

Corso di aggiornamento
Progettazione strutturale e
Norme Tecniche per le Costruzioni

**L'isolamento alla base nella progettazione sismica
e nell'intervento sull'esistente**

Spoletto
5-6 giugno 2015

**02 - Impostazione della carpenteria, dimensionamento
e verifica di massima**

Definizioni

- **Interfaccia d'isolamento**
la superficie di separazione sulla quale è attivo il sistema di isolamento
- **Sottostruttura**
la parte della struttura posta al di sotto dell'interfaccia del sistema d'isolamento
 - include le fondazioni
 - ha in genere deformabilità orizzontale trascurabile
 - È soggetta direttamente agli spostamenti imposti dal movimento sismico del terreno
- **Sovrastruttura**
la parte della struttura posta al di sopra dell'interfaccia d'isolamento e, perciò, isolata

Posizione del sistema di isolamento

Possibilità (per edificio senza piano interrato):

- Tra fondazione e solaio di base
Problemi: difficoltà di accesso
- Tra solaio di base e parte inferiore delle colonne del primo ordine
- A metà altezza dei pilastri del primo ordine
- In testa ai pilastri del primo ordine
Problemi: dettagli per scale, ascensori, tamponature primo livello

Posizione del sistema di isolamento

Possibilità (per edificio con piano seminterrato):

- In testa ai pilastri del primo ordine
Problemi: dettagli per scale, ascensori, tamponature primo livello

È la soluzione ottimale, specie se il seminterrato ha pareti che costituiscono una scatola rigida

Principi generali

da seguire nella progettazione

- La sottostruttura deve essere dimensionata in modo da assicurare un comportamento rigido, in modo da limitare gli effetti di spostamenti sismici differenziali
 - Lo spostamento orizzontale in condizioni sismiche deve essere minore di $1/20$ dello spostamento relativo del sistema di isolamento

Questo è facilmente garantito se gli isolatori sono posti al di sopra di un seminterrato con pareti scatolari e pilastri interni molto rigidi

- L'impalcato sovrastante deve essere un diaframma rigido

Principi generali

da seguire nella progettazione

- La sottostruttura e la sovrastruttura devono rimanere sostanzialmente in campo elastico
 - Il danneggiamento di elementi strutturali aumenta il periodo proprio della struttura e riduce l'efficacia dell'isolamento
- La sottostruttura deve rimanere preferibilmente in campo elastico
- La sovrastruttura deve essere progettata con riferimento alle prescrizioni relative alle strutture con bassa duttilità (DC "B"), con fattore di struttura $q=1.5$

Principi generali

da seguire nella progettazione

- La struttura isolata deve avere un periodo fondamentale nettamente maggiore rispetto a quello della corrispondente struttura a base fissa
- Nel progetto occorre tener conto della differenza di smorzamento del sistema di isolamento rispetto a quello della sovrastruttura
 - Per la sovrastruttura si usa di solito uno smorzamento del 5%
 - Il sistema di isolamento ha smorzamento nettamente maggiore (10-15%)

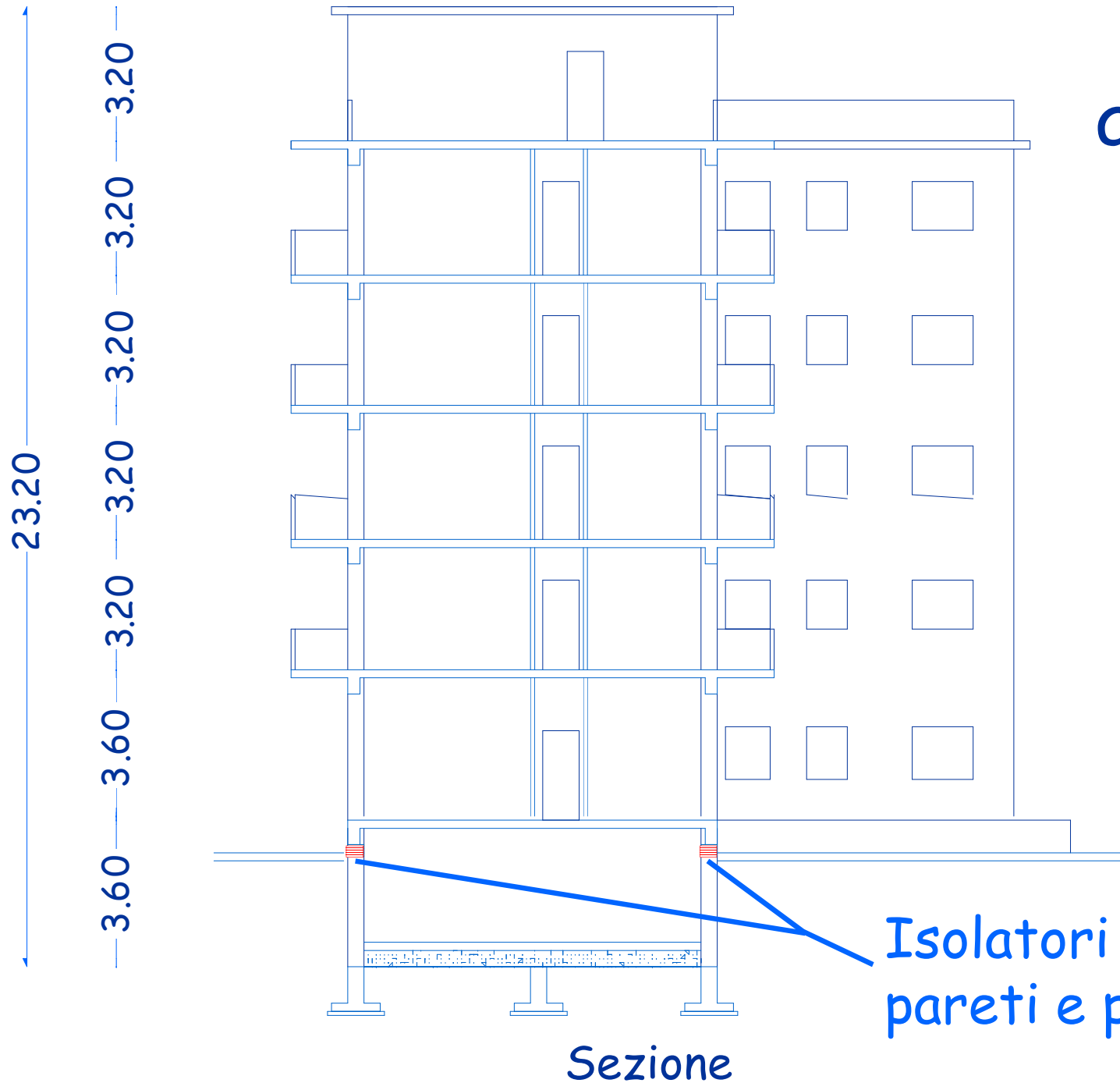
Esempio



Edificio analizzato

Sismicità media
= zona 2

Suolo C

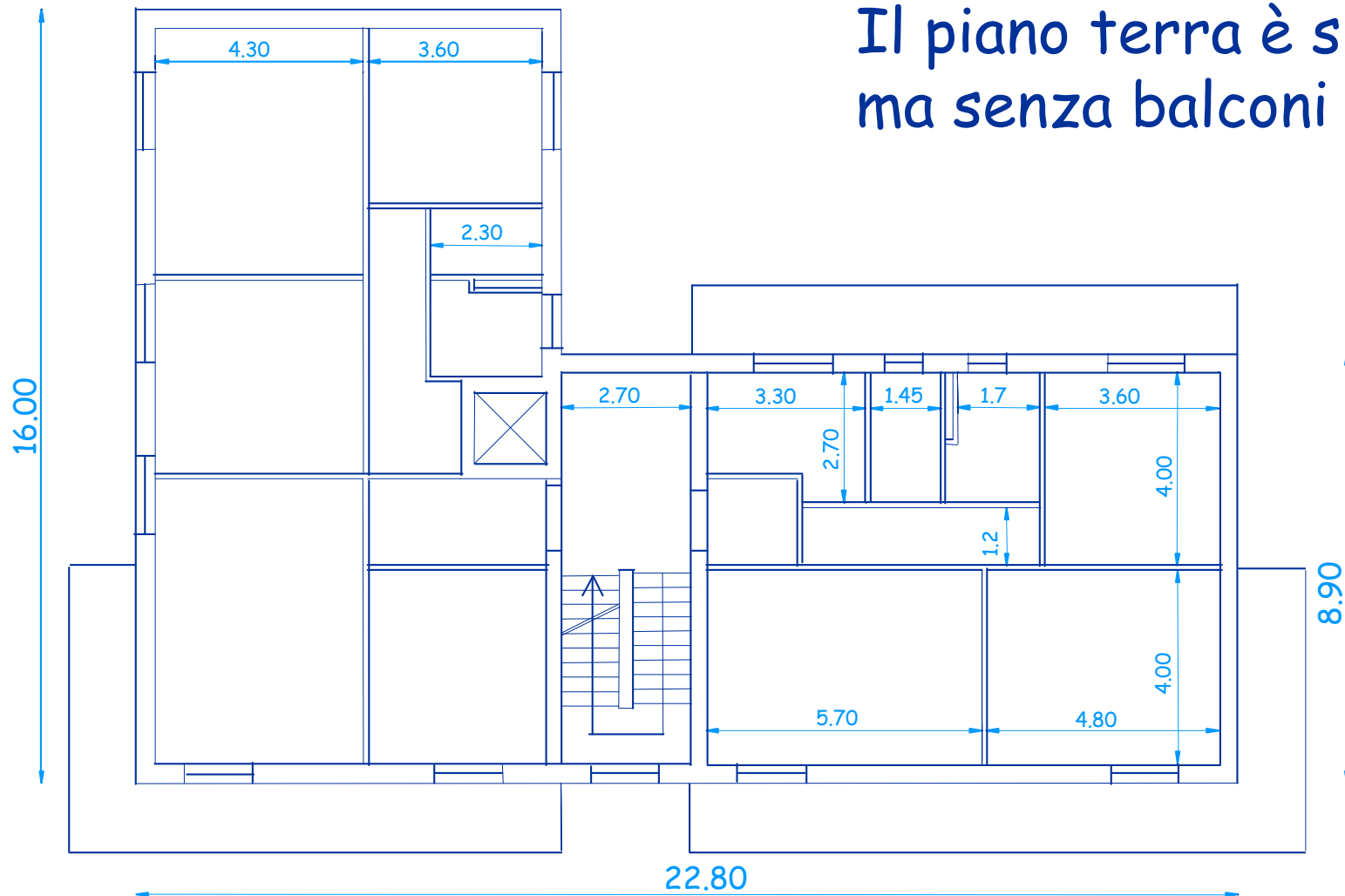


Impostazione della carpenteria

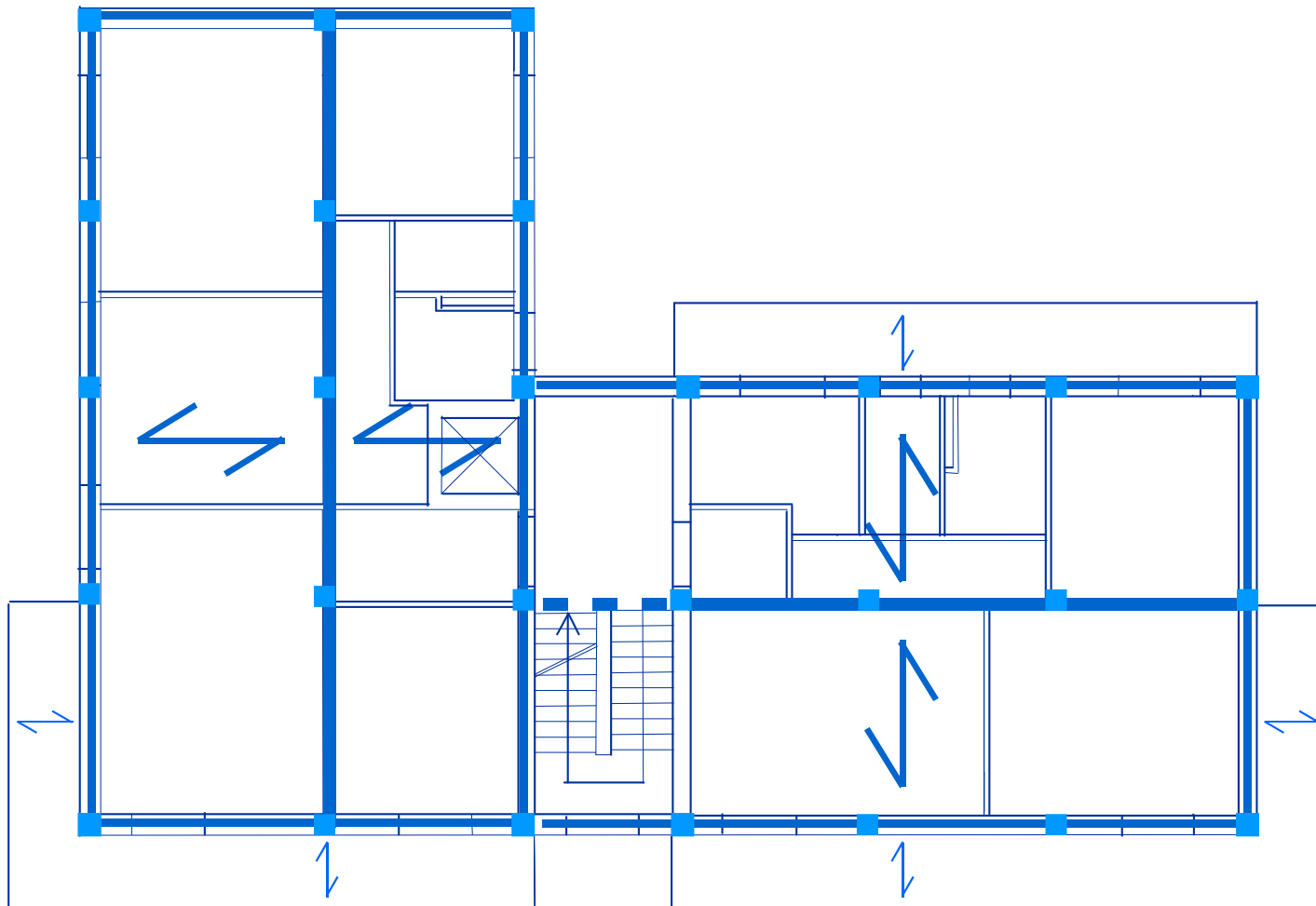
- Carpenteria pensata principalmente per carichi verticali
- Orientamento dei pilastri e aggiunta di travi emergenti per sopportare azioni orizzontali e conferire:
 - una buona rigidezza in entrambe le direzioni
 - una buona rigidezza rotazionale
- Cercare di realizzare in ogni caso una struttura rotazionalmente bilanciata

Piano tipo

Il piano terra è simile,
ma senza balconi

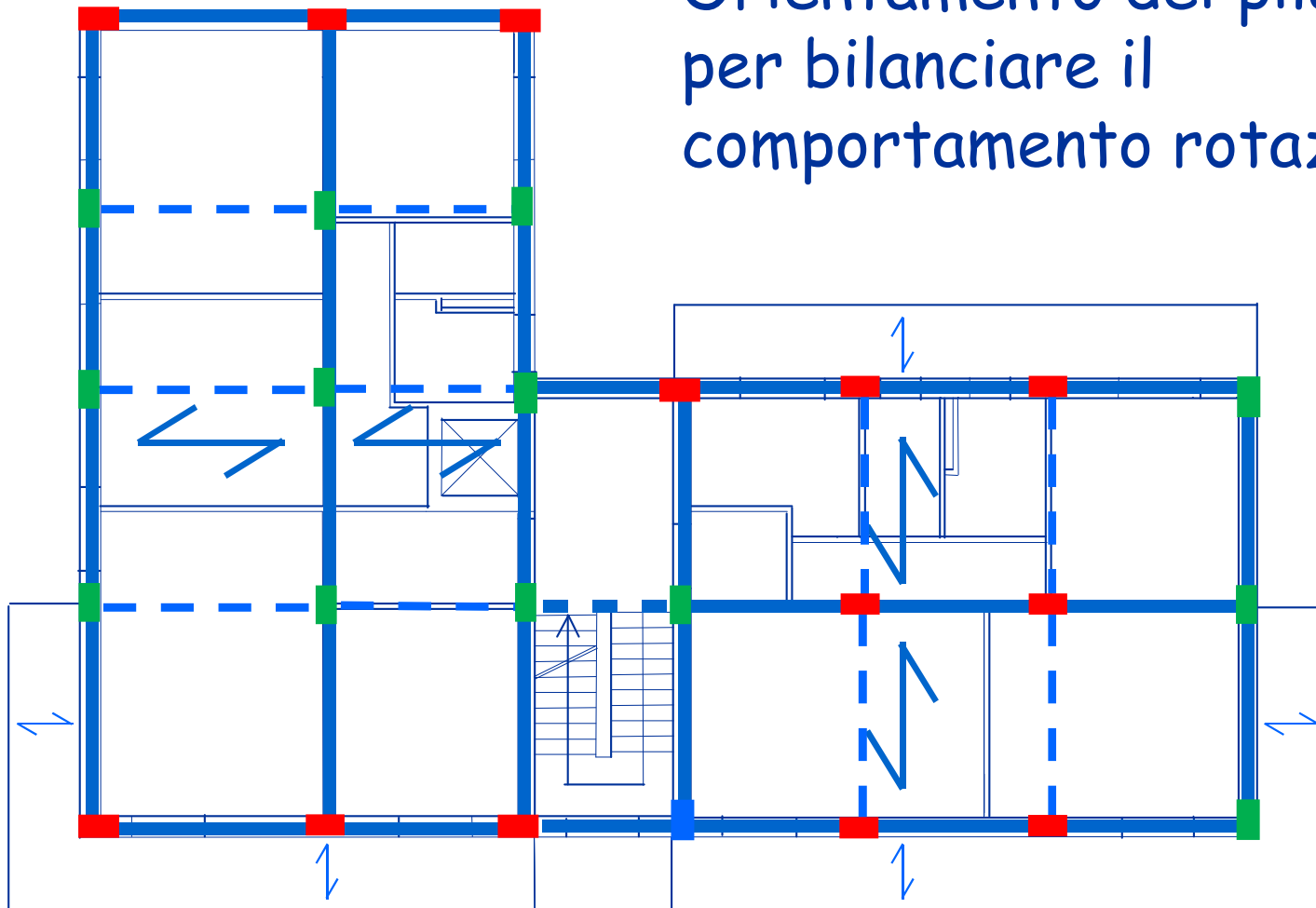


Impostazione della carpenteria pensando ai carichi verticali

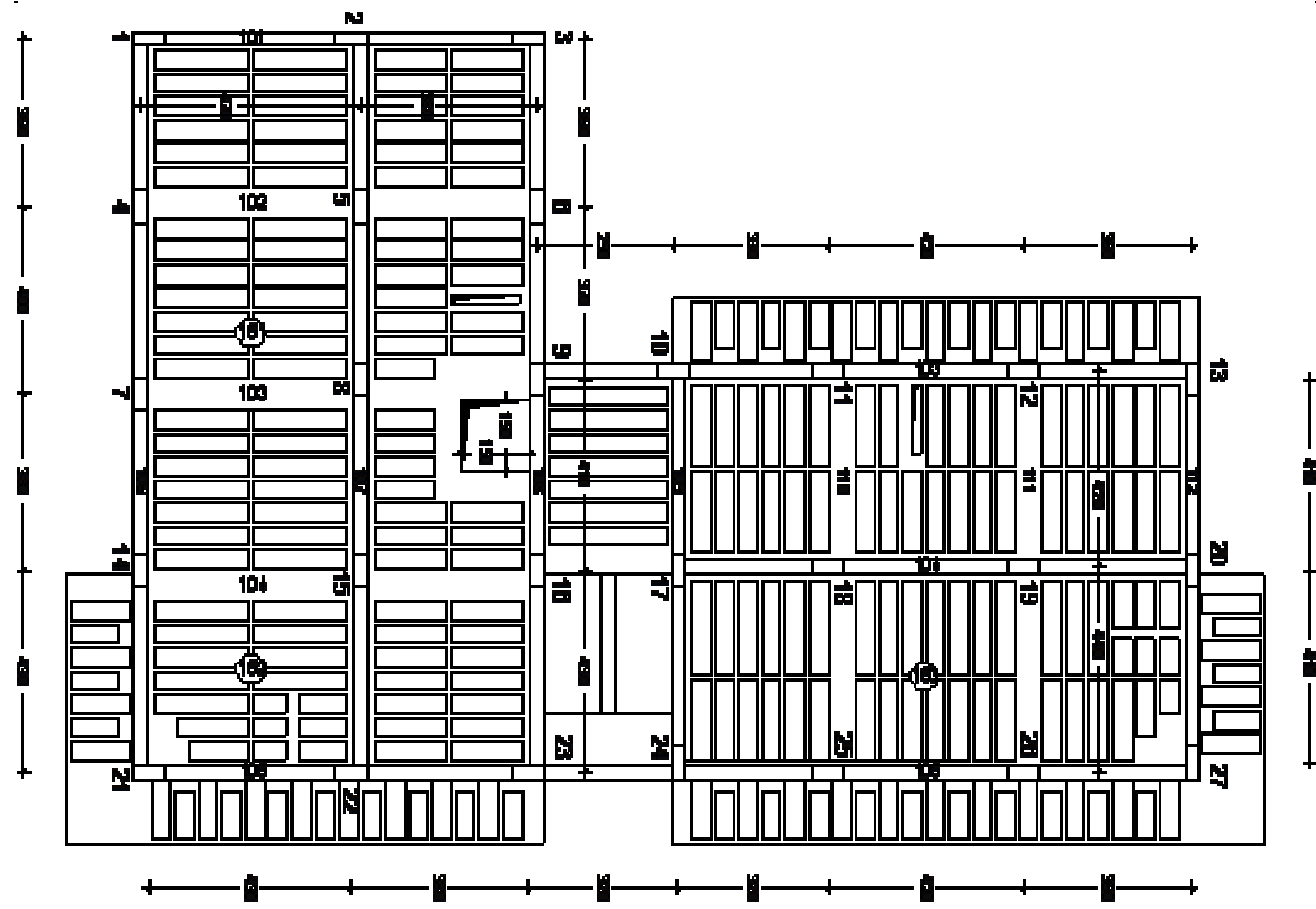


Impostazione della carpenteria pensando alle azioni orizzontali

Orientamento dei pilastri
per bilanciare il
comportamento rotazionale



Carpenteria del piano tipo



Dimensionamento

1. Stima carichi unitari, carichi verticali su travi e pilastri, sollecitazioni da carichi verticali in condizioni sismiche e non sismiche
2. Valutazione delle masse sismiche
3. Spettro di risposta elastica, fattore di struttura e spettro di progetto
4. Stima preliminare del periodo della struttura a base fissa e scelta del periodo della struttura isolata alla base
5. Previsione delle caratteristiche di sollecitazione nella struttura
6. Dimensionamento delle sezioni e controllo periodo

1. Carichi verticali

Si procede come ben noto

- Dimensionamento spessore solaio

Nell'esempio: $s = 22 \text{ cm}$

- Definizione carichi unitari
- Analisi dei carichi sulle travi
- Stima del momento flettente nelle travi ($q l^2 / 12$ o simile)

Nell'esempio, in assenza di sisma:

travi emergenti $M=100 \text{ kNm}$

travi a spessore $M=36 \text{ kNm}$

In presenza di sisma circa il 60% di questi valori

1. Carichi verticali

Si procede come ben noto

- Stima dello sforzo normale nei pilastri

Nell'esempio,

in assenza di sisma:

2° ordine $N=560\div 1570$ kN

1° ordine $N=660\div 1850$ kN

in presenza di sisma:

2° ordine $N=385\div 1045$ kN

1° ordine $N=455\div 1225$ kN

2. Masse

- In un edificio in cemento armato il peso delle masse di piano corrisponde in genere ad una incidenza media di $8\div 11 \text{ kN/m}^2$
 - Nell'esempio, una stima di prima approssimazione del peso delle masse a ciascun piano è stata ottenuta moltiplicando la superficie totale dell'impalcato per 10 kN/m^2 (9 kN/m^2 in copertura, per la minore incidenza delle tamponature)

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

3. Spettro di risposta

- Lo spettro si ricava a partire dai dati relativi al sito
Nell'esempio

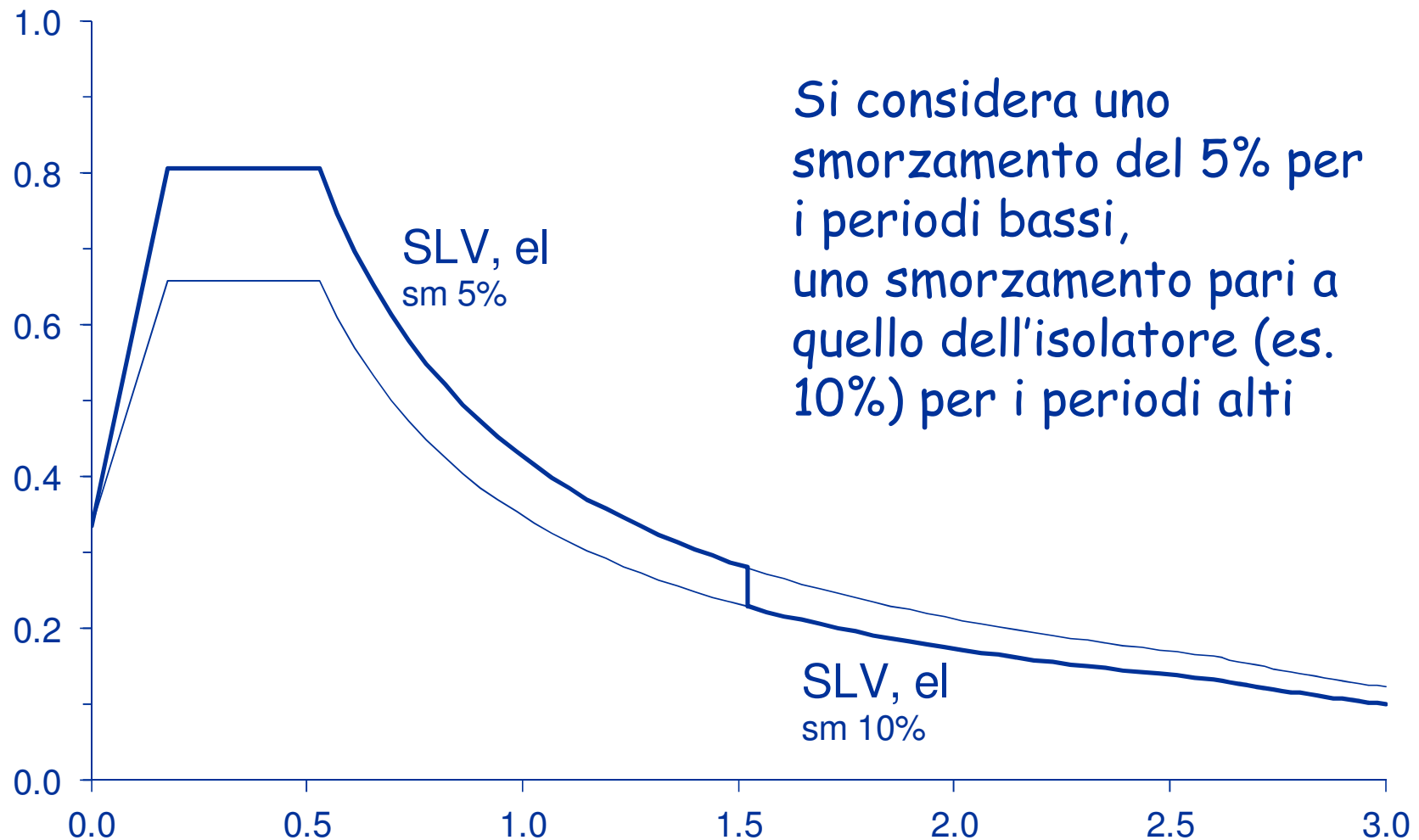
stato limite	SLO	SLD	SLV	SLC
T_r	30	50	475	975
a_g	0.061	0.082	0.250	0.339
F_o	2.360	2.316	2.410	2.445
T_C^*	0.280	0.292	0.360	0.383

Per suolo C e stato limite SLV si ha:

$$S = 1.335 \quad T_B = 0.177 \text{ s} \quad T_C = 0.53 \text{ s} \quad T_D = 2.60 \text{ s}$$

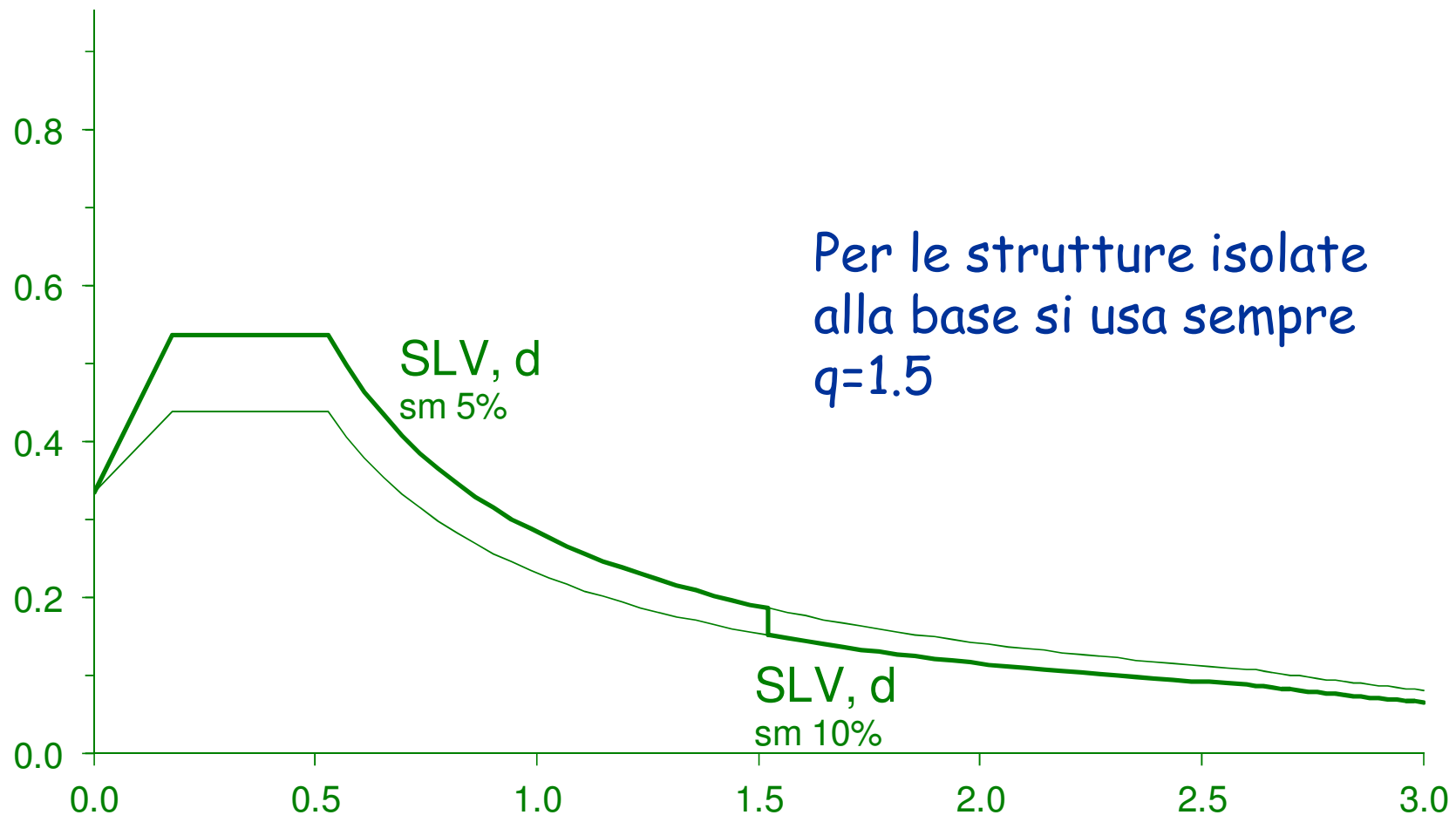
3. Spettro di risposta

- Lo spettro dipende anche dallo smorzamento



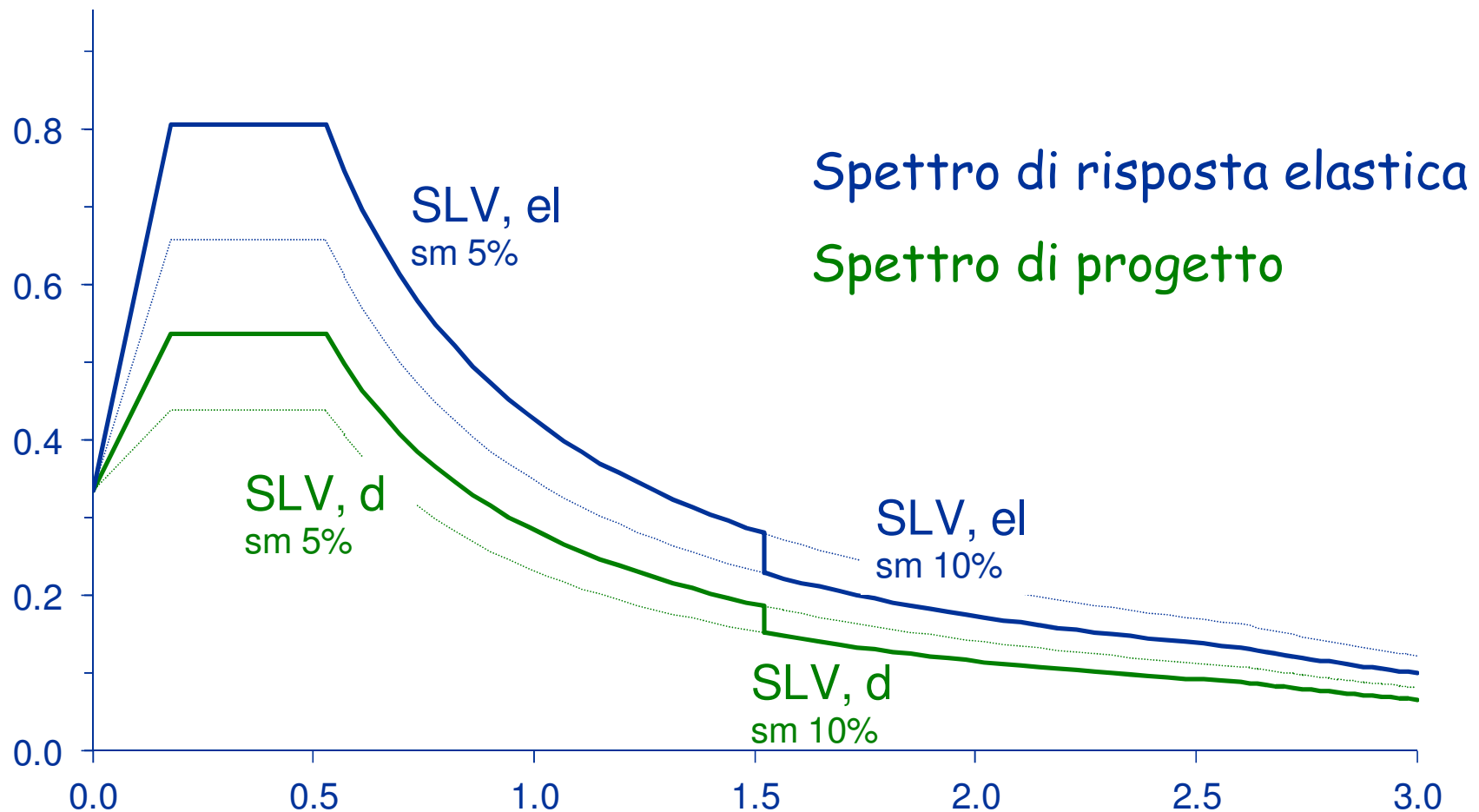
3. Spettro di risposta

- Nel progetto della struttura si considera lo spettro ridotto in funzione del fattore di struttura q



3. Spettro di risposta

- Nel progetto della struttura si considera lo spettro ridotto in funzione del fattore di struttura q



4. Periodi

- Occorre preliminarmente stimare il periodo fondamentale della struttura a base fissa
- In mancanza di altre indicazioni si può utilizzare la formula di normativa

$$T_1 = C_1 H^{3/4}$$

con $C_1 = 0.075$ per strutture intelaiate in c.a.

Per la presenza delle pareti del cantinato, userò
 $H = 16.00$ m

altezza dell'edificio dall'estradosso delle pareti del cantinato

$$T_1 = 0.60 \text{ s}$$

4. Periodi

- Occorre preliminarmente stimare il periodo fondamentale della struttura a base fissa

$$T_1 = 0.60 \text{ s}$$

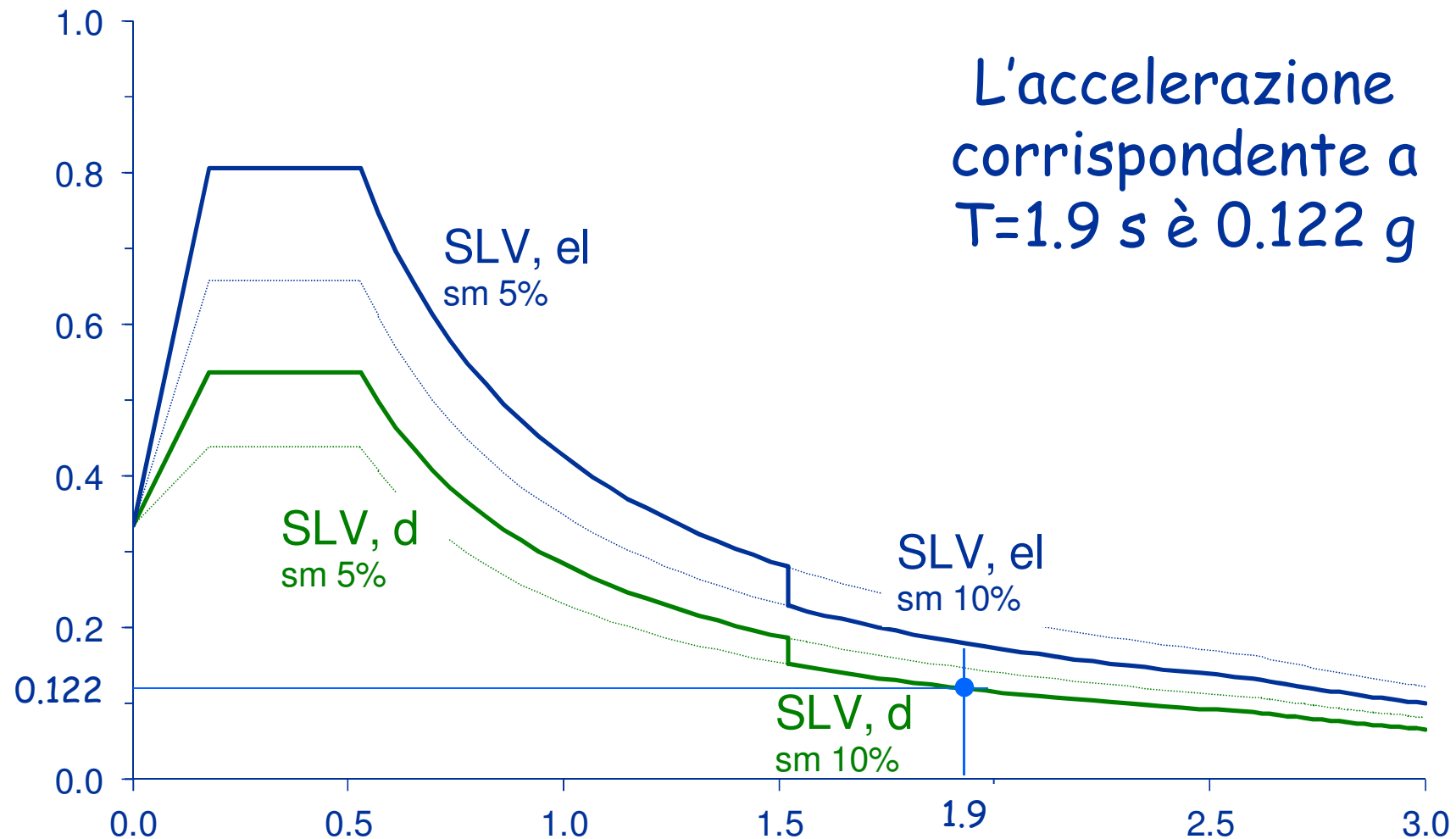
- Il periodo della struttura isolata deve essere almeno 3 volte quello della struttura a base fissa
- Assumo $T_{iso} = 1.9 \text{ s}$

5. Sollecitazioni nella struttura per effetto del sisma

- Il procedimento è analogo a quello che si usa per nuova progettazione
- La distribuzione delle forze è diversa (accelerazione costante, anziché variabile linearmente)

5. Sollecitazioni nella struttura per effetto del sisma

- Ordinata dello spettro di progetto



5. Sollecitazioni nella struttura per effetto del sisma

- Forze e tagli di piano
con $S_d = 0.122 g$ (nota: $\lambda=1$)

piano	W	F [kN]	V [kN]
6 + torrino	3419	418.3	418.3
5	3235	395.8	814.1
4	3235	395.8	1209.9
3	3235	395.8	1605.7
2	3235	395.8	2001.5
1	2632	322.0	2323.5
Totale	18991		

5. Sollecitazioni nella struttura per effetto del sisma

- Taglio e momento flettente nei pilastri
considero 13 pilastri

piano	V [kN]	V_{pil} [kN]	M_{pil} [kNm]
6 + torrino	418.3	32.2	51.5
5	814.1	62.6	100.2
4	1209.9	93.1	148.9
3	1605.7	123.5	197.6
2	2001.5	154.0	277.1
1	2323.5		

Incrementare per tener conto
di eccentricità accidentale

$$V_{pil} = \frac{V}{n_{pil}}$$

$$M_{pil} = V_{pil} \frac{h}{2}$$

5. Sollecitazioni nella struttura per effetto del sisma

- Momento flettente nelle travi
dall'equilibrio nel nodo

piano	V [kN]	M_{pil} [kNm]	M_{tra} [kNm]
6 + torrino	418.3	51.5	25.7
5	814.1	100.2	75.8
4	1209.9	148.9	124.6
3	1605.7	197.6	173.3
2	2001.5	277.1	237.4
1	2323.5		138.6

Incrementare per tener conto
di eccentricità accidentale

$$M_{tra,i} = \frac{M_{pil,i+1} + M_{pil,i}}{2}$$

6. Dimensionamento sezioni e controllo periodo

- In base ai momenti stimati
(da incrementare di 1.1÷1.2 per eccentricità accidentale)

piano	M_{pil} [kNm]	pilastro	M_{tra} [kNm]	trave
6 + torrino	51.5	30x70	25.7	30x50
5	100.2	30x70	75.8	30x50
4	148.9	30x70	124.6	30x50
3	197.6	30x70	173.3	30x60
2	277.1	30x70	237.4	30x60
1			138.6	30x60

tenendo conto che per carichi verticali $M_{tra}=58.2$ kNm

6. Dimensionamento sezioni e controllo periodo

- Per valutare il periodo della struttura a base fissa occorre stimare la rigidezza
- Ho usato l'approccio "per singola tipologia di elemento"

$$\text{rigidezza} = \frac{12 E I_p}{L_p^3} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{E I_p / L_p}{E I_{t,\text{sup}} / L_t} + \frac{E I_p / L_p}{E I_{t,\text{inf}} / L_t} \right)}$$

Esempio:

pilastro 30x70 con 2 travi emergenti 30x60 sup e 30x60 inf
(con $h_{\text{pil}} = 3.20 \text{ m}$, $l_{\text{tra}} = 4.00 \text{ m}$)

$k = 33.14 \text{ kN/mm}$

6. Dimensionamento sezioni e controllo periodo

- Per valutare il periodo della struttura a base fissa occorre stimare la rigidezza
- Riepilogo rigidezze singole tipologie, ai vari piani

	1		2		3		4	
	pilastro di coltello		pilastro di coltello		pilastro di coltello		pilastro di coltello	
ordine	2 travi eme. sup/inf		1 trave eme. sup/inf		2 travi sp. sup/inf		1 trave sp. sup/inf	
6	22.33		12.59		4.68		2.40	
5	22.33		12.59		4.68		2.40	
4	27.36		16.04		4.68		2.40	
3	33.14		19.90		4.68		2.40	
2	33.14		19.90		4.68		2.40	

	6		7		8		9	
	pilastro di piatto		pilastro di piatto		pilastro di piatto		pilastro di piatto	
ordine	2 travi eme. sup/inf		1 trave eme. sup/inf		2 travi sp. sup/inf		1 trave sp. sup/inf	
6	11.15		8.04		3.87		2.16	
5	11.15		8.04		3.87		2.16	
4	12.18		9.19		3.87		2.16	
3	13.31		10.51		3.87		2.16	
2	13.31		10.51		3.87		2.16	

6. Dimensionamento sezioni e controllo periodo

- Per valutare il periodo della struttura a base fissa occorre stimare la rigidezza
- Rigidezze singoli telai, ai vari piani

telaio	1		y =	0.15	m					
ordine	6									
tipologia pilastri		2	1	1	6	1	1	7	k tot	
rigidezza		12.59	22.33	22.33	11.15	22.33	22.33	8.04	121.09	
ordine	5									
tipologia pilastri		2	1	1	6	1	1	7	k tot	
rigidezza		12.59	22.33	22.33	11.15	22.33	22.33	8.04	121.09	
ordine	4									
tipologia pilastri		2	1	1	6	1	1	7	k tot	
rigidezza		16.04	27.36	27.36	12.18	27.36	27.36	9.19	146.83	
ordine	3									
tipologia pilastri		2	1	1	6	1	1	7	k tot	
rigidezza		19.90	33.14	33.14	13.31	33.14	33.14	10.51	176.28	
ordine	2									
tipologia pilastri		2	1	1	6	1	1	7	k tot	
rigidezza		19.90	33.14	33.14	13.31	33.14	33.14	10.51	176.28	

eccetera

6. Dimensionamento sezioni e controllo periodo

- Per valutare il periodo della struttura a base fissa occorre stimare la rigidezza
- Rigidezze totali, ai vari piani

Telai in direzione x						
complessivo						
		pil.eq.	k tot	ktot y	y Gk	y CM
ordine	6					
rigidezza		15.07	336.51	1972.4	5.86	5.76
ordine	5					
rigidezza		15.07	336.51	1972.4	5.86	5.70
ordine	4					
rigidezza		14.77	403.93	2373.8	5.88	5.68
ordine	3					
rigidezza		14.52	481.08	2831.8	5.89	5.67
ordine	2					
rigidezza		14.52	481.08	2831.8	5.89	5.67

Per sisma in
direzione x la
struttura è
bilanciata

6. Dimensionamento sezioni e controllo periodo

- Per valutare il periodo della struttura a base fissa occorre stimare la rigidezza
- Rigidezze totali, ai vari piani

Telai in direzione y						
complessivo						
		pil.eq.	k tot	ktot x	x Gk	x CM
ordine	6					
rigidezza		15.95	356.04	2987.9	8.39	10.14
ordine	5					
rigidezza		15.95	356.04	2987.9	8.39	10.24
ordine	4					
rigidezza		15.71	429.76	3607.8	8.39	10.28
ordine	3					
rigidezza		15.52	514.18	4314.3	8.39	10.30
ordine	2					
rigidezza		15.52	514.18	4314.3	8.39	10.31

Per sisma in direzione y la struttura è fortemente sbilanciata (2 m)

Questo è meno importante per strutture isolate, ma comunque conta

6. Dimensionamento sezioni e controllo periodo

- Dalle rigidezze si ricavano gli spostamenti e quindi il periodo, con la formula di Rayleigh

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N m_i u_i^2}{\sum_{i=1}^N F_i u_i}}$$

Rigidezze con approccio per singolo pilastro				direzione x		distribuzione costante			
Forze orizzontali			Sd	0.122	(valore arbitrario)			Fh	1927.7
piano	W	Fi	Vi [kN]	k [kN/mm]	dr [mm]	u [mm]	m [t]	m u ²	F u
6 + torino	3419	418.3	418.3	336.51	1.24	14.00	348.5	68.3	5857
5	3235	395.8	814.1	336.51	2.42	12.76	329.8	53.7	5050
4	3235	395.8	1209.9	403.93	3.00	10.34	329.8	35.3	4093
3	3235	395.8	1605.7	481.08	3.34	7.34	329.8	17.8	2907
2	2632	322.0	1927.7	481.08	4.01	4.01	268.3	4.3	1290
Totale	15756	1927.7						179.4	19197
							T	0.607	s

6. Dimensionamento sezioni e controllo periodo

- Dalle rigidezze si ricavano gli spostamenti e quindi il periodo, con la formula di Rayleigh

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N m_i u_i^2}{\sum_{i=1}^N F_i u_i}}$$

Rigidezze con approccio per singolo pilastro				direzione y		distribuzione costante			
Forze orizzontali			Sd	0.122				Fh	1638.6
piano	W	Fi	Vi [kN]	k [kN/mm]	dr [mm]	u [mm]	m [t]	m u ²	F u
6 + torino	3419	418.3	418.3	356.04	1.17	13.15	348.5	60.3	5500
5	3235	395.8	814.1	356.04	2.29	11.97	329.8	47.3	4739
4	3235	395.8	1209.9	429.76	2.82	9.69	329.8	30.9	3834
3	3235	395.8	1605.7	514.18	3.12	6.87	329.8	15.6	2720
2	2632	322.0	1927.7	514.18	3.75	3.75	268.3	3.8	1207
Totale	15756	1927.7						157.8	18001
							T	0.588	s

6. Dimensionamento sezioni e controllo periodo

- Il periodo della struttura a base fissa è effettivamente prossimo a 0.6 s
- Di conseguenza va bene un periodo della struttura isolata pari a 1.9 s