

## Impostazione e controllo del progetto di edifici antisismici un c.a.

secondo le indicazioni del capitolo 10 delle NTC08

Palermo  
30 settembre 2011

4 - Esame dei risultati del calcolo

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 ( $g_k+\psi_2 q_k$ )

NTC 08, punto 3.2.4

## 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

	$\psi_2$
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 $\leq 30$ 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 $\leq 1000$ 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

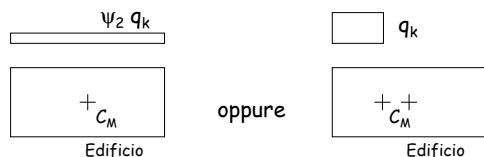
"Per tenere conto della variabilità spaziale del moto sismico, nonché di eventuali incertezze nella localizzazione delle masse, al centro di massa deve essere attribuita una eccentricità accidentale rispetto alla sua posizione quale deriva dal calcolo"

"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"

NTC08, punto 7.2.6

## Distribuzione effettiva delle masse

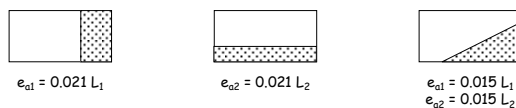
L'aliquota di carichi variabili presente in occasione del sisma potrebbe non essere uniformemente distribuita nell'edificio



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

## Eccentricità accidentale Perché il 5% ?

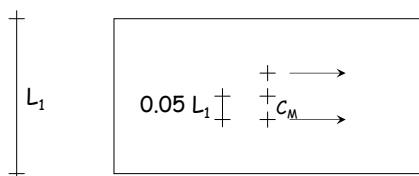
Se si applica il carico variabile massimo su un'area pari a  $\psi_2 \times$  area totale si ottiene un'eccentricità nettamente minore



Il valore 0.05 è maggiore, per tener conto di:

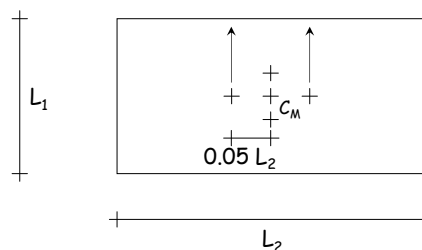
- amplificazione della rotazione per effetti dinamici
- rotazione per lo sfasamento dell'onda sismica da un estremo all'altro dell'edificio

## Eccentricità accidentale



NTC 08, punto 7.2.6

## Eccentricità accidentale



Aumentano, di molto, le combinazioni di carico

NTC 08, punto 7.2.6

## 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  $1 + 0.6 \frac{x}{L}$   $\times$  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:

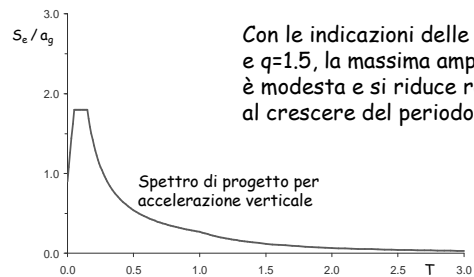
- Elementi con luce maggiore di 20 m
- Solai precompressi di luce superiore a 8 m
- Sbalzi di luce superiore a 4 m
- Elementi spingenti
- Pilastri in falso
- Edifici con piani sospesi

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

NTC 08, punto 7.2.1

### Componente verticale Considerazioni

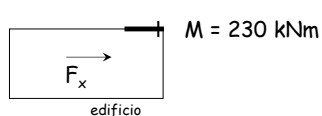
$$F_v = 1.35 F_o \sqrt{a_g / g}$$



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

### 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

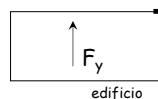
Stesso criterio, ma occorre tener conto della direzione del sisma prevalente



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

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

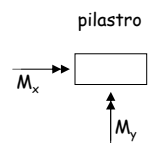
causato dalla rotazione



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

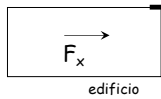
causato dalla rotazione

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



### Componenti orizzontali per i pilastri

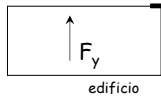
Stesso criterio,  
ma occorre tener conto  
della direzione del sisma prevalente



$M_y = 280 \text{ kNm}$   
 $M_x = 45 \text{ kNm}$   
causato dalla  
rotazione

Sisma prevalente  
in direzione x

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



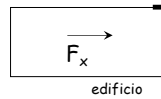
$M_y = 50 \text{ kNm}$   
causato dalla  
rotazione  
 $M_x = 105 \text{ kNm}$

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

Verifica a presso-  
flessione deviata

### Componenti orizzontali per i pilastri

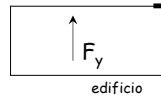
Stesso criterio,  
ma occorre tener conto  
della direzione del sisma prevalente



$M_y = 280 \text{ kNm}$   
 $M_x = 45 \text{ kNm}$   
causato dalla  
rotazione

Sisma prevalente  
in direzione y

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



$M_y = 50 \text{ kNm}$   
causato dalla  
rotazione  
 $M_x = 105 \text{ kNm}$

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

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
		$-e_y$	$+0.3 E_y$	$-e_x$	4
			$-0.3 E_y$	$-e_x$	5
			$-0.3 E_y$	$+e_x$	6
	-	$+e_y$	$+0.3 E_y$	$+e_x$	7
			$-0.3 E_y$	$-e_x$	8
			$+0.3 E_y$	$-e_x$	9
		$-e_y$	$+0.3 E_y$	$+e_x$	10
			$-0.3 E_y$	$-e_x$	11
			$+0.3 E_y$	$-e_x$	12
$E_y$	+	$+e_x$	$+0.3 E_x$	$+e_y$	13
			$-0.3 E_x$	$-e_y$	14
			$+0.3 E_x$	$-e_y$	15
		$-e_x$	$+0.3 E_x$	$+e_y$	16
			$-0.3 E_x$	$-e_y$	17
			$+0.3 E_x$	$-e_y$	18
	-	$+e_x$	$+0.3 E_x$	$+e_y$	19
			$-0.3 E_x$	$-e_y$	20
			$+0.3 E_x$	$-e_y$	21
		$-e_x$	$+0.3 E_x$	$+e_y$	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
		$-e_x$	$+0.3 E_x$	$+e_y$	27
			$-0.3 E_x$	$-e_y$	28
	-	$+e_x$	$+0.3 E_x$	$+e_y$	29
			$-0.3 E_x$	$-e_y$	30
		$-e_x$	$+0.3 E_x$	$+e_y$	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 inviluppo dei risultati di tutte le combinazioni di carico?

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

L'inviluppo 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)
- coppie (statiche) ⇐
5. eccentricità accidentale per forze in dir. x
  6. eccentricità accidentale per forze in dir. y

## 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:

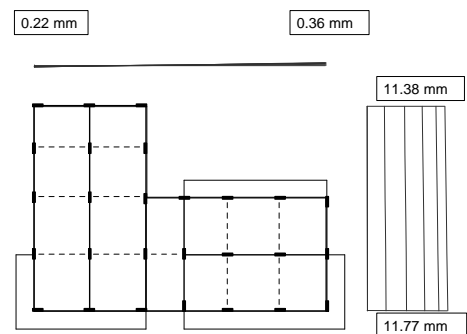
- effetto dell'eccentricità accidentale
- combinazione delle azioni nelle due direzioni

## Discussione dei risultati: sisma - analisi statica

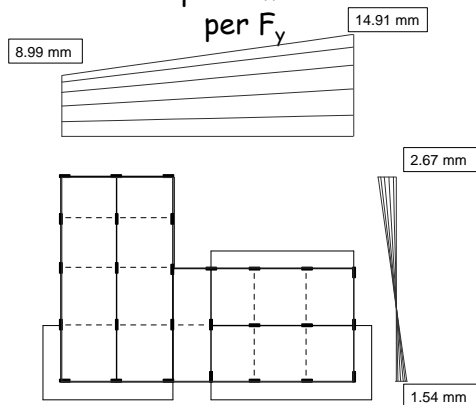
### Un mare di numeri. Come non perdersi? Analisi statica

- 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?

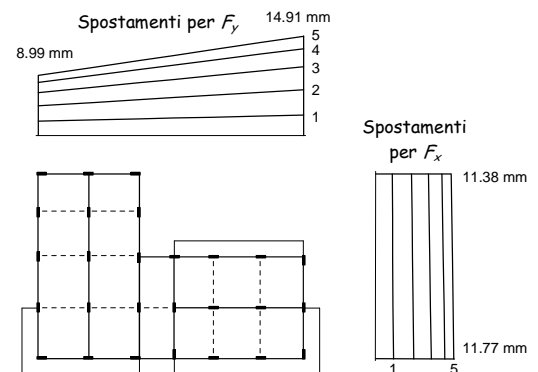
### Spostamenti per $F_x$



### Spostamenti per $F_y$



### Spostamenti

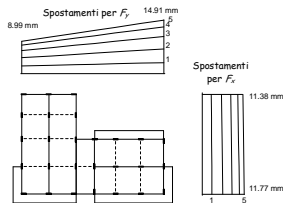


## Spostamenti classe di duttilità "A"

Rotazione non  
trascurabile per forze  
in direzione y



La parte destra  
andrebbe irrigidita



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)

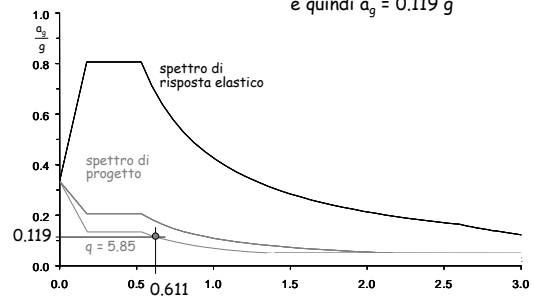
Piano	$m$ (kN s <sup>2</sup> /m)	$F_x$ (kN)	$u_x$ (mm)	$F_x u_x$ (kN m)	$m u_x^2$ (kN m s <sup>2</sup> )
Torrino+V	313.1	506.4	11.628	5888.2	42.34
IV	334.9	435.9	10.307	4492.7	35.58
III	334.9	330.2	8.292	2738.2	23.03
II	334.9	224.6	5.652	1269.2	10.70
I	297.2	105.5	2.646	279.2	2.08
somma				14667.4	113.72

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

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

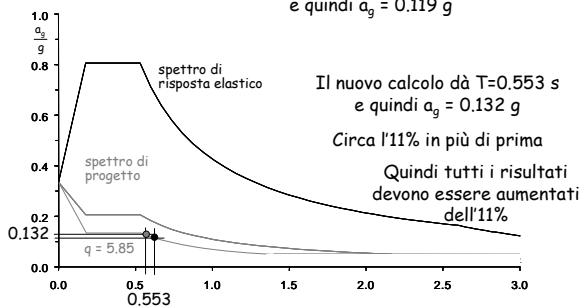
## Esempio - ordinata spettrale

Si era ipotizzato  $T=0.611 \text{ s}$   
e quindi  $a_g = 0.119 \text{ g}$



## Esempio - ordinata spettrale

Si era ipotizzato  $T=0.611 \text{ s}$   
e quindi  $a_g = 0.119 \text{ g}$



## 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 (includere campate di estremità)

I valori corrispondono bene alle previsioni

### Periodo proprio della struttura (direzione y)

Applicando la formula di Rayleigh

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

si trova

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

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

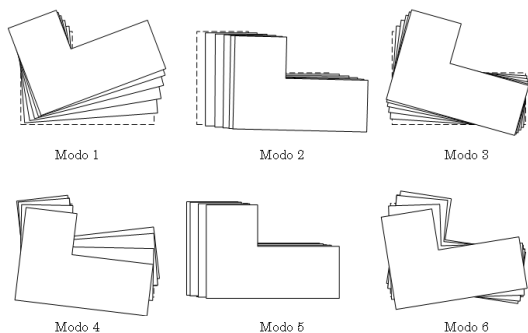
### Un mare di numeri. Come non perdersi? Analisi modale

- 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

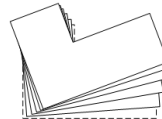
- Esaminare l'involuppo delle deformate modali, per le due direzioni del sisma
  - spostamenti analoghi nelle due direzioni o molto diversi?
  - solo traslazione, rotazione dell'impalcato modesta oppure forte?
- Esaminare i momenti massimi nei pilastri e nelle travi
  - rispettano le previsioni o no?

### Deformate modali

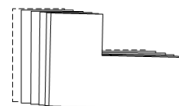


### Deformate modali

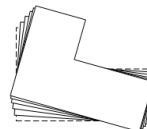
Modo 1  $T = 0.582$  s



Modo 2  $T = 0.553$  s



Modo 3  $T = 0.463$  s

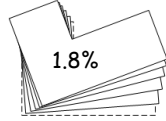


Il modo 2 è sostanzialmente di traslazione secondo x

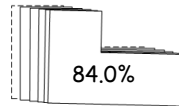
I modi 1 e 3 sono accoppiati (traslazione secondo y e rotazione)

### Masse partecipanti, sisma x

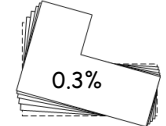
Modo 1  $T = 0.582 \text{ s}$



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



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

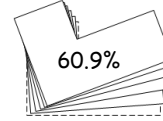


Il modo 2 dà il contributo massimo

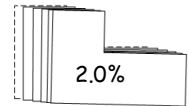
Il modo 5, di traslazione x con spostamenti nei due versi, dà un ulteriore contributo (8.9%)

### Masse partecipanti, sisma y

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



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



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

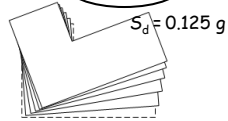


I modi 1 e 3 danno il contributo massimo

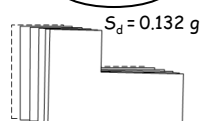
Il modo 4, di traslazione y e rotazione con spostamenti nei due versi, dà un ulteriore contributo (6.9%)

### Periodi dei modi predominanti

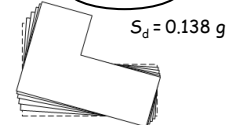
Modo 1  $T = 0.582 \text{ s}$



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



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

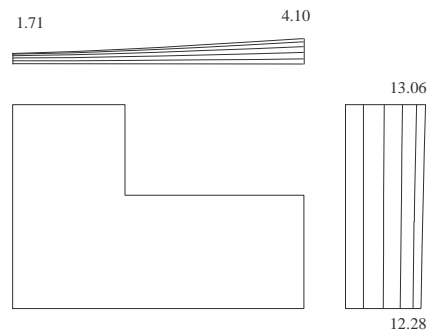


Periodi stimati: ~~0.641 s~~  
 $T_x = 0.553 \text{ s}$   $S_d = 0.132 \text{ g}$   
 $T_y = 0.552 \text{ s}$   $S_d = 0.132 \text{ g}$

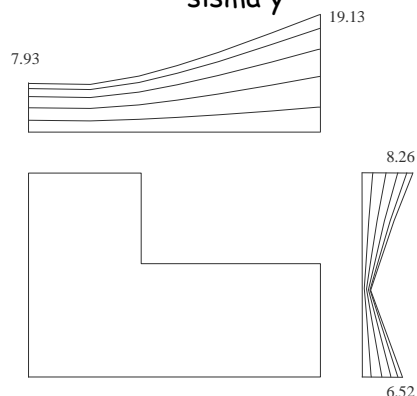
I periodi sono analoghi

Le ordinate spettrali sono quindi analoghe

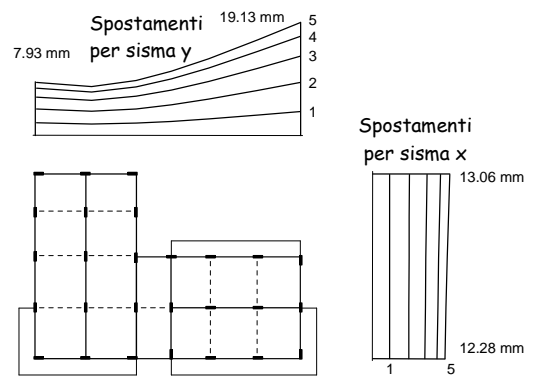
### Inviluppo modale sisma x



### Inviluppo modale sisma y



### Spostamenti, inviluppo modale

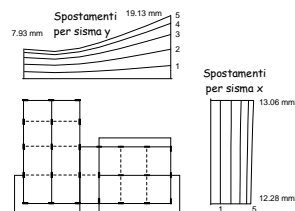


## Spostamenti, inviluppo modale

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



La parte destra andrebbe irrigidita

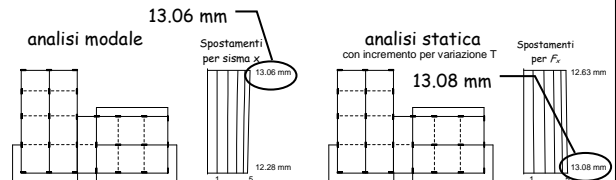


gli spostamenti massimi per sisma y sono maggiori di circa il 50% rispetto a quelli per sisma x

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

## Spostamenti confronto tra analisi modale e statica

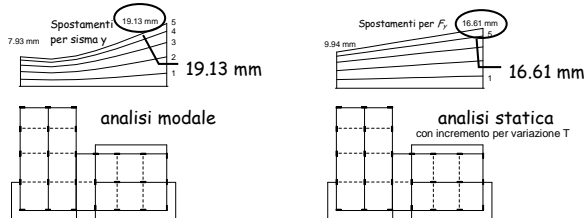
Sisma x: analisi modale - spostamenti uguali



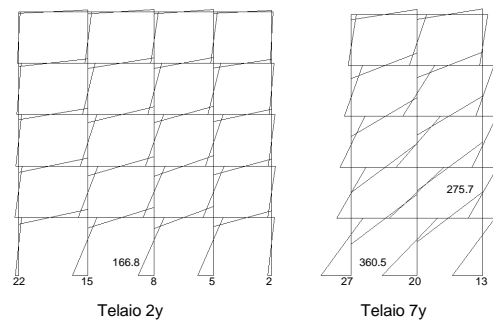
## Spostamenti confronto tra analisi modale e statica

Sisma y: l'analisi modale accentua la rotazione

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



## Sollecitazioni



## 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

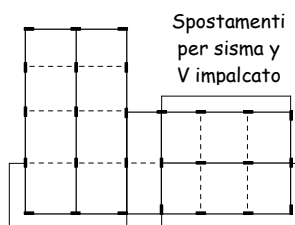
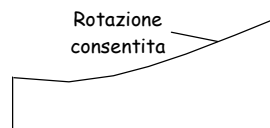
Piano	Momento An. statica (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	26.45	23.66
4	65.80	58.18
3	95.71	85.03
2	119.36	107.23
1	130.89	116.65

+11%

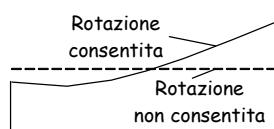
Il momento varia in base  
alla posizione in pianta a  
causa della rotazione

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

## Suggerimento



## 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:

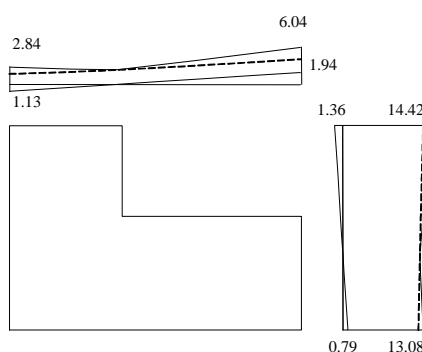
- Comunità scientifica internazionale
- Normativa americana

## Eccentricità accidentale

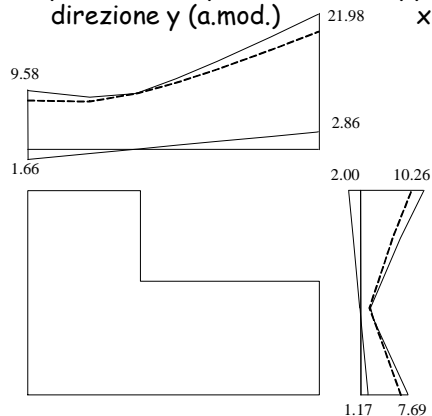
## Eccentricità accidentale Esame dei risultati

- 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  $\delta$  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

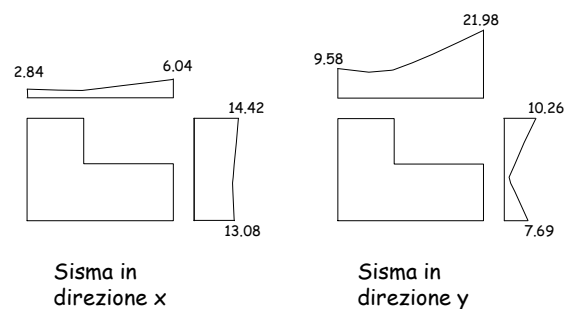
"I valori massimi della risposta ottenuti da ciascuna delle due azioni orizzontali applicate separatamente potranno essere combinati sommando, ai massimi ottenuti per l'azione applicata in una direzione, il 30% dei massimi ottenuti per l'azione applicata nell'altra direzione"

In che modo capire quanta importanza ha questa combinazione?

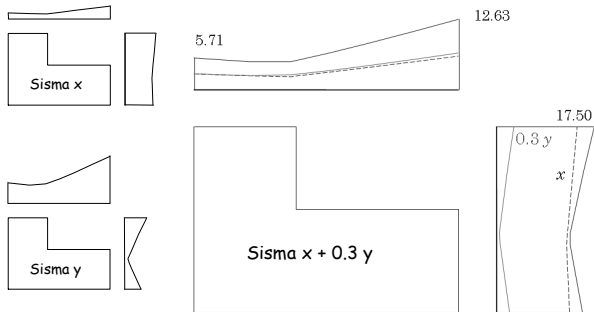
Ragioniamo ancora esaminando gli spostamenti

Ordinanza 3431, punto 4.6

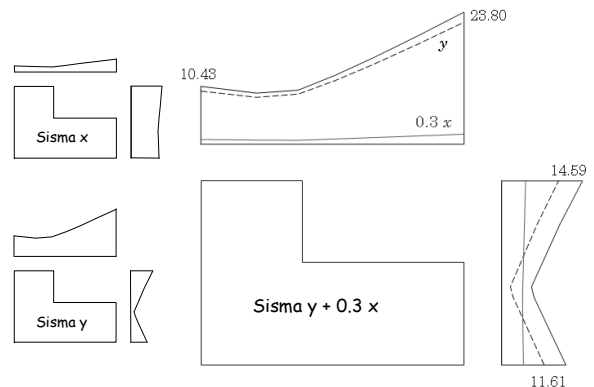
### Effetto complessivo del sisma separatamente nelle due direzioni



### Inviluppo: sisma x + 0.3 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

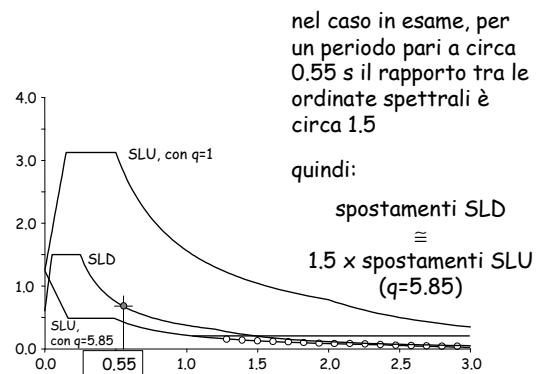
## Stato limite di danno

## 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



## Verifica spostamenti per SLD

Spostamento relativo accettabile: 0.005 h

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

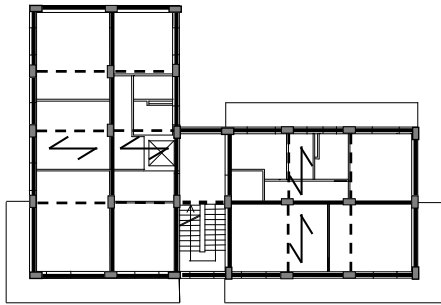
Spostamento relativo massimo,  
fornito dall'analisi:  $1.5 \times 6.4 = 9.6 \text{ mm}$   
(tra II e I impalcato)

La verifica è soddisfatta

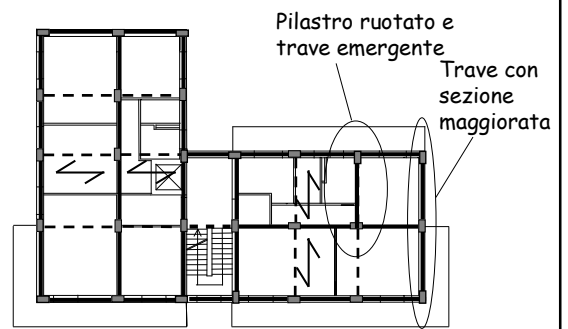
## Possibile ridimensionamento



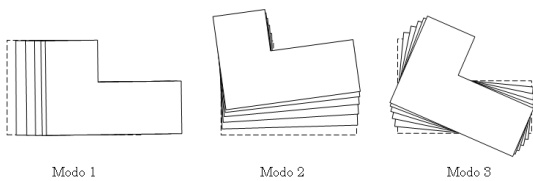
## Impostazione della carpenteria



## Impostazione della carpenteria con modifiche

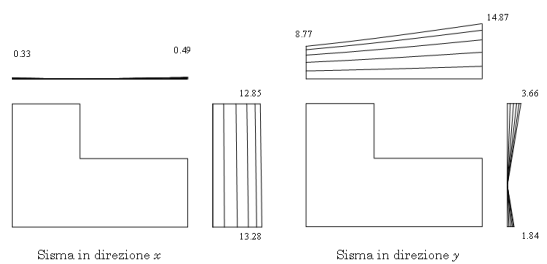


## Modi di oscillazione libera

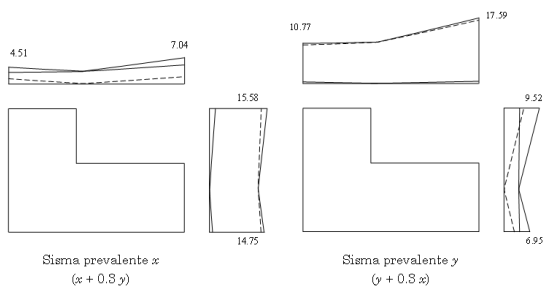


Modo	Periodo $T$ [s]	Massa partecipante $x$ [%]	Massa partecipante $y$ [%]
1	0.567	86.02	0.00
2	0.516	0.01	82.81
3	0.449	0.03	5.29

## Involuppo spostamenti modali

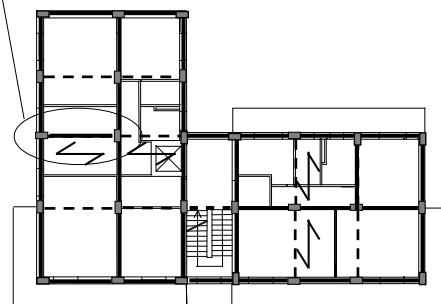


## Effetto complessivo

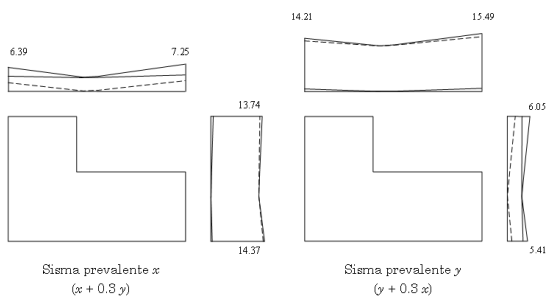


## Impostazione della carpenteria

Pilastro ruotato e ulteriori modifiche  
trave emergente

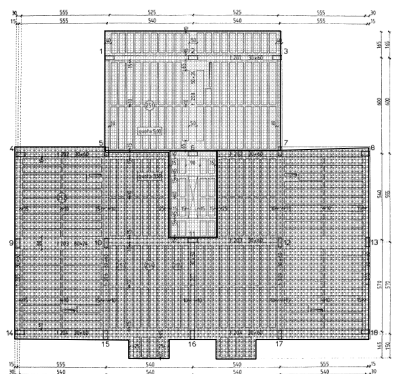


## Effetto compressivo

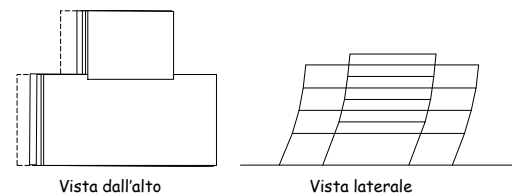


## Esempio 2

## Carpenteria



## Analisi statica Forze in direzione x

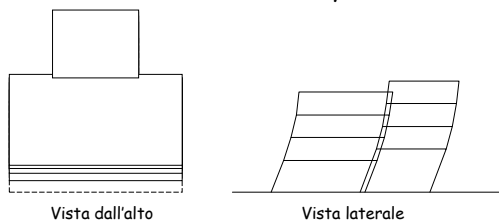


- La struttura trasla in direzione x, quasi senza rotazioni
- Lo spostamento dei diversi impalcati varia gradualmente lungo l'altezza



Il comportamento è regolare in pianta e in altezza

## Analisi statica Forze in direzione y

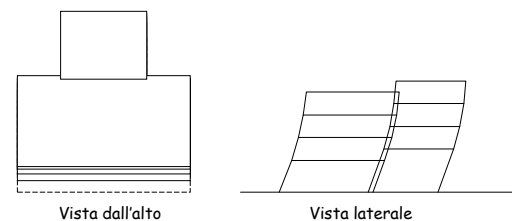


- La struttura trasla in direzione y, senza alcuna rotazione
- Lo spostamento dei diversi impalcati varia gradualmente lungo l'altezza



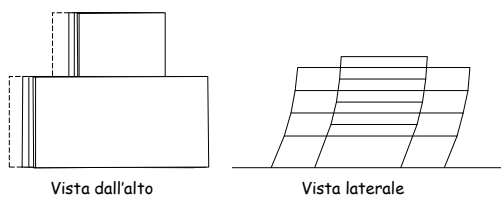
Il comportamento è regolare in pianta e in altezza

## Analisi modale Modo 1



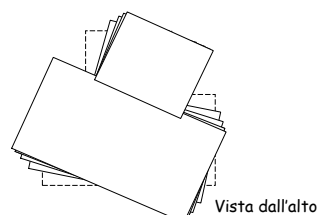
- La struttura trasla in direzione y, senza alcuna rotazione
- Lo spostamento dei diversi impalcati varia gradualmente lungo l'altezza
- Massa partecipante:  
0% per sisma x      93.6% per sisma y

### Analisi modale Modo 2



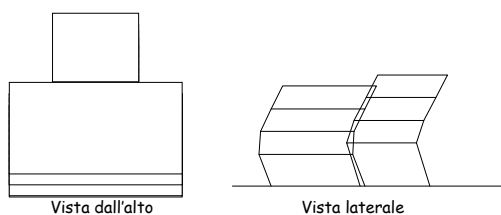
- La struttura trasla in direzione x, quasi senza rotazioni
- Lo spostamento dei diversi impalcati varia gradualmente lungo l'altezza
- Massa partecipante:  
94.9% per sisma x      0% per sisma y

### Analisi modale Modo 3



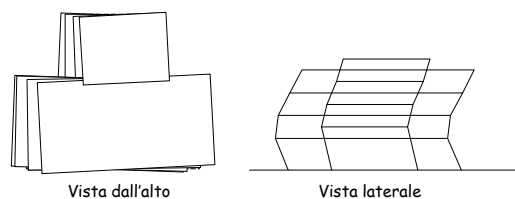
- La struttura ruota
- La rotazione dei diversi impalcati varia gradualmente lungo l'altezza
- Massa partecipante:  
0% per sisma x      0% per sisma y

### Analisi modale Modo 4



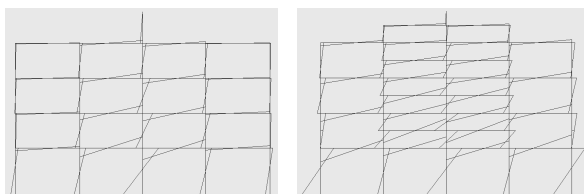
- La struttura trasla in direzione y, senza alcuna rotazione
- Lo spostamento dei diversi impalcati varia gradualmente lungo l'altezza, ma con inversione di segno
- Massa partecipante:  
0% per sisma x      5.1% per sisma y

### Analisi modale Modo 5



- La struttura trasla in direzione x, con un po' di rotazione
- Lo spostamento dei diversi impalcati varia gradualmente lungo l'altezza, ma con inversione di segno
- Massa partecipante:  
4.1% per sisma x      0% per sisma y

### Forze in direzione x Diagrammi del momento flettente



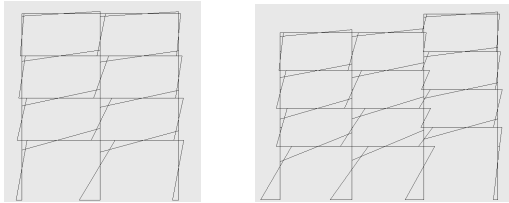
- La presenza delle travi intermedie (dovute ai piani sfalsati) non porta a valori particolari del momento flettente

### Forze in direzione x Diagrammi del taglio



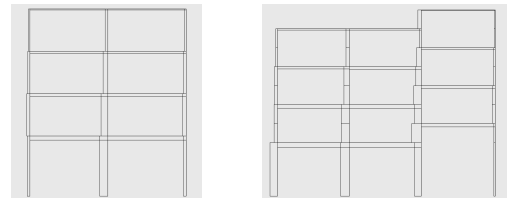
- La presenza delle travi intermedie (dovute ai piani sfalsati) porta localmente a valori del taglio più alti, ma non particolarmente preoccupanti

### Forze in direzione y Diagrammi del momento flettente



- La presenza delle travi intermedie (dovute ai piani sfalsati) non porta a valori particolari del momento flettente

### Forze in direzione y Diagrammi del taglio

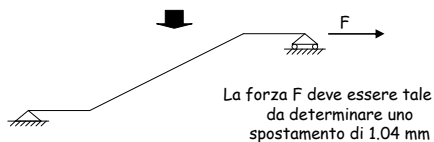


- La presenza delle travi intermedie (dovute ai piani sfalsati) porta localmente a valori del taglio solo leggermente più alti

### Che influenza può avere la scala?

- La scala (soletta rampante) non è stata inserita nel modello
- Il modello mostra spostamenti relativi tra gli impalcati adiacenti, collegati dalla scala (spostamento relativo massimo = 1.04 mm)

Possibile modello per valutarne l'effetto

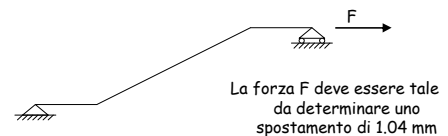


### Che influenza può avere la scala?

- Si ottiene  $F = 67.9 \text{ kN}$
- Questa forza non è trascurabile rispetto alle forze sismiche applicate ai piani per l'analisi statica



È opportuno inserire la soletta rampante nel modello globale dell'edificio per valutarne l'effetto



### Conclusioni

- Sia dall'analisi statica che dall'analisi modale si ha la conferma che il comportamento della struttura è regolare:
  - in pianta, perché vi è sostanziale assenza di rotazione o di accoppiamento tra i modi
  - in altezza, perché lo spostamento degli impalcati varia con gradualità lungo l'altezza dell'edificio
- La soletta rampante non altera tale regolarità, grazie alla sua posizione centrale, ma è bene inserirla nel modello globale della struttura