

Corso di aggiornamento

Teramo, 13 ottobre - 25 novembre 2006

Progetto di edifici antisismici
con struttura intelaiata in c.a.

Teramo, 17 novembre 2006

Aurelio Ghersi

Processo progettuale

- ✓ 1. Concezione generale della struttura, nel rispetto di principi base di buona progettazione
- ✓ 2. Impostazione della carpenteria dell'edificio
- ✓ 3. Dimensionamento delle sezioni e verifica di massima della struttura
- in corso 4. Analisi strutturale dettagliata e verifica del comportamento della struttura
5. Definizione delle armature ed elaborati grafici

Analisi strutturale: fasi di lavoro

- ✓ 1. Definizione dei carichi unitari
- ✓ 2. Valutazione delle masse di piano
- ✓ 3. Valutazione delle forze orizzontali (nel caso di analisi statica)
- ✓ 3b. Definizione schema, analisi per forze orizzontali, analisi modale
4. Valutazione dei carichi sulle travi
5. Definizione degli schemi base di carico

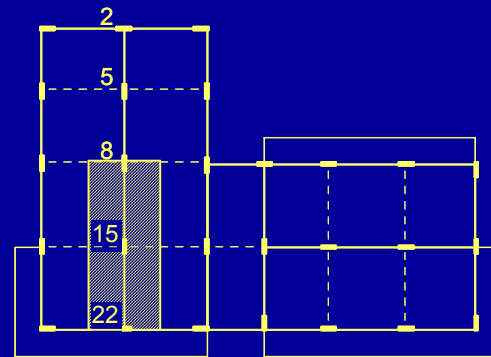
Carichi sulle travi

Carichi sulle travi

Si procede come si è soliti fare, determinando per ciascuna campata di ogni trave i valori caratteristici dei carichi permanenti g_k e variabili q_k

Esempio:

Trave 22-2, piano tipo



Campate 22-15, 15-8

Solaio 1.15 x 4.25 m

Peso proprio

Totale

g_k [kN/m]

24.4

4.2

28.6

q_k [kN/m]

9.8

9.8

Carichi sulle travi

Si procede come si è soliti fare, determinando per ciascuna campata di ogni trave i valori caratteristici dei carichi permanenti g_k e variabili q_k

Esempio:

Trave 22-2, piano tipo - Campate 22-15, 15-8

$$g_k = 28.6 \text{ kN/m} \quad q_k = 9.8 \text{ kN/m}$$

Si determinano i valori di calcolo **in assenza di sisma**, moltiplicando g_k e q_k per γ_g e γ_q

$$\gamma_g g_k = 40.0 \text{ kN/m} \quad \gamma_q q_k = 14.7 \text{ kN/m} \quad \gamma_g g_k + \gamma_q q_k = 54.7 \text{ kN/m}$$

e quelli **in presenza di sisma**, moltiplicando q_k per ψ_2

$$g_k = 28.6 \text{ kN/m} \quad \psi_2 q_k = 2.9 \text{ kN/m} \quad g_k + \psi_2 q_k = 31.5 \text{ kN/m}$$

Carichi sulle travi

Piano tipo

telaio	campata	g_k	q_k	senza sisma	con sisma
1 x	21-22, 22-23	22.0	12.4	49.4	25.7
	23-24	20.0	8.8	41.2	22.6
	24-25, 26-27	26.5	10.6	53.0	29.7
	25-26	27.7	10.6	54.7	30.9
2 x	14-15, 15-16	6.6	2.0	12.2	7.2
	16-17	15.1	10.8	37.3	18.3
	17-18, 18-19, 19-20	27.9	9.5	53.3	30.8
3 x	7-8, 8-9	6.6	2.0	12.2	7.2
	9-10	11.5	2.0	19.1	12.1
	11-12	26.6	10.4	52.8	29.7
	10-11, 12-13	26.0	10.4	52.0	29.1
4 x	4-5, 5-6	6.6	2.0	12.2	7.2
5 x	1-2, 2-3	12.7	1.0	19.3	13.0

Carichi sulle travi

Piano tipo

telaio	campata	g_k	q_k	senza sisma	con sisma
1 y	21-14	27.3	10.9	54.6	30.6
	14-7	22.0	4.7	37.9	23.4
	7-4, 4-1	21.4	4.7	37.0	22.8
2 y	22-15, 15-8	28.6	9.8	54.7	31.5
	8-5, 5-2	29.7	10.2	56.9	32.8
3 y	23-16	19.7	3.8	33.3	20.8
	16-9	27.8	10.8	55.1	31.0
	9-6, 6-3	19.1	3.8	32.4	20.2
4 y	24-17	12.7	1.0	19.3	13.0
	17-10	19.0	7.0	37.1	21.1
5 y, 6 y	25-18, 18-11, 26-19, 19-12	6.6	2.0	12.2	7.2
7 y	27-20	23.2	12.4	51.1	26.9
	20-13	12.7	1.0	19.3	13.0

Carichi sulle travi

Piano tipo

telaio	campata	g_k	q_k	senza sisma	con sisma
1 y	9-6, 6-3	19.1	3.8	54.6	30.6
				37.9	23.4
2 y	24-17	12.7	1.0	37.0	22.8
				54.7	31.5
3 y	17-10	19.0	7.0	56.9	32.8
				33.3	20.8
4 y	25-18, 18-11, 26-19, 19-12	6.6	2.0	55.1	31.0
				32.4	20.2
5 y, 6 y	27-20	23.2	12.4	19.3	13.0
				37.1	21.1
7 y	20-13	12.7	1.0	12.2	7.2
				51.1	26.9
				19.3	13.0

Notare, come ordine di grandezza:
 carico in assenza di sisma
 \approx
 0.6 x carico in presenza di sisma

Combinazioni di carico

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	
		$- e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	3	
			$- 0.3 E_y$	$- e_x$	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	
		$- e_y$	$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	9	
			$- 0.3 E_y$	$- e_x$	10	
			$+ 0.3 E_y$	$+ e_x$	11	
			$- 0.3 E_y$	$- e_x$	12	
	E_y	+	$+ e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	13
				$- 0.3 E_x$	$- e_y$	14
			$- e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	15
				$- 0.3 E_x$	$- e_y$	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	
		$- e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	21	
			$- 0.3 E_x$	$- e_y$	22	
			$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	23	
			$- 0.3 E_x$	$- e_y$	24	
			$+ e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	25
				$- 0.3 E_x$	$- e_y$	26
			$- e_x$	$+ 0.3 E_x$	$+ e_y$	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 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 (analisi statica o modale):
già commentate nella lezione precedente

Restano da discutere:

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

Eccentricità accidentale

Eccentricità accidentale

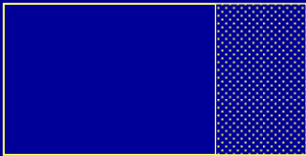
“Quale che sia il modello adottato, in aggiunta alla eccentricità effettiva dovrà essere considerata un'eccentricità accidentale che tenga conto della incertezza relativa all'effettiva posizione del centro di massa”

“In aggiunta all'eccentricità effettiva, dovrà essere considerata un'eccentricità accidentale e_{ai} , spostando il centro di massa di ogni piano i , in ogni direzione considerata, di una distanza pari a $\pm 5\%$ della dimensione massima del piano in direzione perpendicolare all'azione sismica”

Eccentricità accidentale

Perché il 5% ?

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



$$e_{a1} = 0.021 L_1$$



$$e_{a2} = 0.021 L_2$$

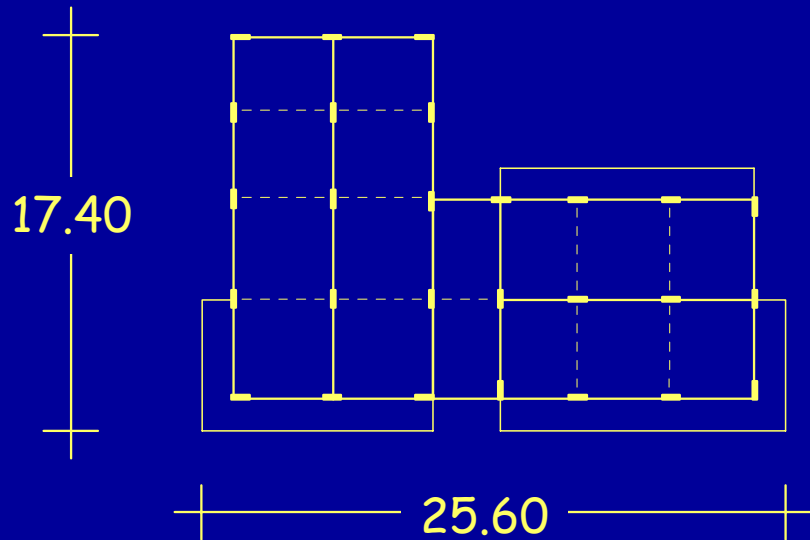


$$e_{a1} = 0.015 L_1$$
$$e_{a2} = 0.015 L_2$$

Il valore 0.05 è maggiore, per tener conto di:

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

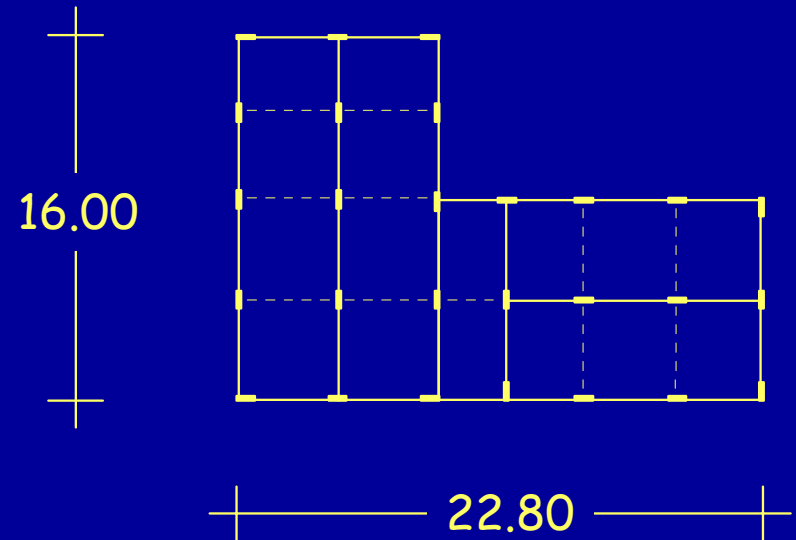
Eccentricità accidentale Nell'esempio



Impalcato tipo (con sbalzi)

per F_x $e_a = 0.05 \times 17.40 = 0.87 \text{ m}$

per F_y $e_a = 0.05 \times 25.60 = 1.28 \text{ m}$



I impalcato (senza sbalzi)

$e_a = 0.05 \times 16.00 = 0.80 \text{ m}$

$e_a = 0.05 \times 22.80 = 1.14 \text{ m}$

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

Eccentricità accidentale

Coppie da considerare

Piano	Forze in direzione x			Forze in direzione y		
	F (kN)	e_a (m)	M (kNm)	F (kN)	e_a (m)	M (kNm)
Torrino+V	784.9	0.87	682.9	797.4	1.28	1020.7
IV	668.0	0.87	581.1	678.6	1.28	868.7
III	506.0	0.87	440.3	514.1	1.28	658.1
II	344.1	0.87	299.4	349.6	1.28	447.5
I	165.2	0.80	132.1	167.8	1.14	191.3

Nota: le forze sono calcolate col periodo aggiornato, separatamente per direzione x e direzione y

Eccentricità accidentale

Esame dei risultati

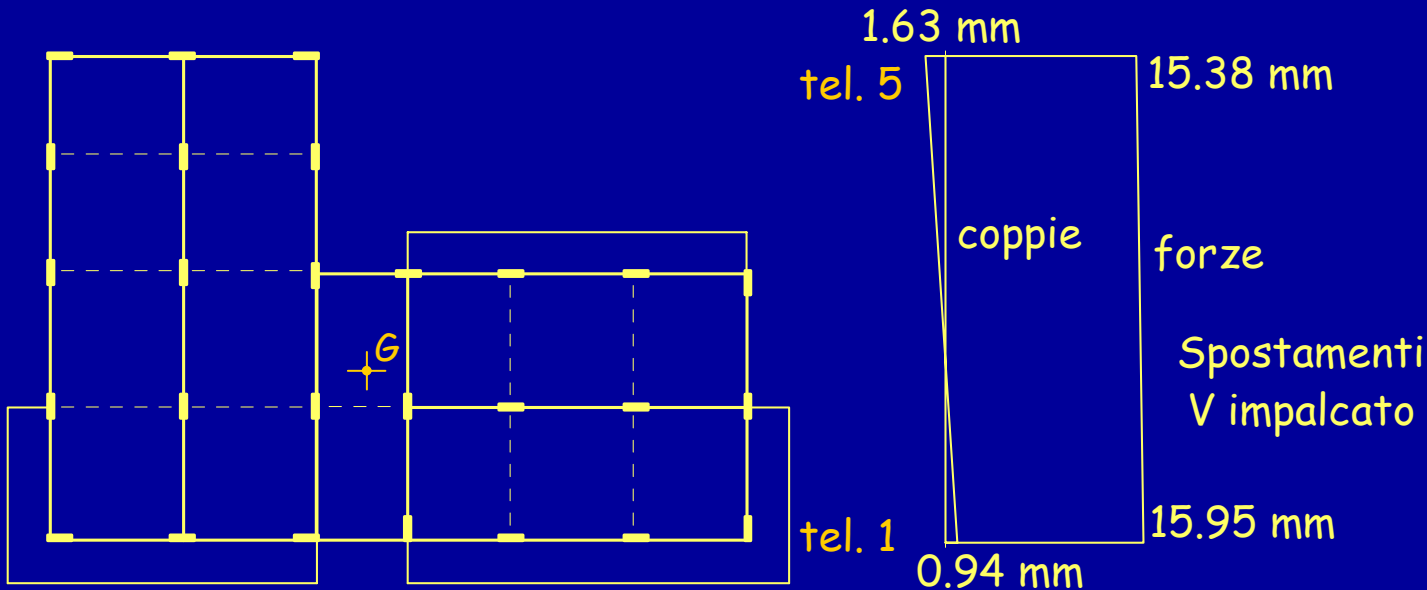
- Esaminare per ciascuna delle due direzioni gli spostamenti prodotti dalle coppie e confrontarli con quelli prodotti dalle forze
 - l'effetto delle coppie è lo stesso a tutti i piani?
 - la sua entità è comparabile con quanto previsto?
- Esaminare i momenti massimi nei pilastri e nelle travi e confrontarli con quelli prodotti dalle forze
 - l'incremento dovrebbe essere analogo a quello degli spostamenti

Spostamenti per forze e coppie direzione x

	telaio 1	telaio 5
piano 5	0.0590	0.1063
piano 4	0.0587	0.1054
piano 3	0.0584	0.1045
piano 2	0.0578	0.1029
piano 1	0.0570	0.0999

rapporto tra
spostamenti
prodotti da
coppie e
forze

non dipende
(quasi)
dal piano



Spostamenti per forze e coppie direzione x

	telaio 1	telaio 5
piano 5	0.0590	0.1063
piano 4	0.0587	0.1054
piano 3	0.0584	0.1045
piano 2	0.0578	0.1029
piano 1	0.0570	0.0999

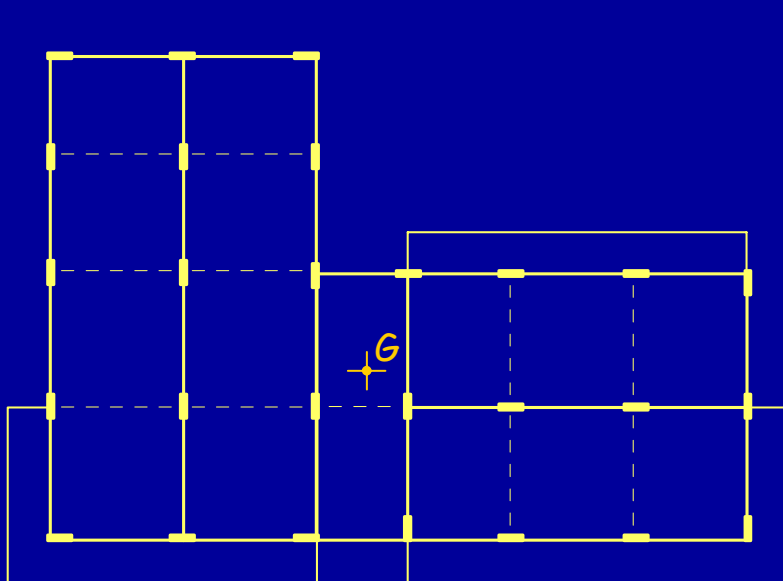
rapporto tra
spostamenti
prodotti da
coppie e
forze

può essere
stimato con
l'espressione

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

con $k = 0.16$

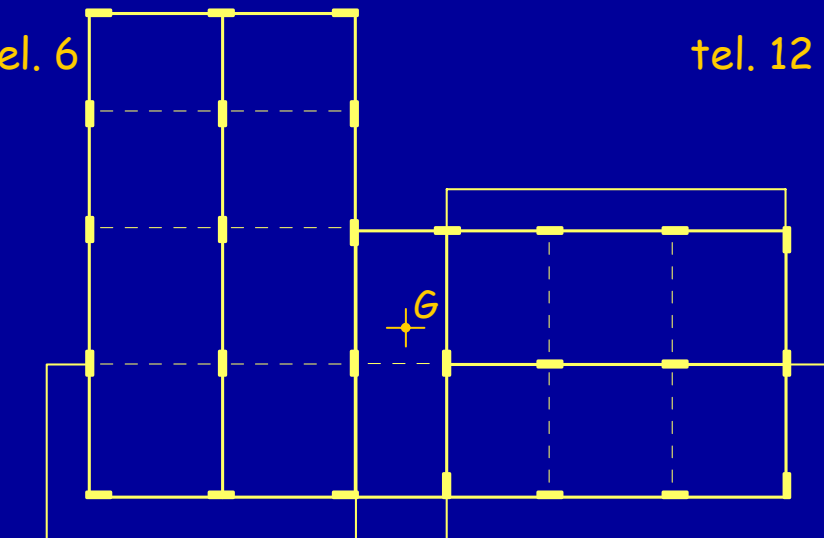
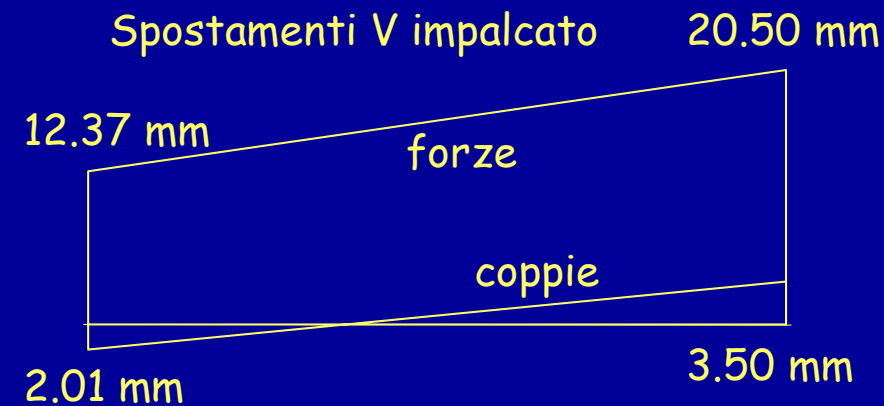
x distanza da G
 L_e dimensione $\perp x$



forze

Spostamenti
V impalcato

Spostamenti per forze e coppie direzione y



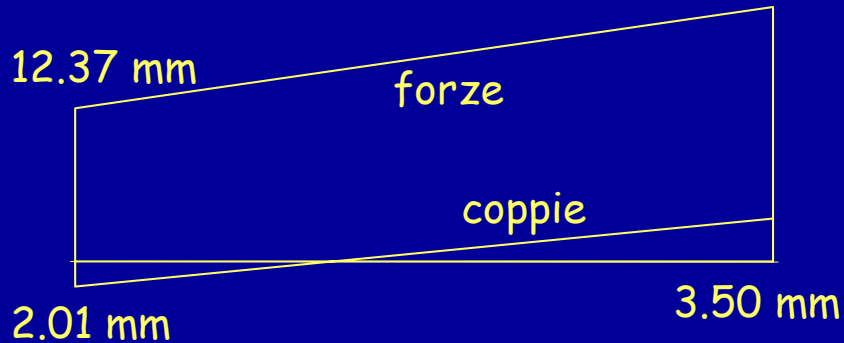
	telaio 6	telaio 12
piano 5	0.1628	0.1708
piano 4	0.1616	0.1704
piano 3	0.1603	0.1700
piano 2	0.1578	0.1696
piano 1	0.1528	0.1688

rapporto tra
spostamenti prodotti
da coppie e forze

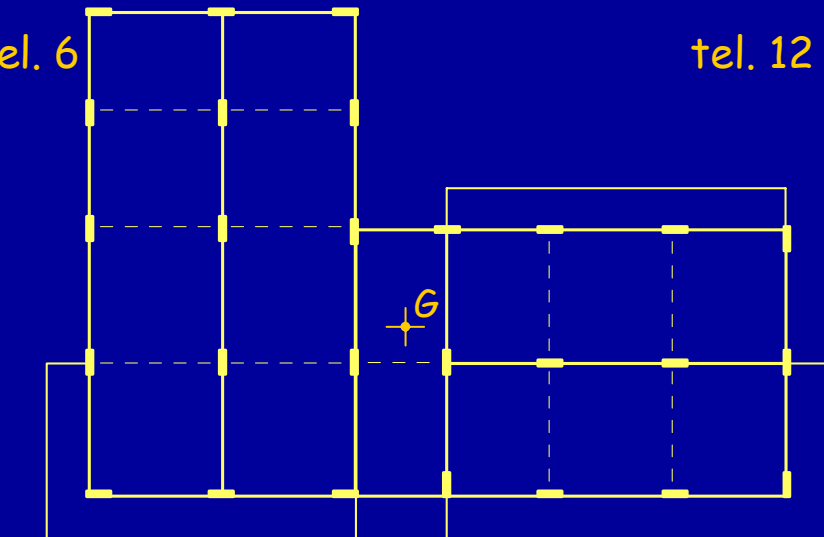
non dipende
(quasi)
dal piano

Spostamenti per forze e coppie direzione y

Spostamenti V impalcato 20.50 mm



	telaio 6	telaio 12
piano 5	0.1628	0.1708
piano 4	0.1616	0.1704
piano 3	0.1603	0.1700
piano 2	0.1578	0.1696
piano 1	0.1528	0.1688



rapporto tra
spostamenti prodotti
da coppie e forze

può essere
stimato con
l'espressione

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

con $k \cong 0.33$

x distanza da G
 L_e dimensione $\perp y$

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

Combinazione delle componenti del sisma

“Le componenti orizzontali e verticali dell'azione sismica saranno prese come agenti simultaneamente e dovranno essere opportunamente combinate”

La componente verticale

“L'azione sismica verticale dovrà essere obbligatoriamente considerata nei casi seguenti: presenza di elementi a mensola ...

L'analisi sotto azione sismica verticale potrà essere limitata a modelli parziali comprendenti gli elementi indicati “

Si noti però che l'accelerazione verticale massima di calcolo (allo SLU) sarà pari a $1.8 \times 0.25 g$, cioè porta ad incrementare del 45% i carichi verticali $g_k + \psi_2 q_k$ ottenendo valori inferiori a $g_d + q_d$ di solito trascurabile !

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?

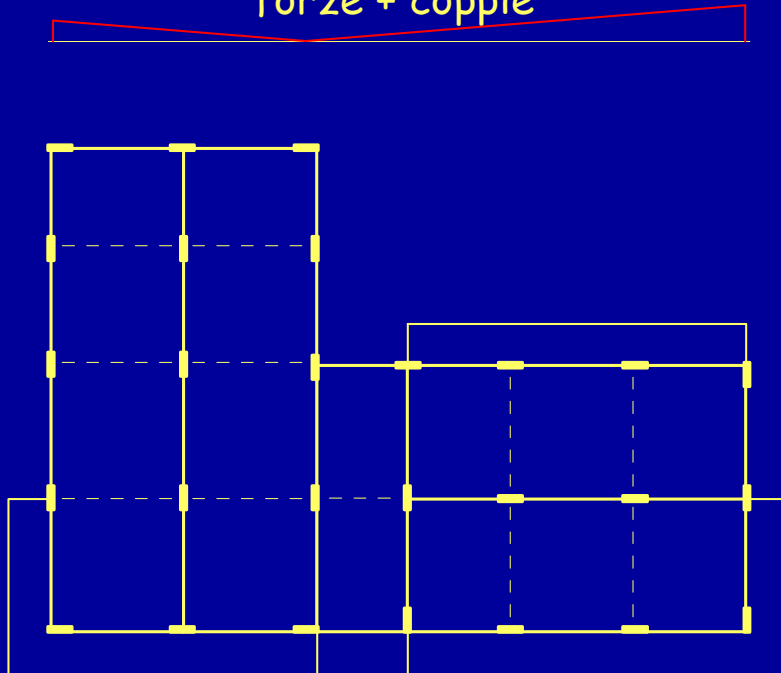
Ragioniamo ancora esaminando gli spostamenti

Spostamenti per sisma x (involuppo forze + coppie)

1.65 mm

2.86 mm

forze + coppie

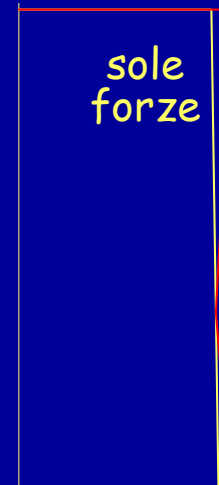


17.01 mm

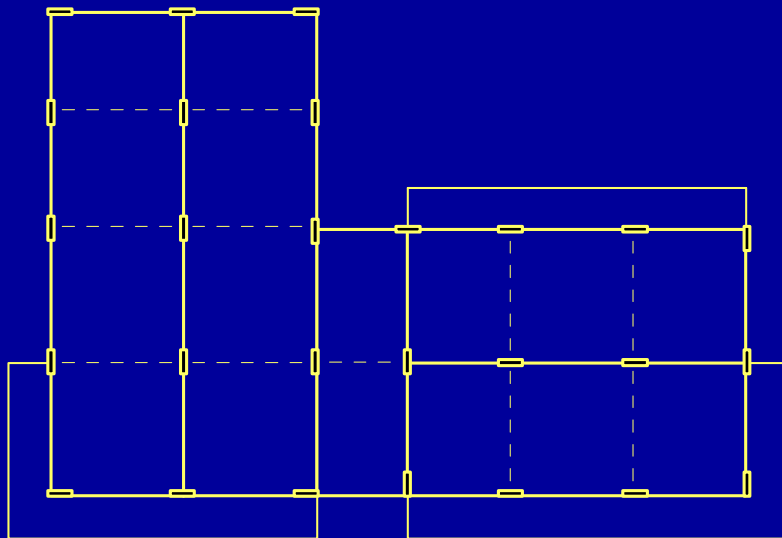
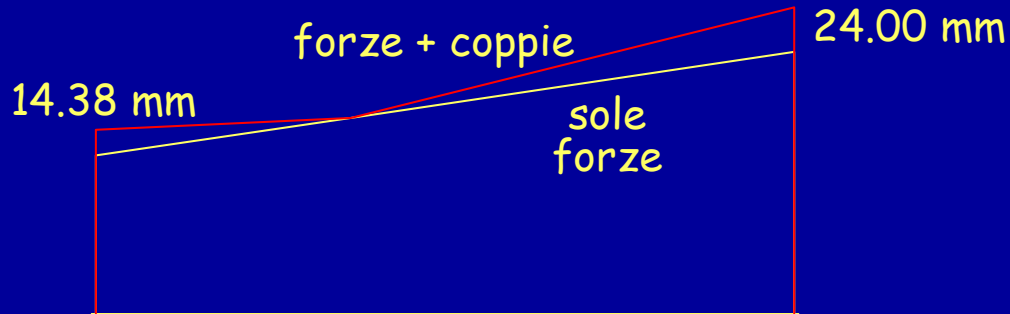
sole
forze

forze
+
coppie

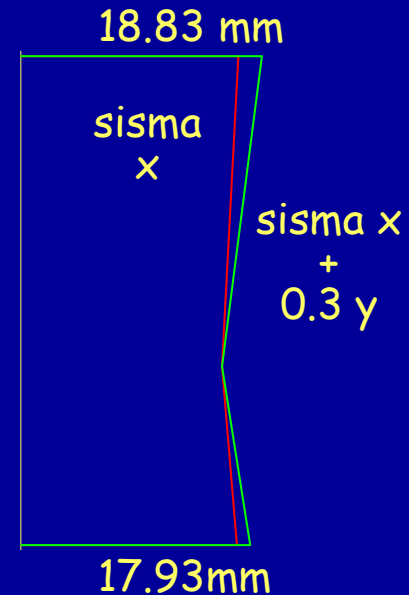
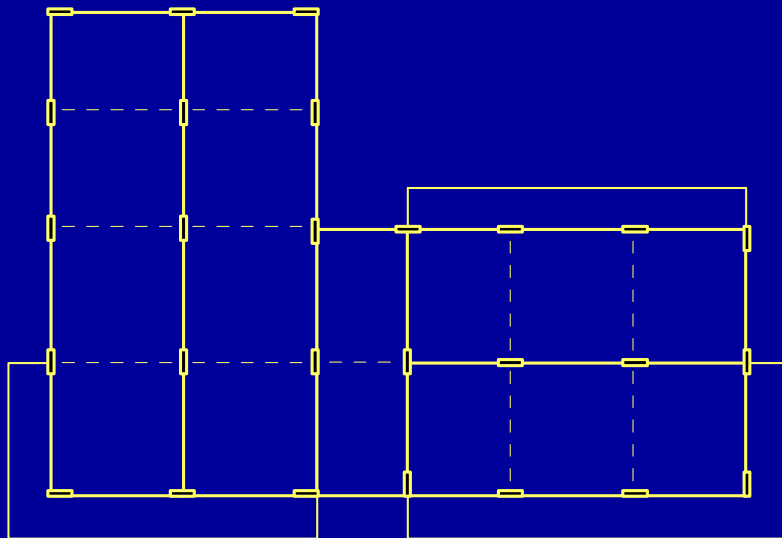
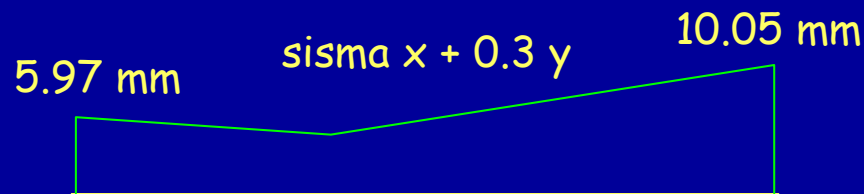
16.89 mm



Spostamenti per sisma y (involuppo forze + coppie)



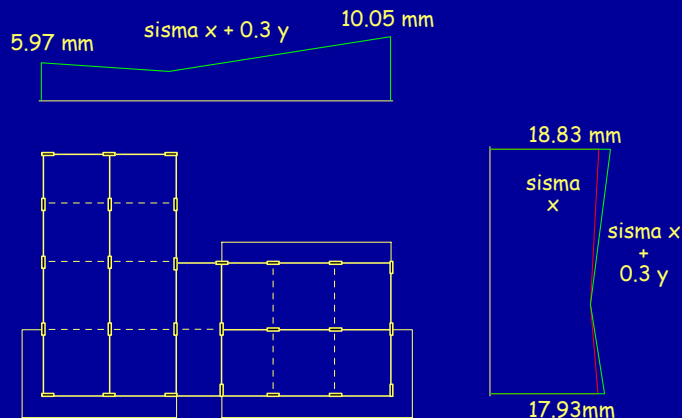
Inviluppo: $s_{isma} x + 0.3 s_{isma} y$



Inviluppo: $sisma\ x + 0.3\ sisma\ y$

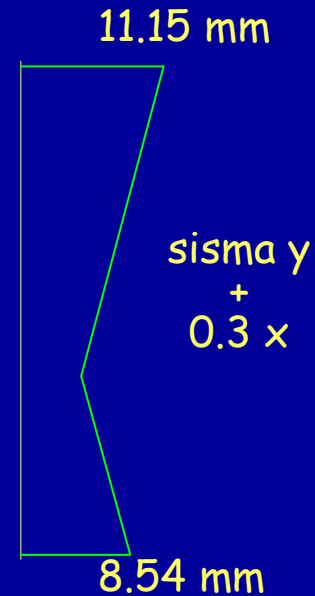
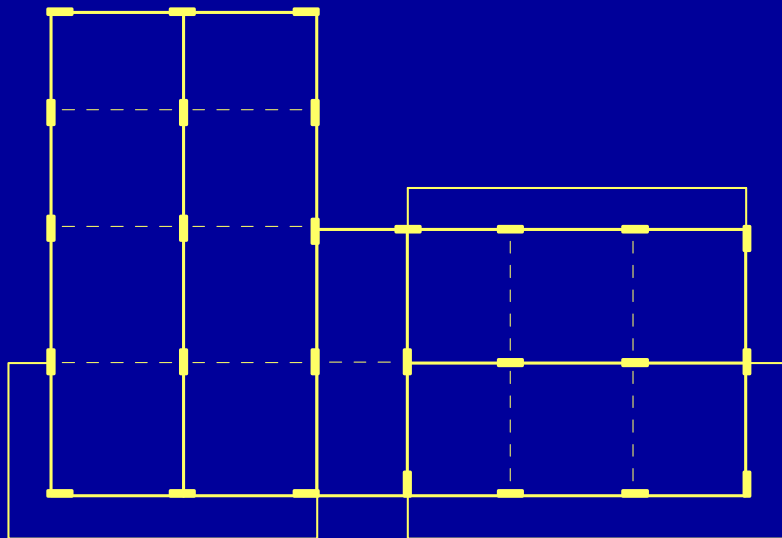
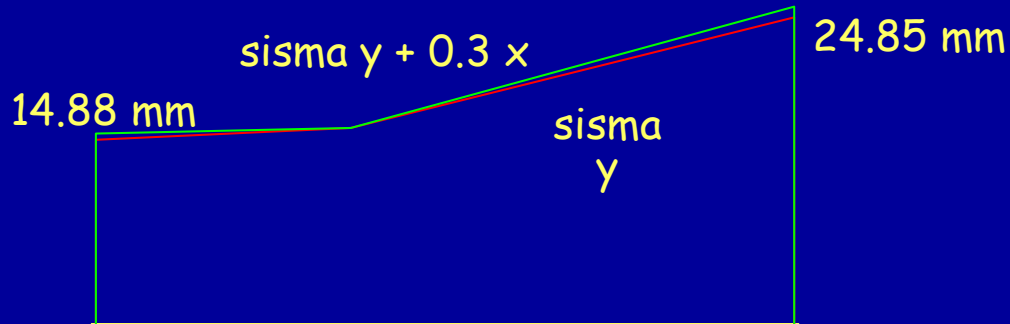
Si noti che:

- gli spostamenti in direzione x sono cresciuti di un ulteriore 6% (inf) e 11% (sup) - in totale un incremento del 12% (inf) e 22% (sup) rispetto allo schema con sole forze in direzione x (ma incremento nullo nella parte centrale)



- contemporaneamente sono presenti spostamenti non trascurabili in direzione y (pari al 30-40% degli spostamenti massimi per solo sisma y)

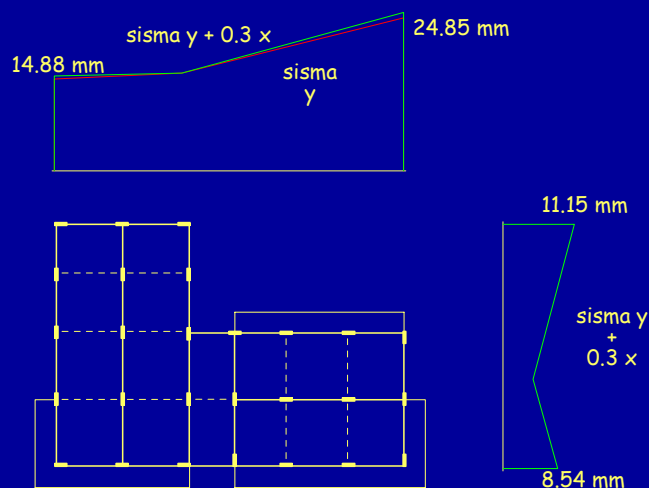
Inviluppo: $s_{isma\ y} + 0.3\ s_{isma\ x}$



Inviluppo: sisma y + 0.3 sisma x

Si noti che:

- gli spostamenti in direzione y sono cresciuti di un ulteriore 3% (des e sin) - in totale un incremento del 21% (des) e 22% (sin) rispetto allo schema con sole forze in direzione y (ma incremento nullo nella parte centrale)



- contemporaneamente sono presenti spostamenti non trascurabili in direzione x (dal 30% al 60% degli spostamenti massimi per solo sisma x)

Commenti

Effetto complessivo di eccentricità accidentale e combinazione x y

Travi:

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

Effetto complessivo di eccentricità accidentale e combinazione x y

Pilastri:

- i pilastri nella parte centrale dell'edificio non hanno variazioni rilevanti delle caratteristiche di sollecitazione massima, ma devono essere verificati a pressoflessione deviata con momenti trasversali pari a circa il 30% del massimo
- i pilastri perimetrali hanno un incremento di caratteristiche di sollecitazione fino a circa il 20%, ed inoltre devono essere verificati a pressoflessione deviata con momenti trasversali pari a circa il 40%-60% del massimo

Giudizio complessivo

prima di passare ad una verifica dettagliata

Rispetto alla stima iniziale, fatta in fase di dimensionamento:

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

Il dimensionamento iniziale è accettabile?

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

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

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

Stato limite di danno

Stato limite di danno

Prima di passare alla definizione delle armature, è opportuno controllare gli spostamenti per lo stato limite di danno

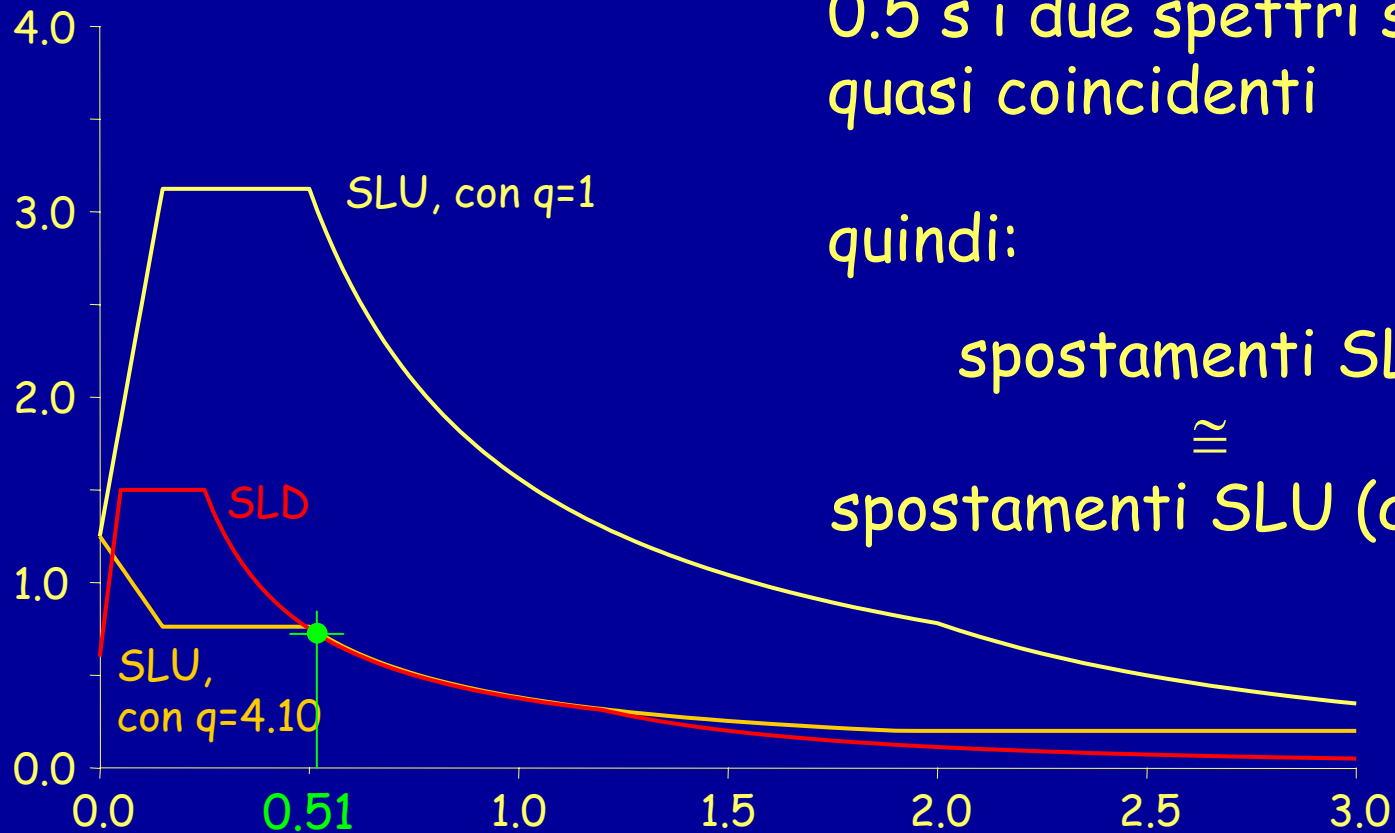
Occorrerebbe ripetere tutto il calcolo, usando gli spettri relativi allo SLD, ma può essere più semplice valutare gli spostamenti a partire da quelli per lo SLU, tenendo conto della differenza di ordinata dei relativi spettri

Spettri per SLU e SLD

nel caso in esame, per un periodo pari a circa 0.5 s i due spettri sono quasi coincidenti

quindi:

spostamenti SLD
 \approx
spostamenti SLU ($q=4.10$)



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:

6.4 mm

(tra II e I impalcato)

La verifica è soddisfatta

FINE

Sostanzialmente nuova

Per questa presentazione:

coordinamento

A. Ghersi

realizzazione

A. Ghersi

ultimo aggiornamento

15/11/2006