_1 H^{3/4}$

con

$$C_1 = 0.075$$

per strutture intelaiate in c.a.

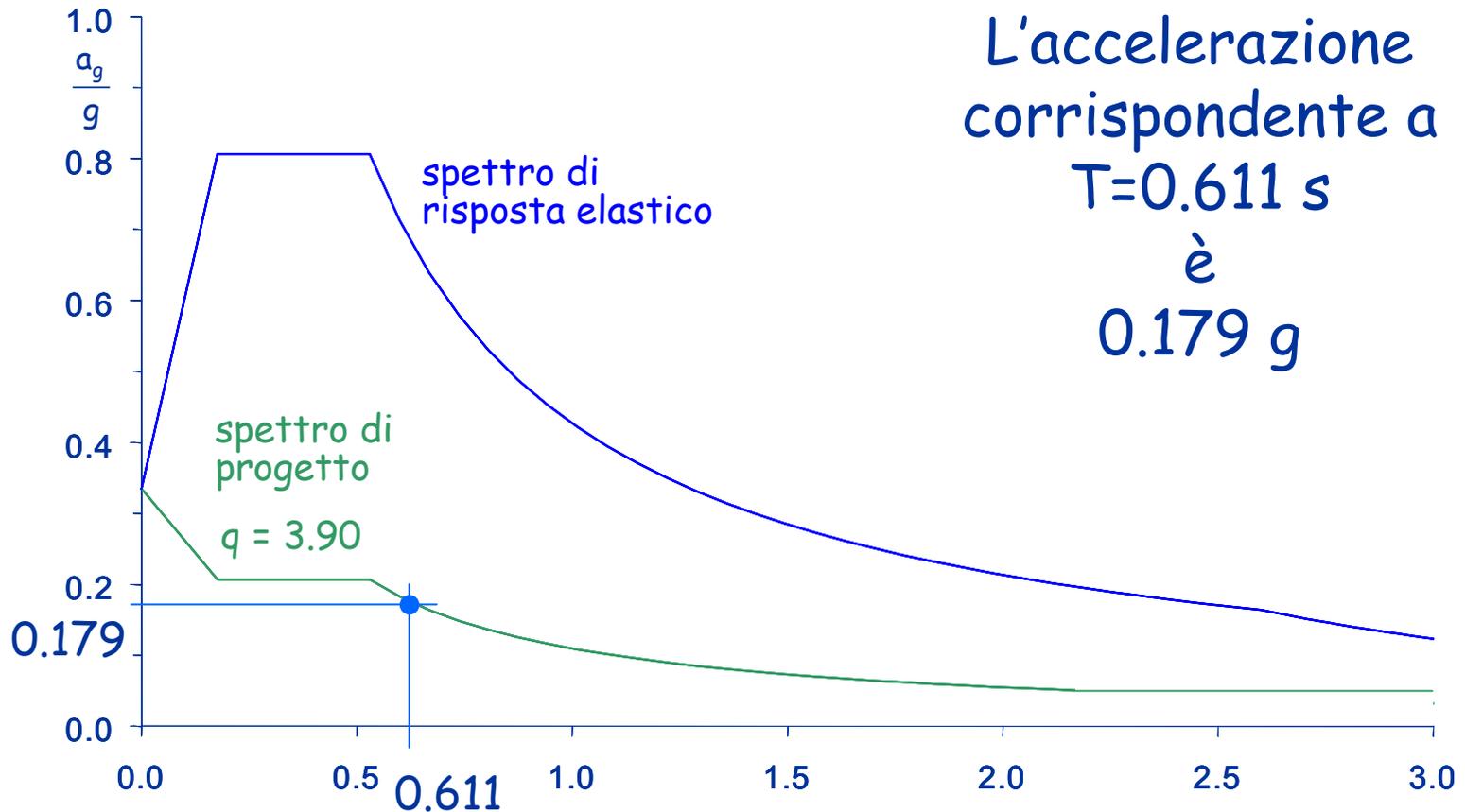
H = altezza dell'edificio dal
piano di fondazione (m)

Nell'esempio:

$$H = 16.40 \text{ m} \quad (\text{escluso torrino})$$

$$T_1 = 0.075 \times 16.40^{3/4} = 0.611 \text{ s}$$

Stima dell'effetto del sisma 2 - ordinata spettrale



Stima dell'effetto del sisma 3 - forze per analisi statica

Taglio alla base $V_b = 0.85 \sum_{i=1}^n m_i S_d(T_1) =$
 $= 0.85 \times 15756 \times 0.179 = 2397.3 \text{ kN}$

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

Stima dell'effetto del sisma 3 - forze per analisi statica

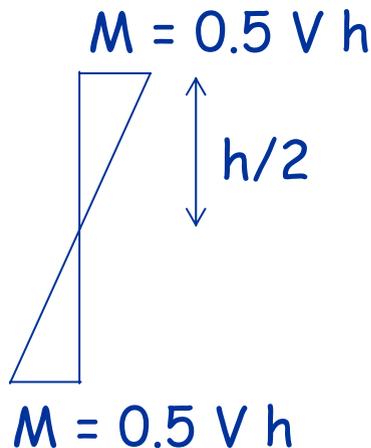
Piano	Peso W (kN)	Quota z (m)	Wz (kNm)	Forza F (kN)	Taglio V (kN)
5+torrino	3419	16.40	56072	826.7	826.7
4	3235	13.20	42702	629.6	1456.3
3	3235	10.00	32350	477.0	1933.3
2	3235	6.80	21998	324.3	2257.6
1	2632	3.60	9475	139.7	2397.3
somma	15756		162597		

Stima dell'effetto del sisma

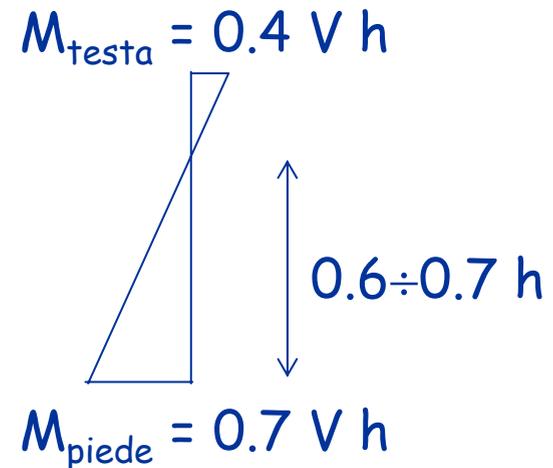
4 - caratteristiche della sollecitazione

- Ripartire il taglio di piano tra i pilastri "che contano" (pilastri allungati nella direzione del sisma e collegati con una trave emergente)
- Valutare il momento nei pilastri

ai piani superiori



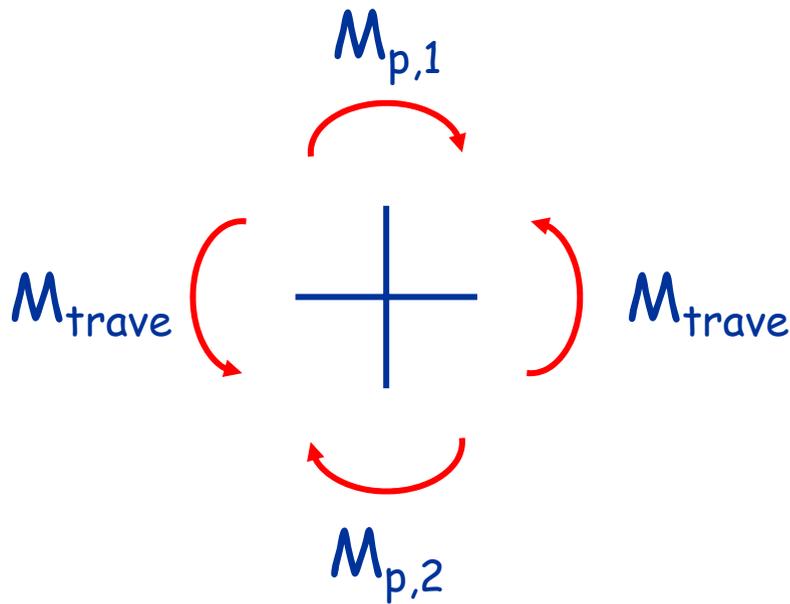
al primo ordine



Stima dell'effetto del sisma

4 - caratteristiche della sollecitazione

c. Valutare i momenti nelle travi



Per l'equilibrio:

$$M_{trave} = \frac{M_{p,1} + M_{p,2}}{2}$$

Stima dell'effetto del sisma

4 - caratteristiche della sollecitazione

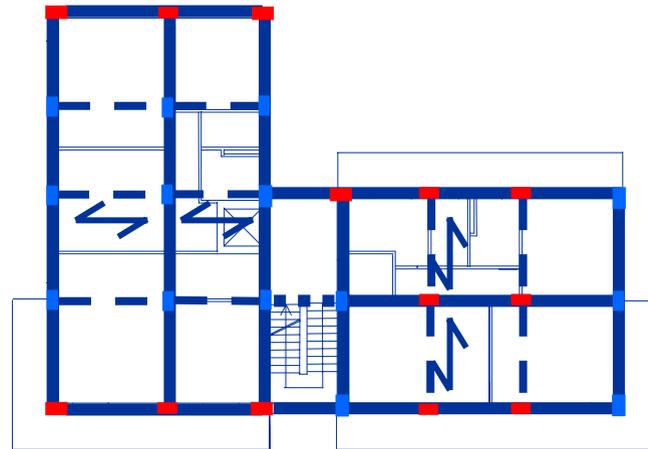
d. Incrementare i momenti per tenere conto dell'eccentricità accidentale

Se la struttura è sufficientemente rigida torsionalmente, incrementare del 20%

e. Incrementare i momenti nei pilastri per la gerarchia delle resistenze

Caratteristiche della sollecitazione a - ripartizione

Piano	Taglio globale (kN)
5	826.7
4	1456.3
3	1933.3
2	2257.6
1	2397.3



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

Ripartisco il taglio globale
tra 13 pilastri (direzione x)

Caratteristiche della sollecitazione a - ripartizione

Piano	Taglio globale (kN)	Taglio pilastro (kN)
5	826.7	63.6
4	1456.3	112.0
3	1933.3	148.7
2	2257.6	173.7
1	2397.3	184.4

Volendo, potrei ridurre il taglio di un 20%, per tener conto del contributo dei pilastri "deboli"

Caratteristiche della sollecitazione b - momento nei pilastri

Piano	Taglio globale (kN)	Taglio pilastro (kN)	Momento pilastro (kNm)
5	826.7	63.6	101.7
4	1456.3	112.0	179.2
3	1933.3	148.7	237.9
2	2257.6	173.7	277.9
1 testa	2397.3	184.4	265.5
piede			464.7

$$M = V h / 2$$

$$M = V 0.4 h$$

$$M = V 0.7 h$$

Caratteristiche della sollecitazione c - momento nelle travi

Piano	Taglio globale (kN)	Taglio pilastro (kN)	Momento pilastro (kNm)	Momento trave (kNm)
5	826.7	63.6	101.7	50.9
4	1456.3	112.0	179.2	140.5
3	1933.3	148.7	237.9	208.6
2	2257.6	173.7	277.9	257.9
1 testa	2397.3	184.4	265.5	271.7
piede			464.7	

$$M_{+} = M_{p5}/2$$

$$M_{+} = (M_{p5} + M_{p4})/2$$

Caratteristiche della sollecitazione d - incremento per eccentricità

Piano	Taglio globale (kN)	Taglio pilastro (kN)	Momento pilastro (kNm)	Momento trave (kNm)
5	826.7	63.6	101.7	50.9
4	1456.3	112.0	179.2	140.5
3	1933.3	148.7	237.9	208.6
2	2257.6	173.7	277.9	257.9
1 testa	2397.3	184.4	265.5	271.7
piede			464.7	

Caratteristiche della sollecitazione d - incremento per eccentricità

Piano	Taglio globale (kN)	Taglio pilastro (kN)	Momento pilastro (kNm)	Momento trave (kNm)
5	826.7	63.6	122.1	50.9
4	1456.3	112.0	215.1	140.5
3	1933.3	148.7	285.5	208.6
2	2257.6	173.7	333.4	257.9
1 testa	2397.3	184.4	318.7	271.7
piede			557.6	

+20%

Caratteristiche della sollecitazione d - incremento per eccentricità

Piano	Taglio globale (kN)	Taglio pilastro (kN)	Momento pilastro (kNm)	Momento trave (kNm)
5	826.7	63.6	122.1	61.0
4	1456.3	112.0	215.1	168.6
3	1933.3	148.7	285.5	250.3
2	2257.6	173.7	333.4	309.5
1 testa	2397.3	184.4	318.7	326.0
piede			557.6	

+20%

Caratteristiche della sollecitazione e - gerarchia delle resistenze

Piano	Taglio globale (kN)	Taglio pilastro (kN)	Momento pilastro (kNm)	Momento trave (kNm)
5	826.7	63.6	122.1	61.0
4	1456.3	112.0	215.1	168.6
3	1933.3	148.7	285.5	250.3
2	2257.6	173.7	333.4	309.5
1 testa	2397.3	184.4	318.7	326.0
piede			557.6	

Questi valori andrebbero incrementati un po' per garantire un meccanismo di collasso globale

Le NTC 08 (punto 7.2.1) impongono gerarchia delle resistenze anche per CD "B", con sovraresistenza 1.1 (mentre è 1.3 per CD "A")

Giudicare il comportamento
della struttura
dai risultati del calcolo

Organizzazione del calcolo

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 che in passato

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
				$- e_x$	2
			$- 0.3 E_y$	$+ e_x$	3
				$- e_x$	4
		$- e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	5
				$- e_x$	6
			$- 0.3 E_y$	$+ e_x$	7
				$- e_x$	8
	-	$+ e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	9
				$- e_x$	10
			$- 0.3 E_y$	$+ e_x$	11
				$- e_x$	12
		$- e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	13
				$- e_x$	14
			$- 0.3 E_y$	$+ e_x$	15
				$- e_x$	16
E_y	+	$+ e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	17
				$- e_y$	18
			$- 0.3 E_x$	$+ e_y$	19
				$- e_y$	20
		$- e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	21
				$- e_y$	22
			$- 0.3 E_x$	$+ e_y$	23
				$- e_y$	24
	-	$+ e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	25
				$- e_y$	26
			$- 0.3 E_x$	$+ e_y$	27
				$- e_y$	28
		$- e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	29
				$- e_y$	30
			$- 0.3 E_x$	$+ e_y$	31
				$- e_y$	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 modale e statica

Discutere poi:

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

Carichi verticali

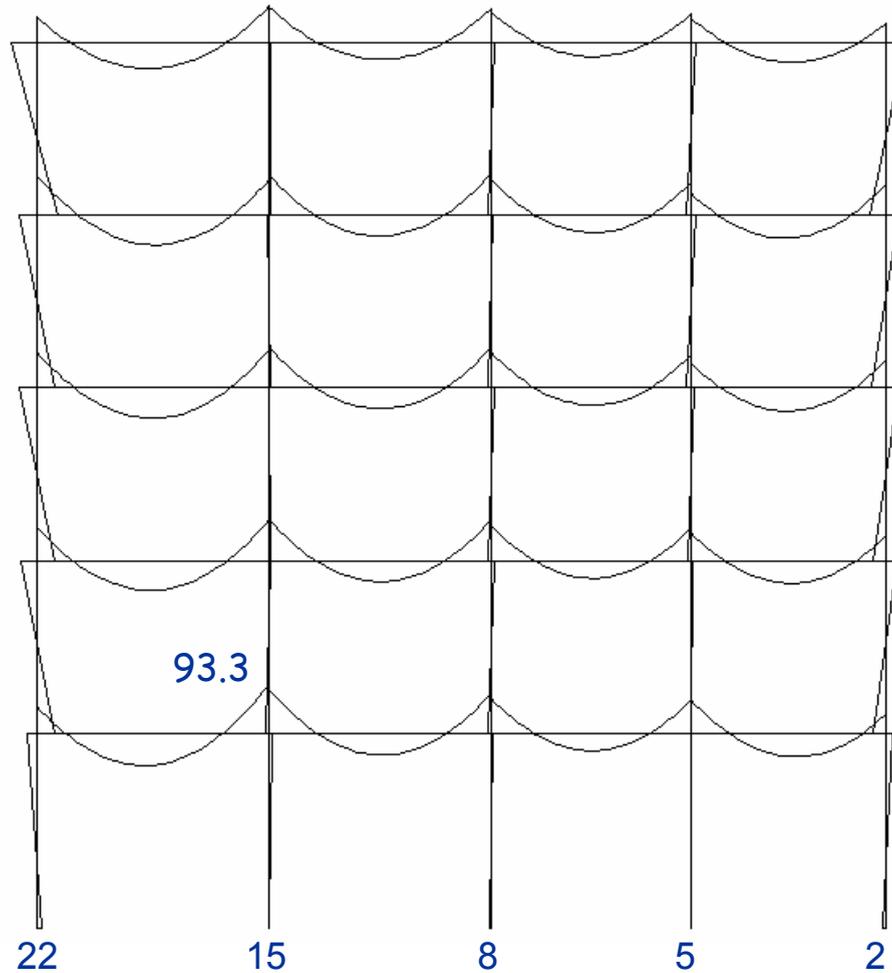


Diagramma del momento flettente - telaio 2 y,
schema di carico 1 (carichi verticali in assenza di sisma)

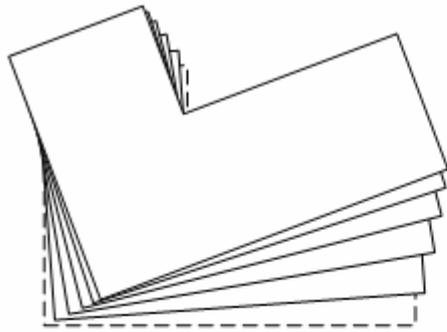
Analisi modale

- 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?

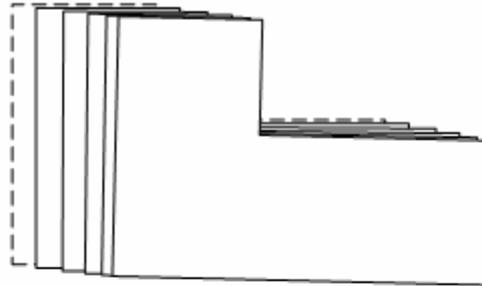
Analisi modale

- 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?

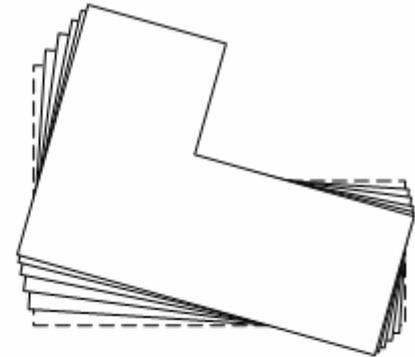
Deformate modali



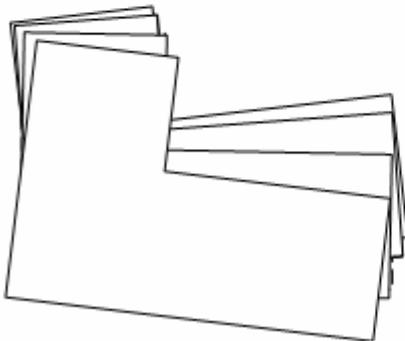
Modo 1



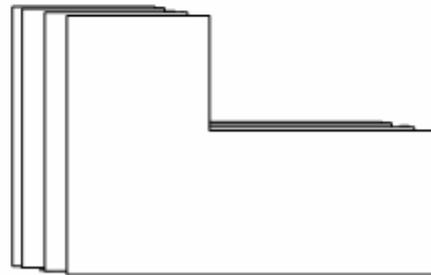
Modo 2



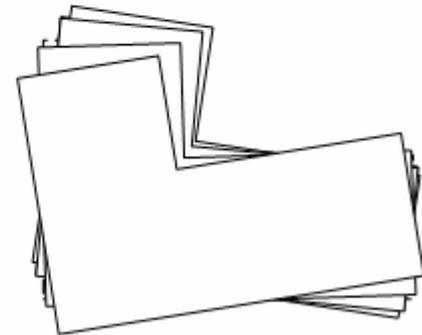
Modo 3



Modo 4



Modo 5



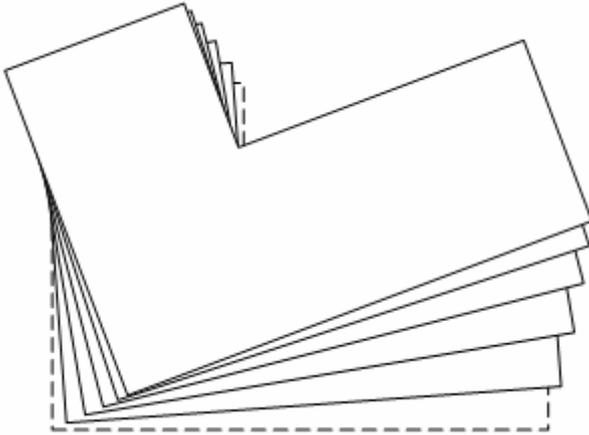
Modo 6

Periodi e masse partecipanti

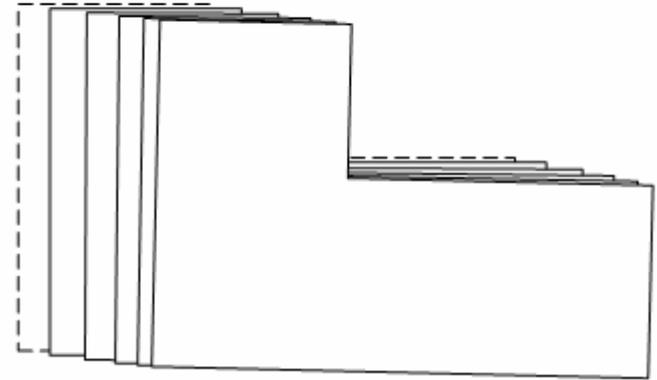
Modo	Periodo T [s]	Massa partecipante x [%]	Massa partecipante y [%]
1	0.582	1.75	60.88
2	0.553	84.00	1.96
3	0.463	0.28	23.03
4	0.183	0.32	6.93
5	0.177	8.95	0.40
6	0.148	0.07	2.15
7	0.099	0.92	1.60
8	0.098	2.01	0.95
9	0.082	0.06	0.49
10	0.066	1.09	0.09
11	0.064	0.14	1.07
12	0.055	0.06	0.12

Deformate modali

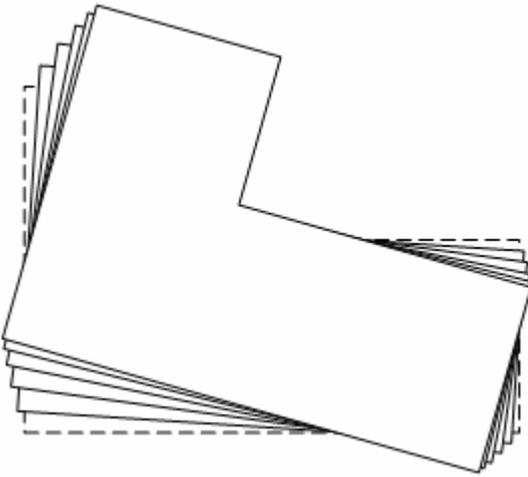
Modo 1 $T = 0.582 \text{ s}$



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



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

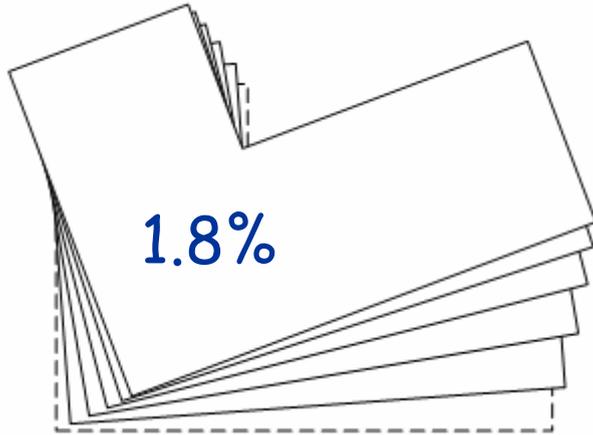


Il modo 2 è sostanzialmente di traslazione secondo x

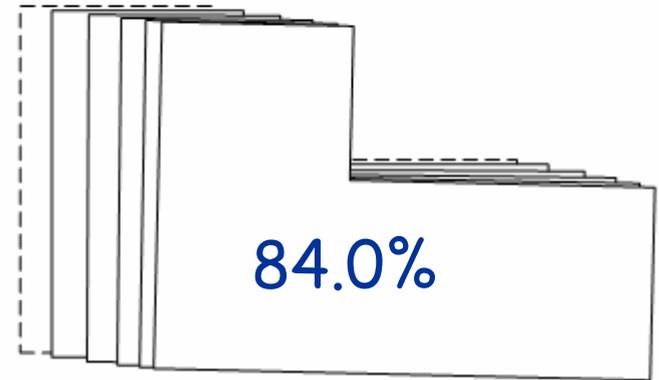
I modi 1 e 3 sono accoppiati (traslazione secondo y e rotazione)

Masse partecipanti, sisma x

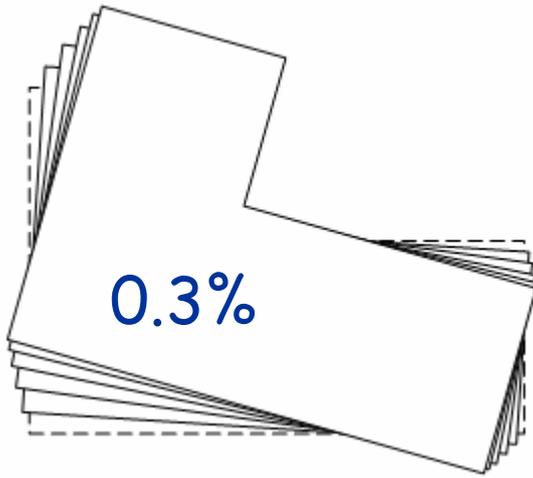
Modo 1 $T = 0.582 \text{ s}$



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



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

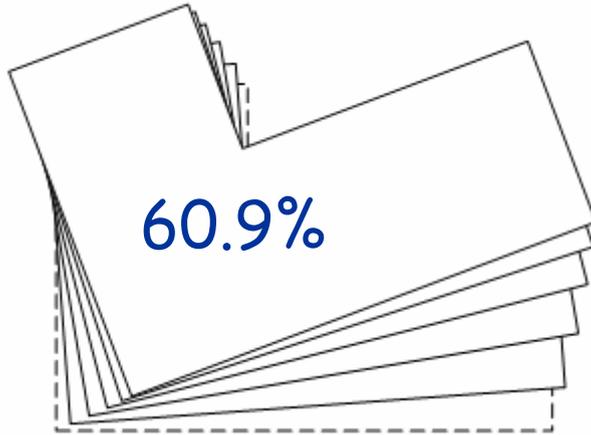


Il modo 2 dà il contributo massimo

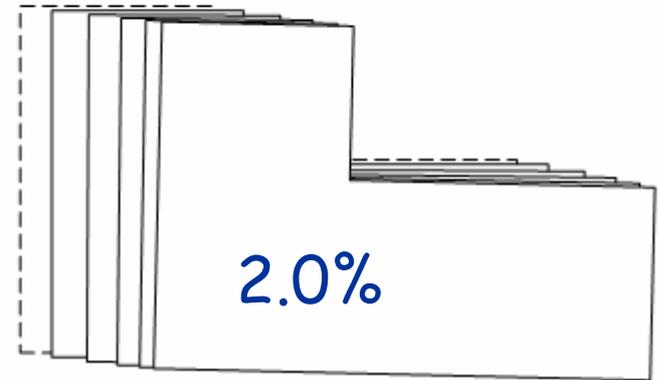
Il modo 5, di traslazione x con spostamenti nei due versi, dà un ulteriore contributo (8.9%)

Masse partecipanti, sisma y

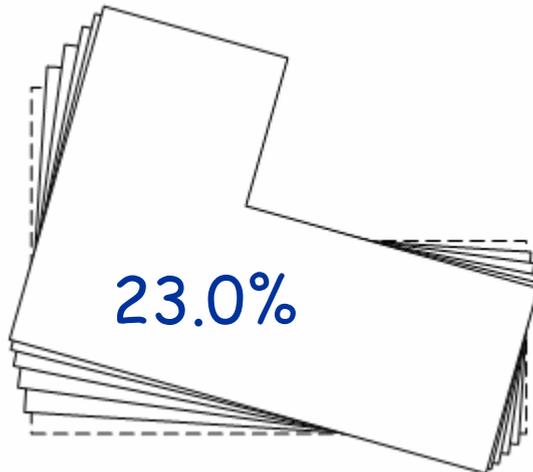
Modo 1 $T = 0.582 \text{ s}$



Modo 1 $T = 0.553 \text{ s}$



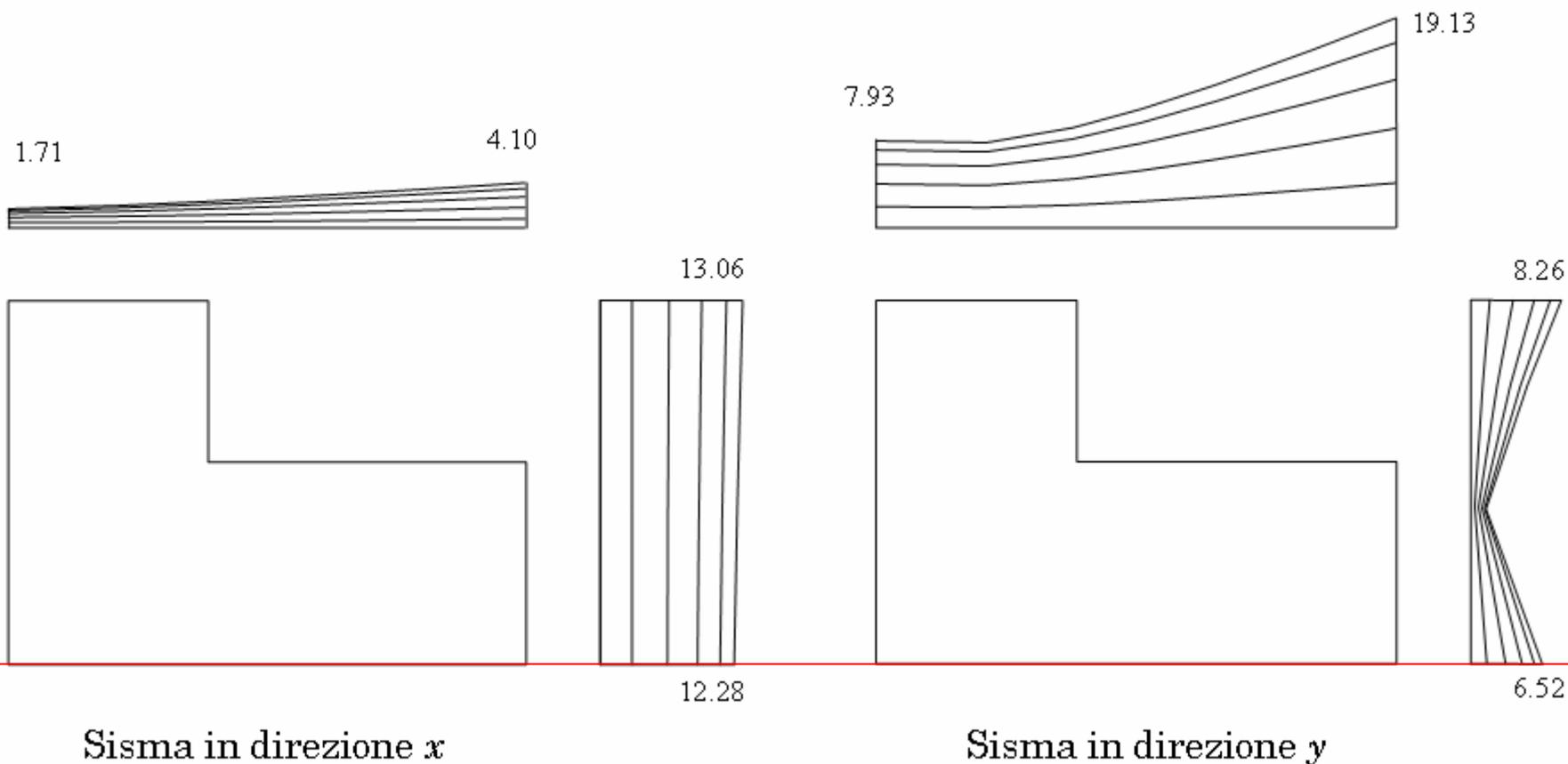
Modo 3 $T = 0.463 \text{ s}$



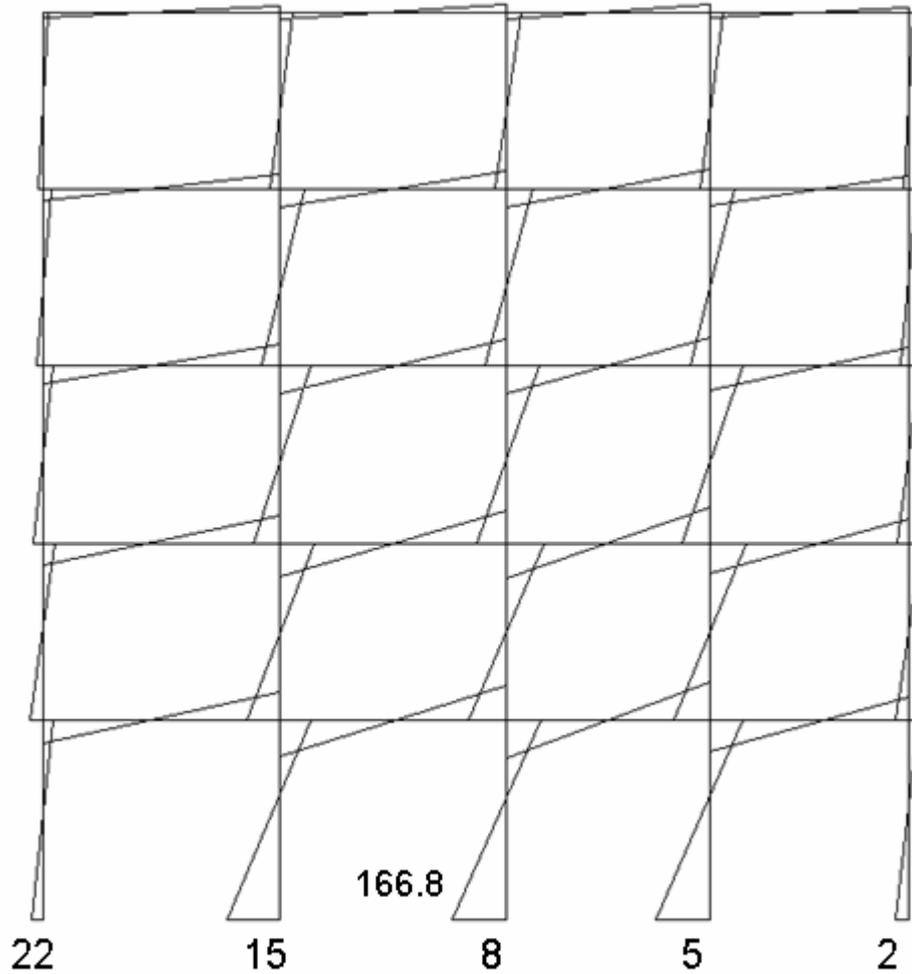
Il modo 1 e 3 danno il contributo massimo

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

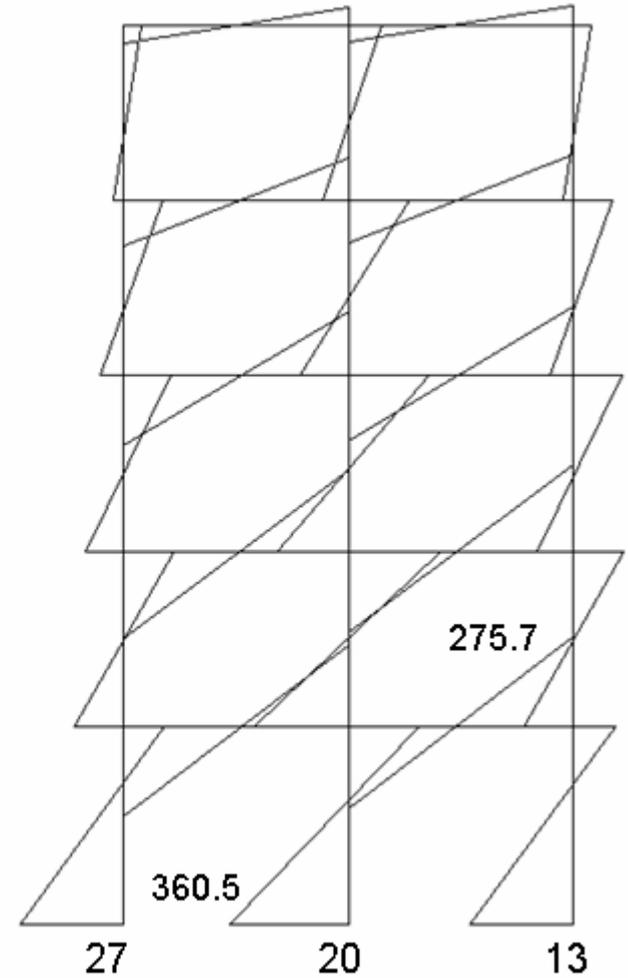
Spostamenti, inviluppo modale



Momenti flettenti

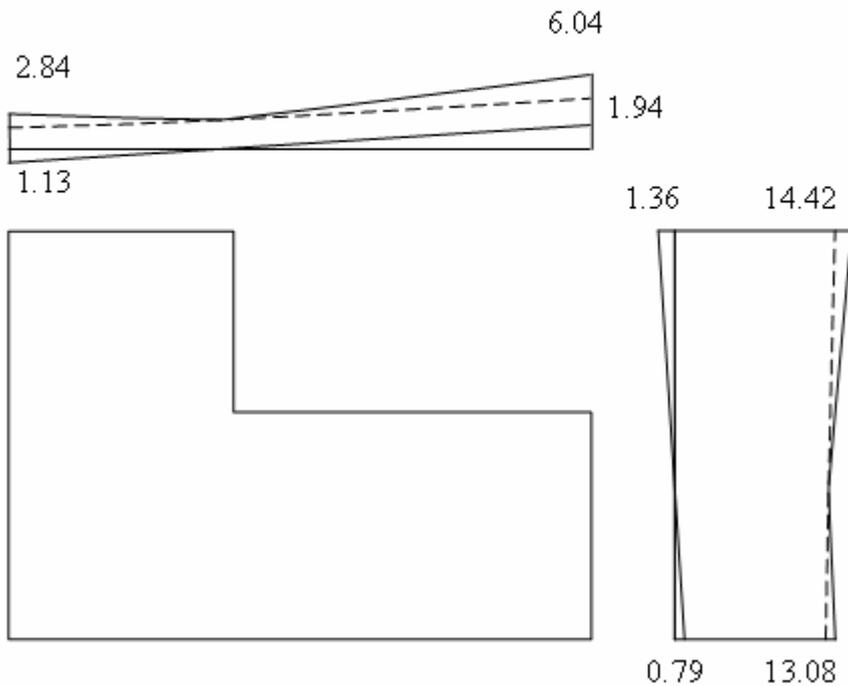


Telaio 2 y

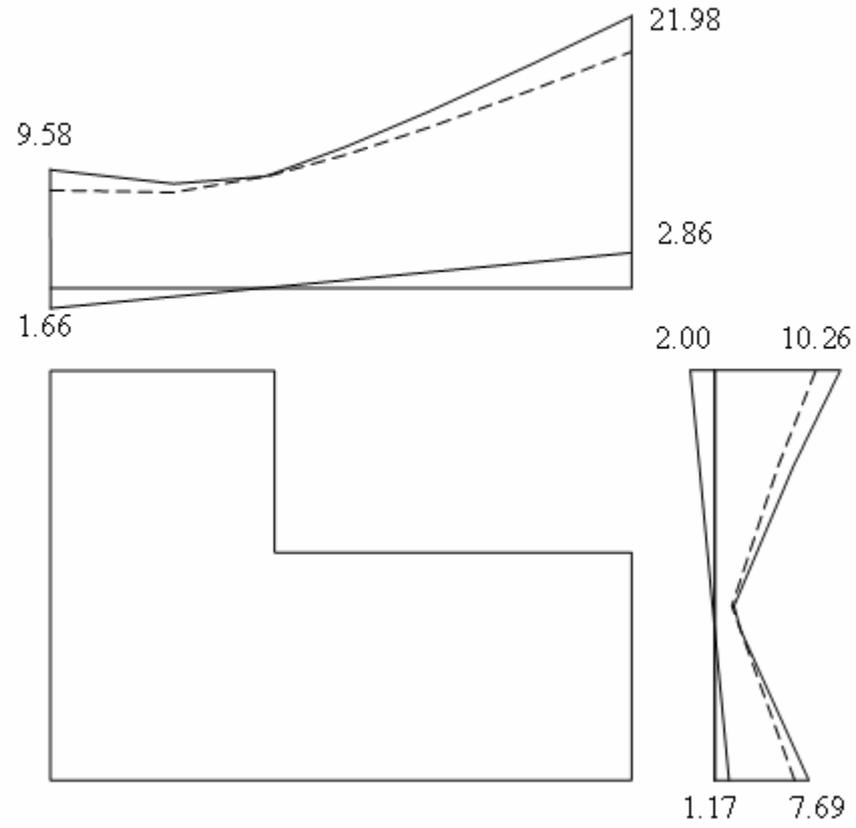


Telaio 7 y

Effetto dell'eccentricità accidentale

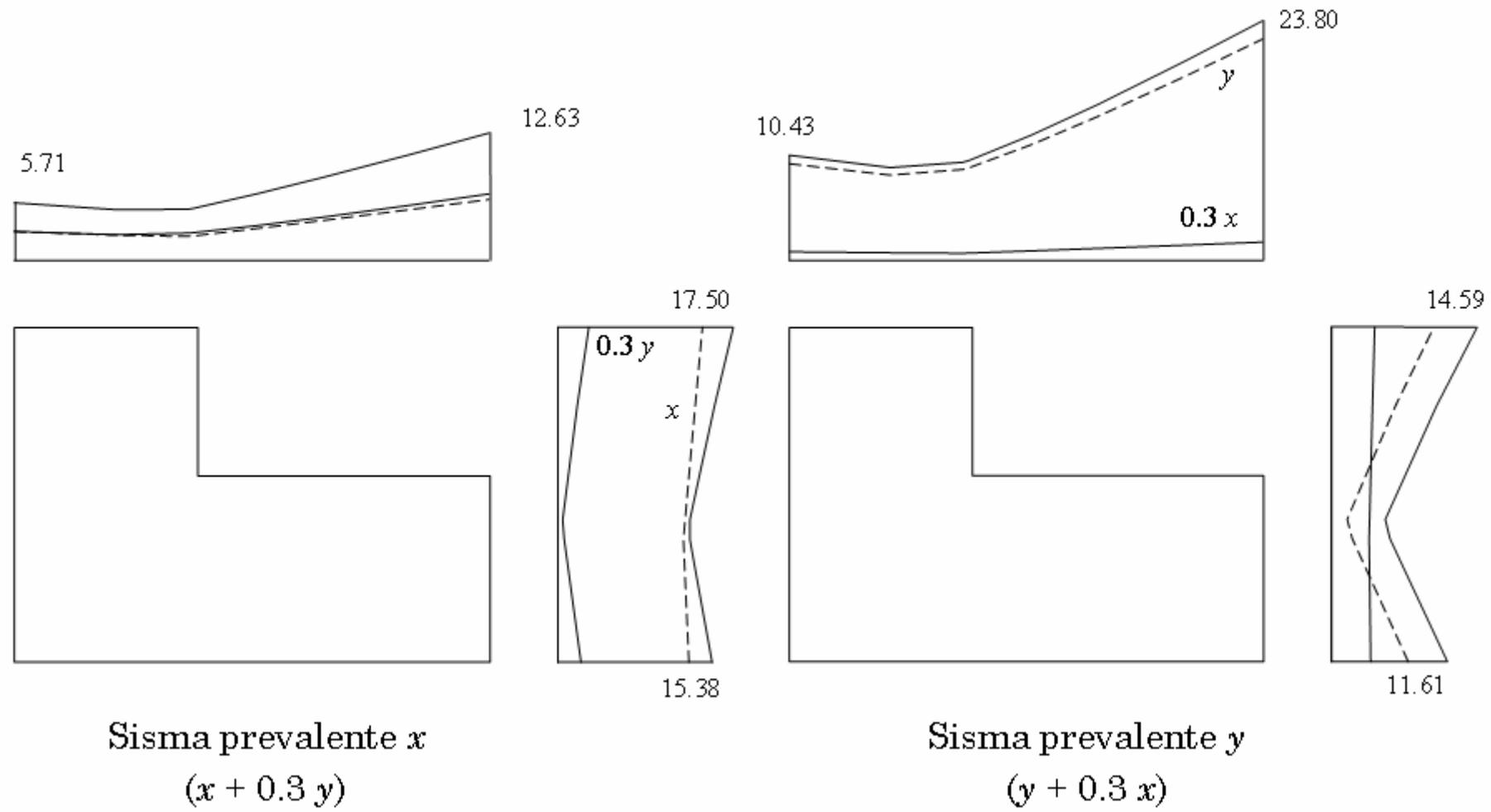


Sisma in direzione x



Sisma in direzione y

Effetto contemporaneo delle due componenti

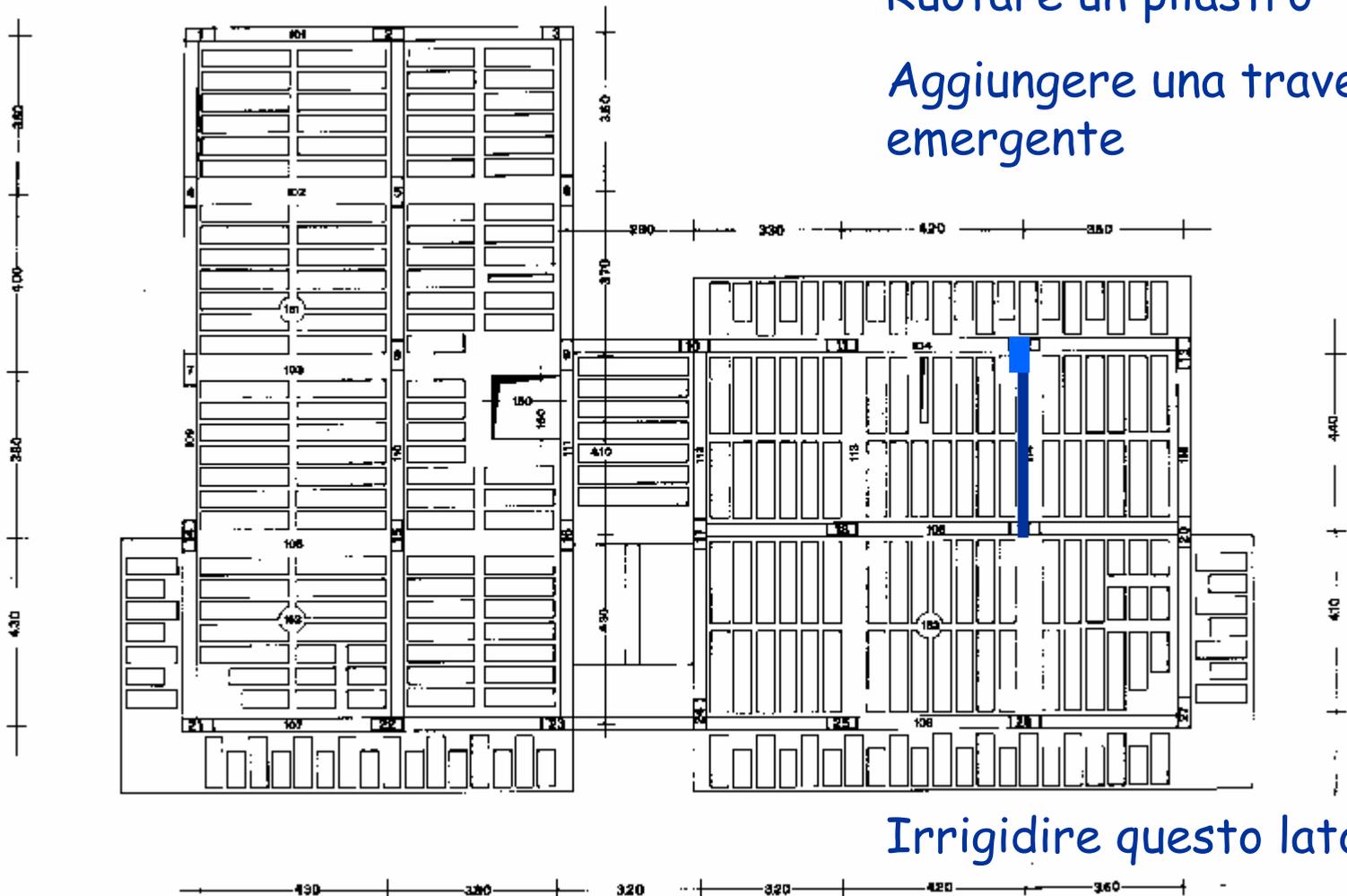


Migliorare il comportamento
della struttura

Interventi sulla carpenteria

Ruotare un pilastro

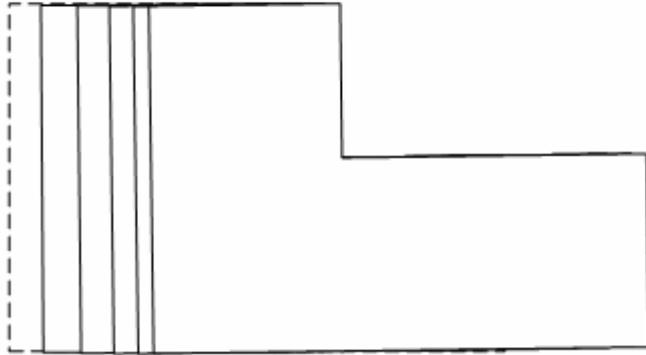
Aggiungere una trave emergente



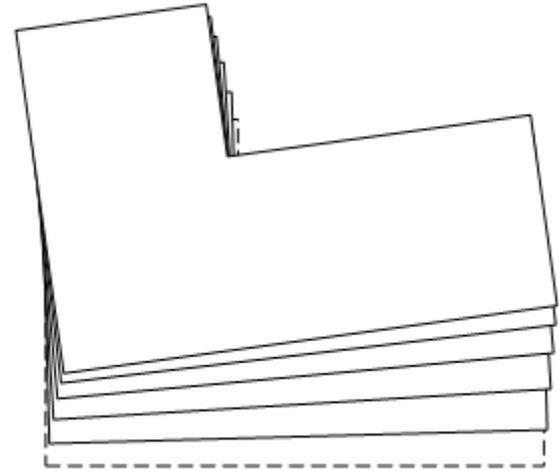
Irrigidire questo lato

Deformate modali

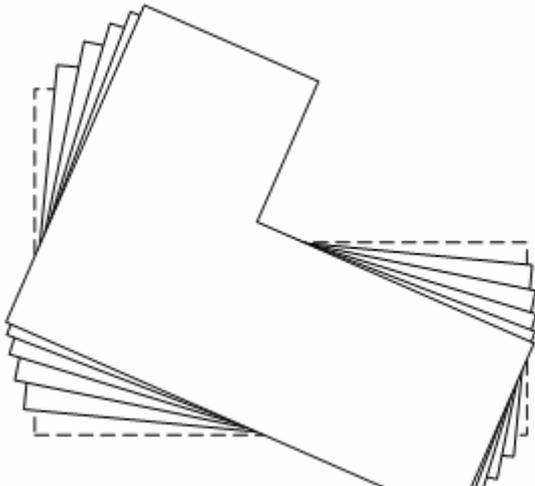
Modo 1 $T = 0.567 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.516 \text{ s}$

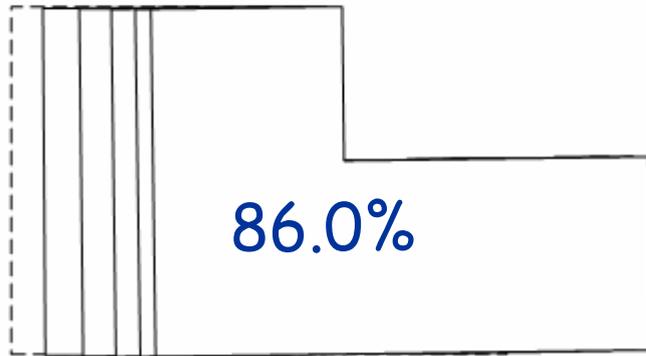


Modo 3 $T = 0.449 \text{ s}$

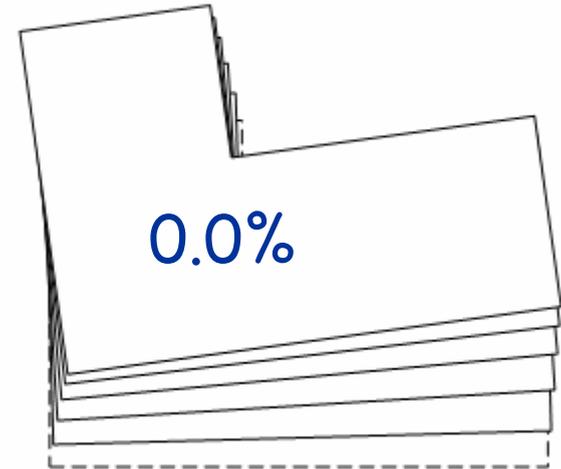


Masse partecipanti, sisma x

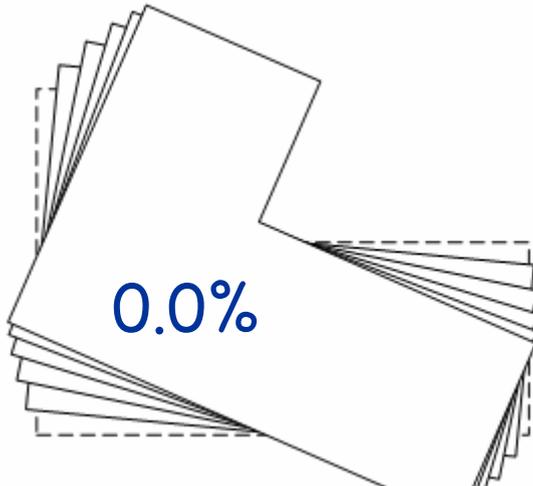
Modo 1 $T = 0.567 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.516 \text{ s}$

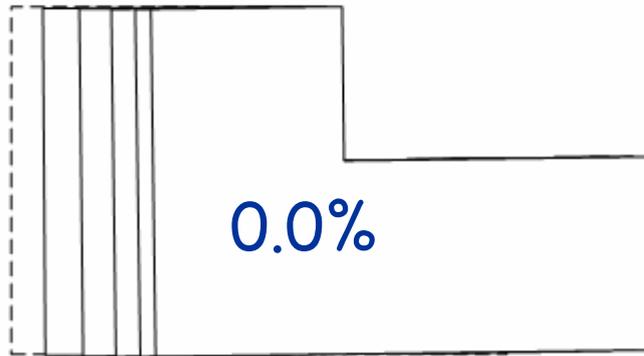


Modo 3 $T = 0.449 \text{ s}$

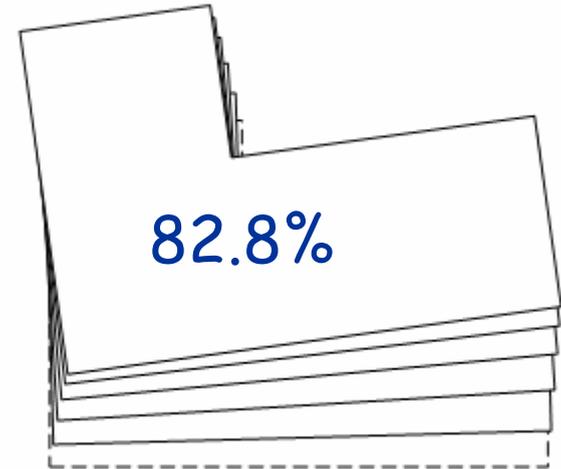


Masse partecipanti, sisma y

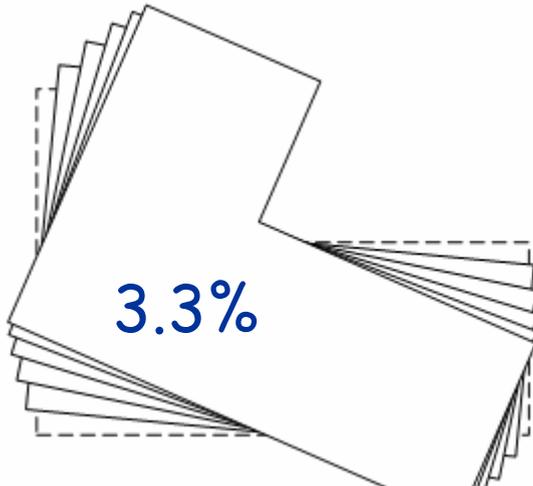
Modo 1 $T = 0.567 \text{ s}$



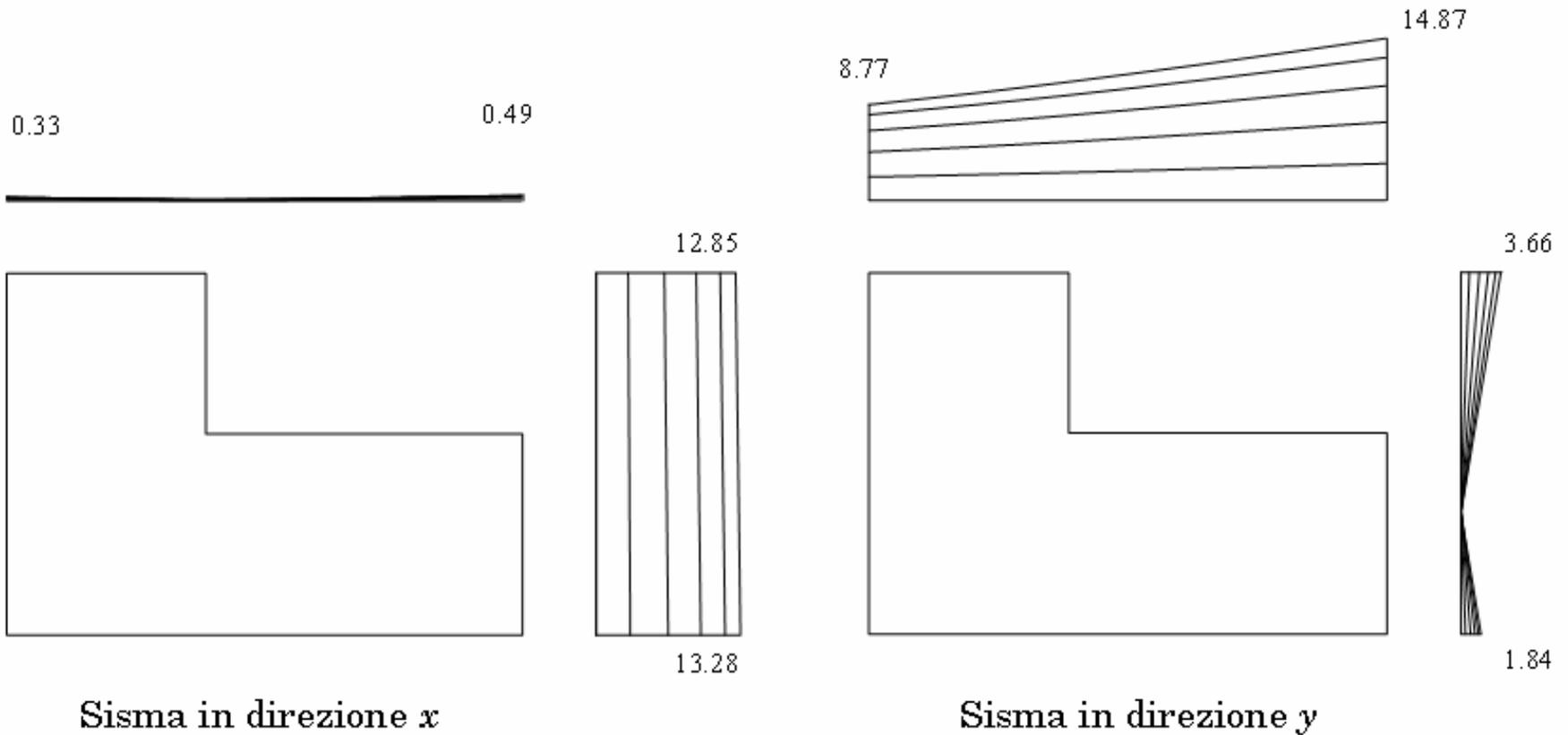
Modo 2 $T = 0.516 \text{ s}$



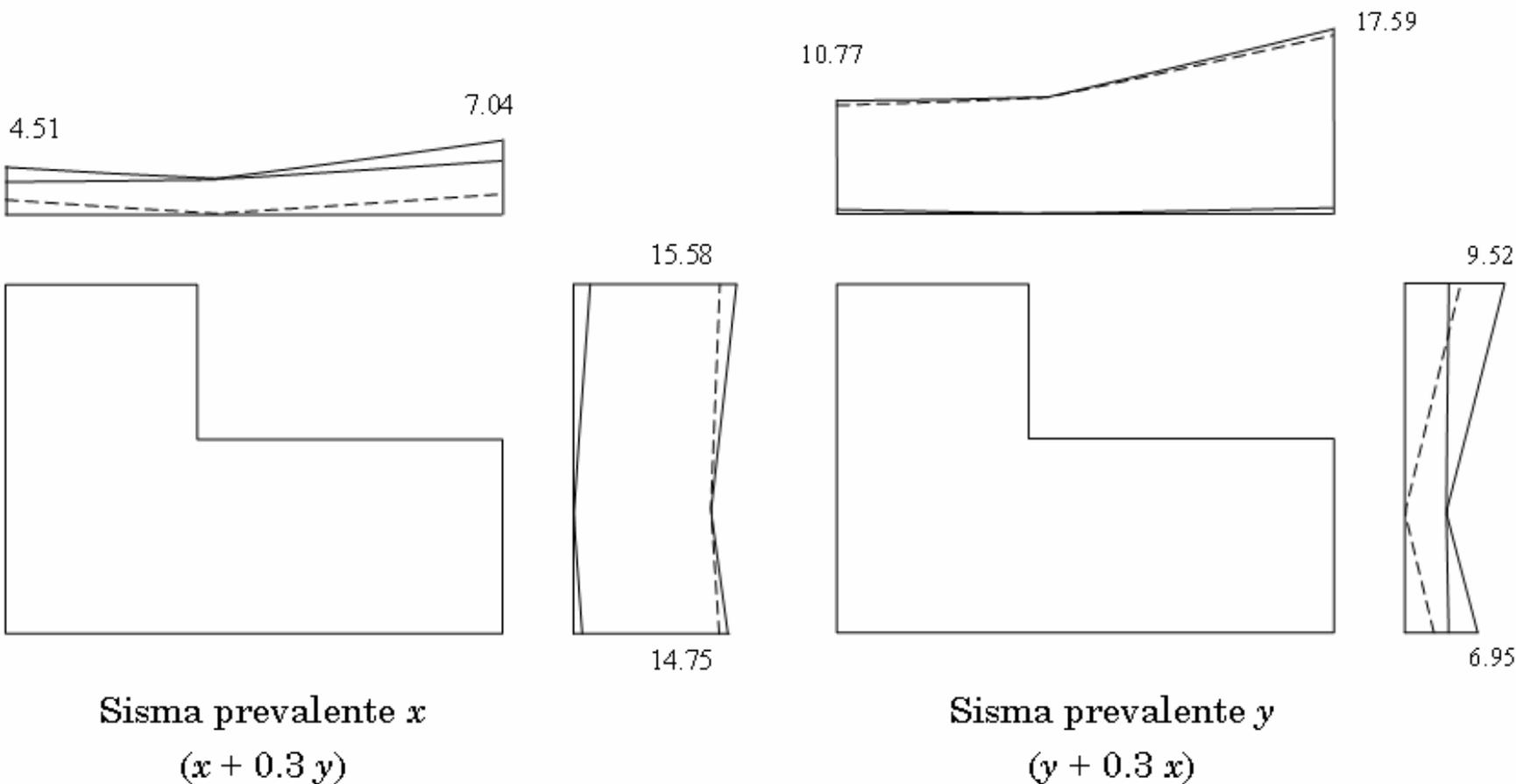
Modo 3 $T = 0.449 \text{ s}$



Spostamenti, inviluppo modale



Effetto contemporaneo delle due componenti



Interventi sulla carpenteria



Effetto contemporaneo delle due componenti

