

Corso di aggiornamento

**Progetto di edifici antisismici  
con struttura a telaio in acciaio**

6b - Calcolo approssimato con CD "B"

Villa Redenta, Spoleto

23-24 marzo 2017

Aurelio Ghersi

# Spettro di progetto per SLV

È ottenuto dividendo lo spettro di risposta elastica per il fattore di struttura  $q$

$$q = q_0 K_R$$

Per telai in acciaio:

$$q_0 = 5 \alpha_u / \alpha_1 \quad \text{per CD "A"}$$

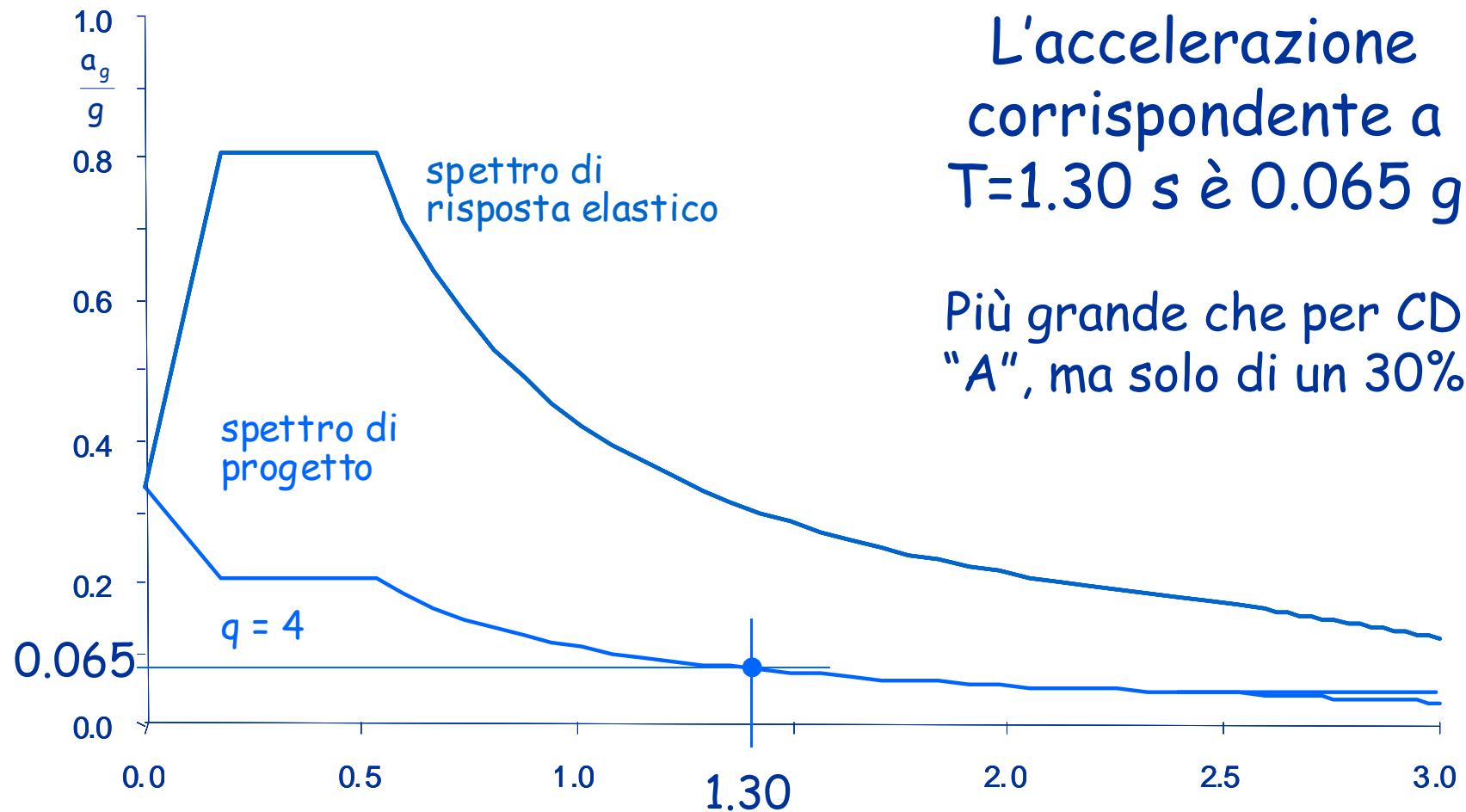
$$q_0 = 4 \quad \text{per CD "B"}$$

$$\alpha_u / \alpha_1 = 1.3 \quad \text{telaio con più piani e più campate}$$

$$K_R = 1 \quad \text{la struttura è regolare in altezza}$$

Provo ad assumere  $q = 4$

# Ordinata spettrale per SLV



# Forze e spostamenti per SLV

- Le forze e gli spostamenti allo SLV si ricavano da quelli calcolati per  $a_g=1$ , moltiplicandoli per il valore di  $a_g$  ora trovato

piano	F [kN]	V [kN]
5	5687.3	5687.3
4	4520.0	10207.3
3	3390.0	13597.3
2	2260.0	15857.3
1	1130.0	16987.3
	<u>16987.3</u>	

X 0.065



F	V	u [mm]	dr [mm]
370.80	370.80	42.61	4.55
294.69	665.49	38.06	8.17
221.02	886.51	29.89	10.88
147.35	1033.85	19.01	12.69
73.67	1107.53	6.32	6.32

# Come prevedere le caratteristiche della sollecitazione?

1. Ripartire il taglio di piano tra i pilastri in maniera forfaitaria, oppure in base a rigidezze stimate

Esempio: piano 5,  $V = 370.80$  kN

		piano 5
	k1	$V_p$ [kN]
col.rig-2 tra.	4.91	22.34
col.rig-1 tra.	2.72	12.36
col.def-2 tra.	3.01	13.70
col.def-1 tra.	2.01	9.17
totale	81.48	

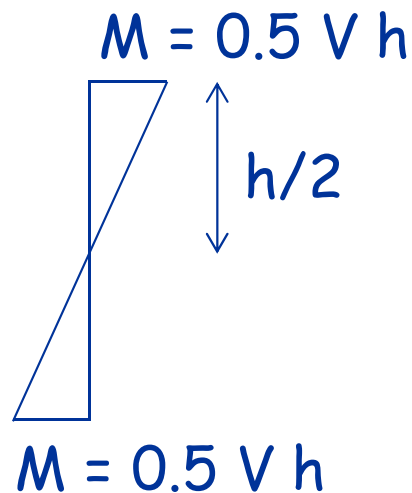
$$370.80 \times \frac{4.91}{81.48} = 22.34$$

# Come prevedere le caratteristiche della sollecitazione?

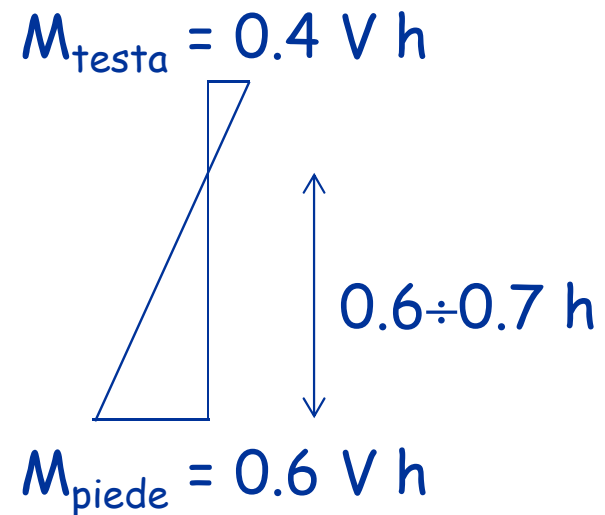
## 2. Valutare il momento nei pilastri

Se le travi sono abbastanza rigide

ai piani superiori



al primo ordine

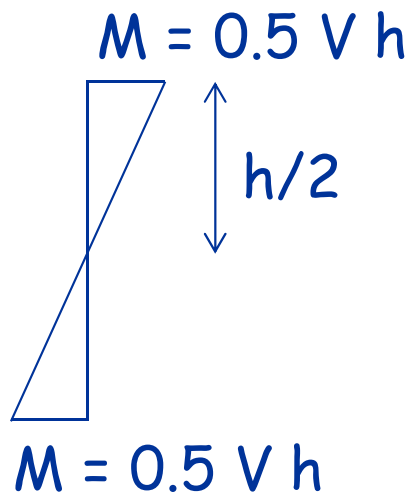


# Come prevedere le caratteristiche della sollecitazione?

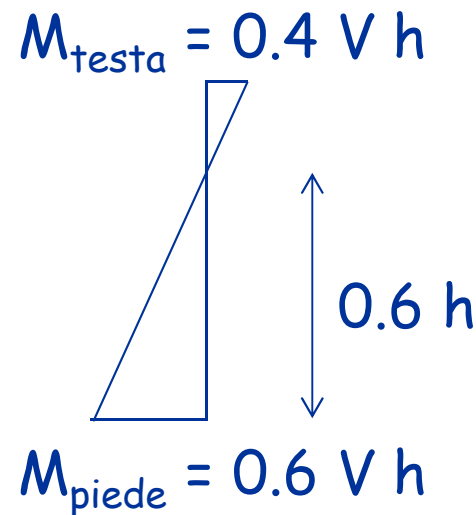
## 2. Valutare il momento nei pilastri

Se le travi sono più deformabili

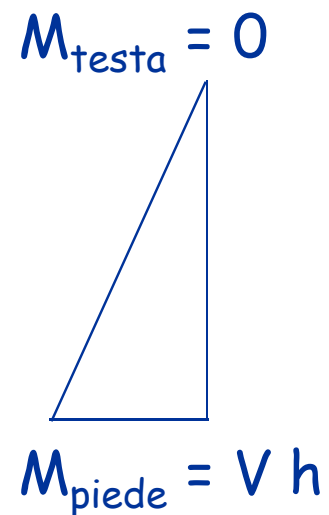
ai piani superiori



al secondo ordine



al primo ordine



# Come prevedere le caratteristiche della sollecitazione?

## 2. Valutare il momento nei pilastri

piano 5			
$V_p$ [kN]		$M_t$ [kNm]	$M_p$ [kNm]
22.34	0.5	39.09	39.09
12.36	0.5	21.64	21.64
13.70	0.5	23.98	23.98
9.17	0.5	16.04	16.04

piano 2			
$V_p$ [kN]		$M_t$ [kNm]	$M_p$ [kNm]
62.28	0.5	108.99	108.99
34.47	0.4	48.26	72.39
38.20	0.5	66.85	66.85
25.56	0.5	44.73	44.73

piano 1			
$V_p$ [kN]		$M_t$ [kNm]	$M_p$ [kNm]
71.97	0.2	50.38	201.52
58.48	0.0	0.00	204.67
26.52	0.4	37.13	55.69
21.68	0.2	15.18	60.70

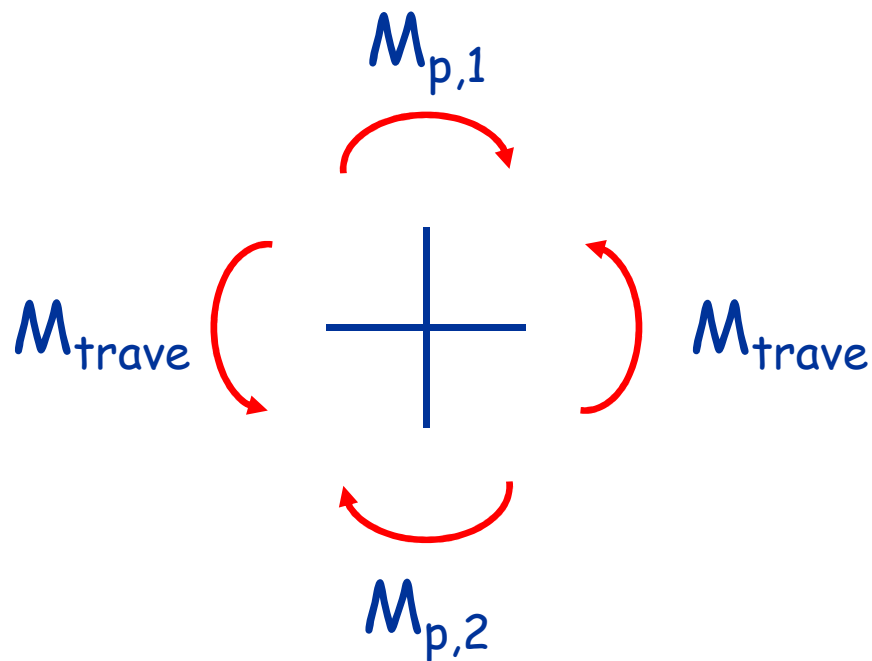
col.rig-2 tra.
col.rig-1 tra.
col.def-2 tra.
col.def-1 tra.

File Excel Progetto 2017, foglio Direz x (q=4)



# Come prevedere le caratteristiche della sollecitazione?

## 3. Valutare i momenti nelle travi

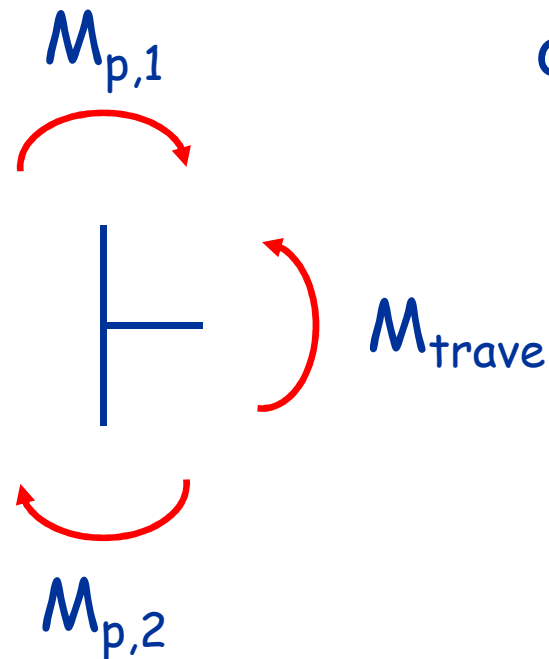


Per l'equilibrio:

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

# Come prevedere le caratteristiche della sollecitazione?

## 3. Valutare i momenti nelle travi



o, se c'è solo una trave

Per l'equilibrio:

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

# Come prevedere le caratteristiche della sollecitazione?

## 3. Valutare i momenti nelle travi

Nel caso in esame

	<b>piano 2</b>						
	V <sub>p</sub> [kN]		M <sub>t</sub> [kNm]	M <sub>p</sub> [kNm]		M <sub>tra</sub> [kNm]	
	62.28	0.5	108.99	108.99	2	101.22	
	34.47	0.4	48.26	72.39	1	99.99	
	38.20	0.5	66.85	66.85	2	62.09	
	25.56	0.5	44.73	44.73	1	83.08	
	<b>piano 1</b>						
	V <sub>p</sub> [kN]		M <sub>t</sub> [kNm]	M <sub>p</sub> [kNm]		M <sub>tra</sub> [kNm]	
	col.rig-2 tra.	71.97	0.2	50.38	201.52	2	79.68
	col.rig-1 tra.	58.48	0.0	0.00	204.67	1	72.39
	col.def-2 tra.	26.52	0.4	37.13	55.69	2	51.99
col.def-1 tra.	21.68	0.2	15.18	60.70	1	59.90	

# Come prevedere le caratteristiche della sollecitazione?

4. Occorrerebbe inoltre incrementare i momenti per tenere conto di:
- eccentricità propria del sistema
  - eccentricità accidentale
  - effetto combinato delle diverse componenti

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

# Effetto P- $\delta$ per SLV

- Può essere condizionante

Per la normativa  $\theta = \frac{P d q}{V h}$

Per le considerazioni già fatte  $\theta = \frac{P d \frac{S_e(T)}{S_d(T)}}{V h \Omega \frac{\alpha_u}{\alpha_1}}$

Si noti che  $P d / V h$  non dipende dal valore delle forze ma solo dalla loro distribuzione

Quindi assume i valori già calcolati

# Effetto P- $\delta$ per SLV

- Se usassi la formula di normativa

$$\theta = \frac{P d q}{V h}$$

piano	Pd/Vh	q	Pd/Vh q
5	0.012	4	0.048
4	0.024	4	0.095
3	0.036	4	0.143
2	0.048	4	0.191
1	0.028	4	0.111

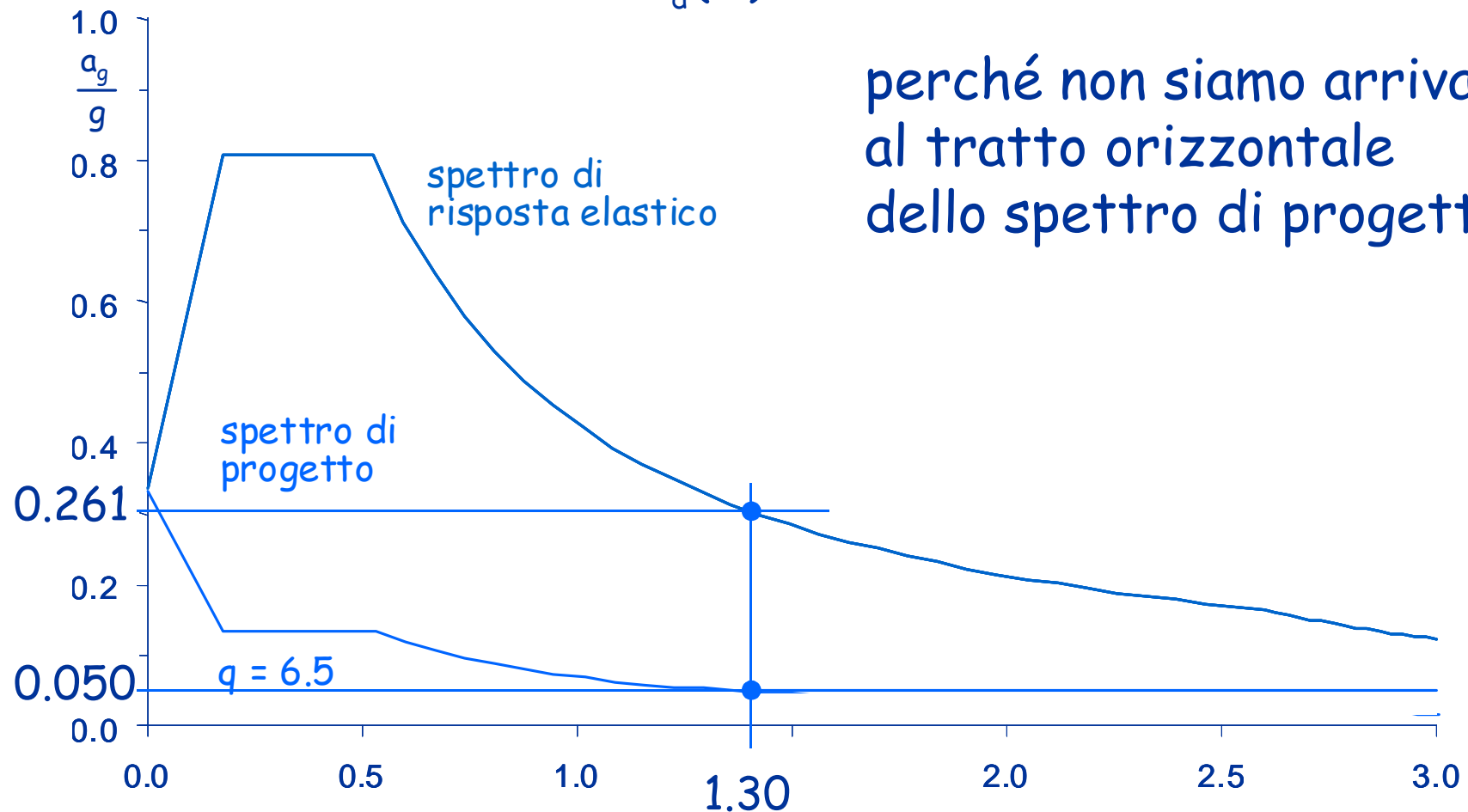
Valori alti, ma accettabili

Nota: i valori di  $\theta$  dipenderebbero da  $q$  anche se la struttura è definita, mentre devono dipendere solo dalla struttura

# Effetto P- $\delta$ per SLV

## Ordinate spettrali

- Nel caso in esame  $\frac{S_e(T)}{S_d(T)} = \frac{0.261}{0.065} = 4.00 = q$



# Effetto P- $\delta$ per SLV

## Ordinate spettrali e sovrarresistenza

- Nel caso in esame  $\frac{S_e(T)}{S_d(T)} = \frac{0.261}{0.065} = 4.00$
- Non conosciamo ancora  $\Omega$  (ma potremmo calcolarlo)
- Possiamo assumere  $\frac{\alpha_u}{\alpha_1} = 1.3$



Dobbiamo quindi moltiplicare per  $\frac{4.00}{1.3} = 3.08$   
e non per 4

e ridurre ulteriormente di  $\Omega$



# Effetto P-δ per SLV

- Già così si ottiene

$$\theta = \frac{P d S_e(T) / S_d(T)}{1.3 V h}$$

piano	Pd/Vh	Se/Sd / 1.3	θ
5	0.012	3.08	0.037
4	0.024	3.08	0.073
3	0.036	3.08	0.110
2	0.048	3.08	0.147
1	0.028	3.08	0.085

Valori non trascurabili, ma non particolarmente alti

Si avrebbe un incremento di sollecitazioni del 15-18%

Ma dobbiamo ancora tener conto di  $\Omega$

# Verifica di massima trave

- Momento flettente da carichi verticali,  
in condizione sismica  $M_q = 120 \text{ kNm}$
- Momento flettente da sisma,  
da calcolo  $M_E = 101.2 \text{ kNm}$

Incremento per eccentricità (1.2)  
e per effetto P- $\delta$  (1.2)  $M_E = 145.7 \text{ kNm}$

- Momento totale  $M_{Ed} = 265.7 \text{ kNm}$
- Momento resistente  $M_{Rd} = 266.9 \text{ kNm}$

Ok, ma al limite

# Verifica di massima colonna, lato rigido

- Sforzo normale da carichi verticali,  
in condizione sismica (stima)  $N_q = 1241 \text{ kN}$
- Momento flettente da sisma,  
da calcolo  $M_E = 204.7 \text{ kNm}$

Incremento per eccentricità (1.2)  
e per effetto P- $\delta$  (1.2)  $M_E = 294.8 \text{ kNm}$

- Momento resistente  $M_{Rd(N)} = 827.2 \text{ kNm}$

Ok

Occorre tener conto della gerarchia delle resistenze,  
ma c'è un buon margine

# Verifica di massima colonna, lato flessibile

- Sforzo normale da carichi verticali,  
in condizione sismica (stima)  $N_q = 1241 \text{ kN}$
- Momento flettente da sisma,  
da calcolo  $M_E = 66.9 \text{ kNm}$

Incremento per eccentricità (1.2)  
e per effetto P- $\delta$  (1.2)  $M_E = 96.3 \text{ kNm}$

- Momento resistente  $M_{Rd(N)} = 348.9 \text{ kNm}$

Ok

Occorre tener conto della gerarchia delle resistenze,  
ma c'è un buon margine

# Sovreresistenza $\Omega$ rispetto alla prima plasticizzazione

- La sovreresistenza è

$$\Omega = \text{Min} \left( \frac{M_{pl,Rd} - M_{Ed,G}}{M_{Ed,E}} \right)_{\text{travi}}$$

Ma  $M_{Ed,E}$  dovrebbe essere calcolato con incremento per  $\theta$ , che dipende da  $\Omega$

Nel caso in esame:

$$M_{pl,Rd} = 266.9 \text{ kNm} \qquad M_{Ed,G} = 120 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,E} = 101.2 \text{ kNm (da incrementare per } 1/1-\theta)$$

# Sovreresistenza $\Omega$ rispetto alla prima plasticizzazione

- Nel caso in esame:

$$M_{pl,Rd} = 266.9 \text{ kNm} \quad M_{Ed,G} = 120 \text{ kNm} \quad M_{pl,Rd} - M_{Ed,G} = 146.9$$

$$M_{Ed,E} = 101.2 \text{ kNm} \text{ (da incrementare per } 1/(1-\theta)\text{)}$$

$$\Omega = \frac{M_{pl,Rd} - M_{Ed,G}}{M_{Ed,E} \frac{1}{1-\theta}} \quad \theta = \frac{0.147}{\Omega}$$

$$\text{detto } r = \frac{M_{pl,Rd} - M_{Ed,G}}{M_{Ed,E}}$$

$$\text{si ha } \Omega = r \frac{1 + \sqrt{1 - 4 \times 0.147 / r}}{2}$$

Si ottiene:

$$\Omega = 1.286$$

$$\theta = 0.114$$

$$\frac{1}{1-\theta} = 1.129$$

come per CD "A"

# Verifica colonna, lato rigido con gerarchia specifica per acciaio

- Il momento flettente deve essere calcolato con

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + 1.1 \gamma_{ov} \Omega M_{Ed,E}$$

- Momento flettente da sisma,  
da calcolo

$$M_E = 204.7 \text{ kNm}$$

incremento per effetto P- $\delta$	1.129
$\gamma_{ov}$ per acciaio delle travi	1.25
incremento per sovraresistenza	1.286
incremento per eccentricità	1.20

$$M_{Ed} = 0 + 1.1 \times 1.25 \times 1.286 \times 1.2 \times 1.129 \times 204.7 = 490.2 \text{ kNm}$$

- Momento resistente

$$M_{Rd(N)} = 827.2 \text{ kNm} \text{ Ok}$$

# Verifica colonna, lato flessibile con gerarchia specifica per acciaio

- Il momento flettente deve essere calcolato con

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + 1.1 \gamma_{ov} \Omega M_{Ed,E}$$

- Momento flettente da sisma,  
da calcolo

$$M_E = 66.9 \text{ kNm}$$

incremento per effetto P- $\delta$	1.129
$\gamma_{ov}$ per acciaio delle travi	1.25
incremento per sovraresistenza	1.286
incremento per eccentricità	1.20

$$M_{Ed} = 0 + 1.1 \times 1.25 \times 1.286 \times 1.2 \times 1.129 \times 66.9 = 160.2 \text{ kNm}$$

- Momento resistente

$$M_{Rd(N)} = 348.9 \text{ kNm} \text{ Ok}$$



# Verifica colonna, lato rigido con gerarchia "tradizionale"

- Momento resistente della trave 266.9 kNm
- Momento resistente della colonna,  
lato rigido 827.2 kNm
- In un nodo tipico convergono due travi e due  
colonne

$$1.1 \sum M_{Rd,tra} = 587.2 \text{ kNm}$$

$$\sum M_{Rd,col} = 1654.4 \text{ kNm}$$

Ok

# Verifica colonna, lato flessibile con gerarchia "tradizionale"

- Momento resistente della trave 266.9 kNm
- Momento resistente della colonna,  
lato flessibile 348.9 kNm
- In un nodo tipico convergono due travi e due  
colonne

$$1.1 \sum M_{Rd,tra} = 587.2 \text{ kNm}$$

Ok

$$\sum M_{Rd,col} = 697.8 \text{ kNm}$$

con più margine  
che per CD "A"