

**Università di Trieste**  
**Dipartimento di Ingegneria e Architettura**

**Corso di**  
**Progettazione e riabilitazione**  
**Sismica delle Strutture**

**Modulo 1: Progettazione strutturale in zona sismica**

**PROGETTO DI STRUTTURE ISOLATE: ESEMPIO**

**Prof. Ing. Natalino Gattesco**

# GEOMETRIA EDIFICIO

## *1. Geometria (FASE 1)*

Il livello di imposta della fondazione è posto a -2.5m rispetto al primo solaio, per realizzare un piano interrato che permetta l'ispezione e la manutenzione dei dispositivi di isolamento.

In alternativa, si potrebbe approfondire ulteriormente il livello di imposta così da utilizzare (come garage, cantinato, etc.) il piano interrato, consentendo l'accesso, la manutenzione e l'ispezione e la sostituzione dei dispositivi.

Le fondazioni dell'edificio sono costituite da un grigliato di travi rovesce.

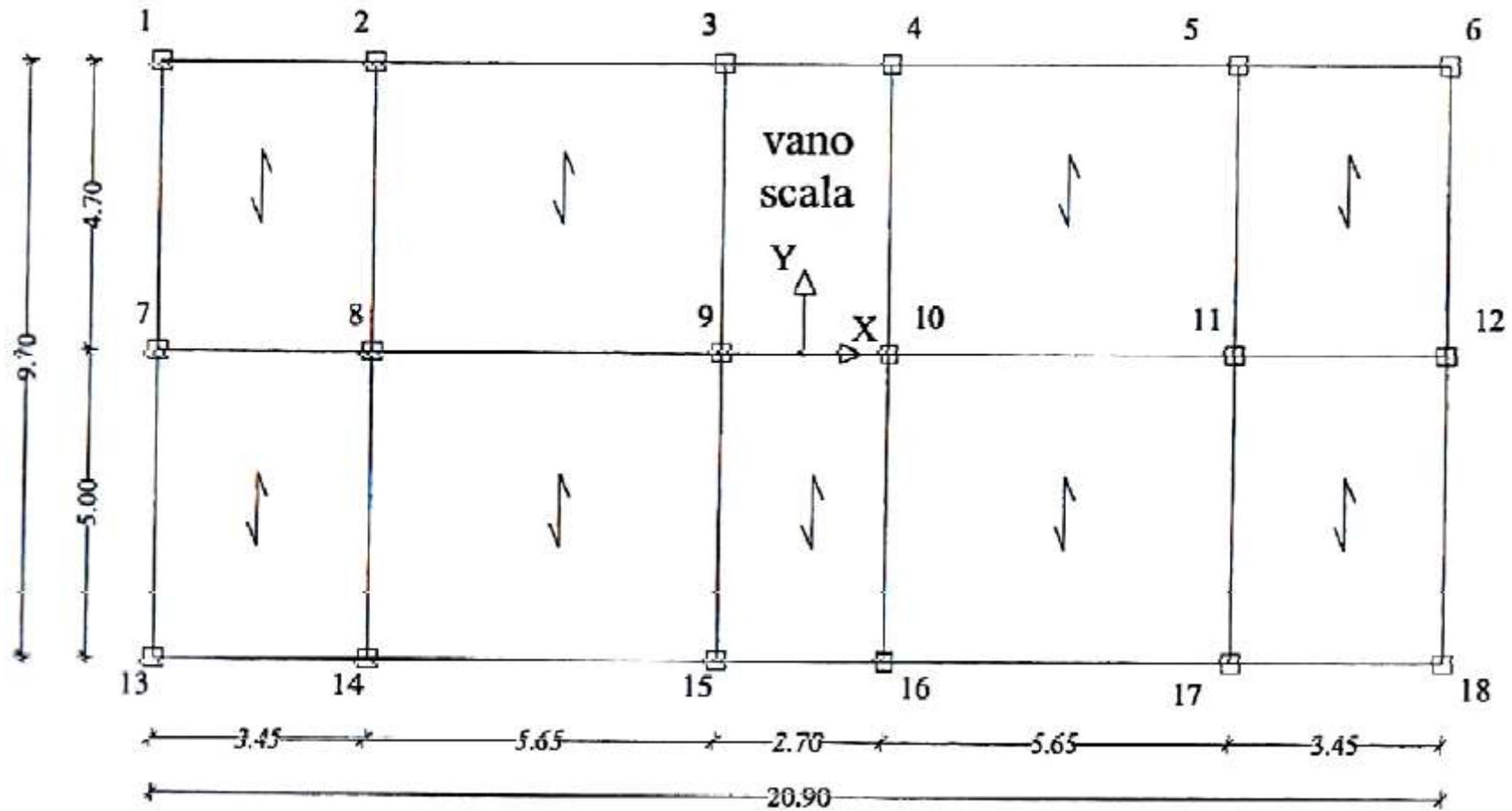
Le travi principali in direzione X sono tutte emergenti, comprese quelle interne.

Le travi secondarie esterne in direzione Y sono emergenti, per irrigidire torsionalmente la struttura, così come sono emergenti quelle adiacenti al vano scala (3-9 e 4-10) e le travi di interpiano in direzione X. Quelle interne in direzione Y sono a spessore, per esigenze architettoniche.

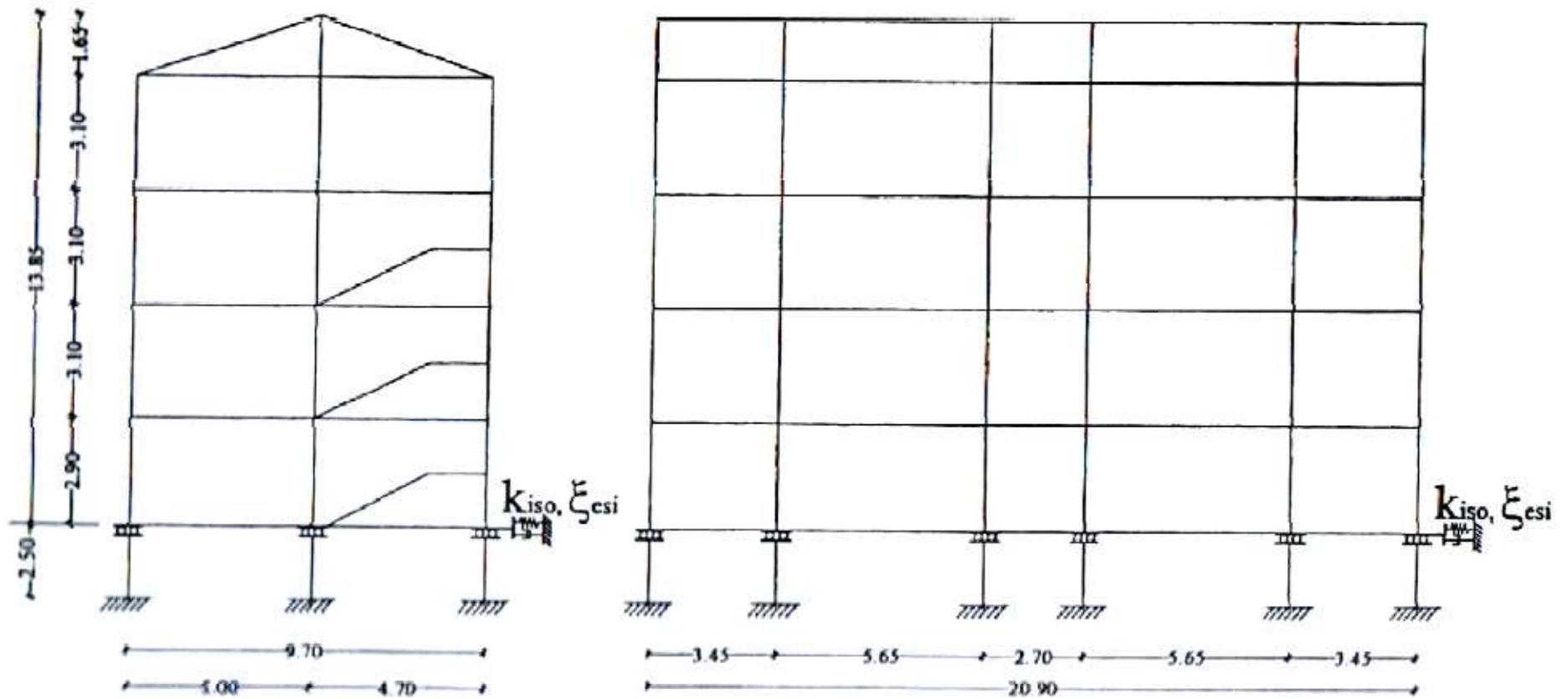
La struttura risulta simmetrica rispetto all'asse Y e quasi simmetrica anche rispetto ad X.

# PIANTA TIPO

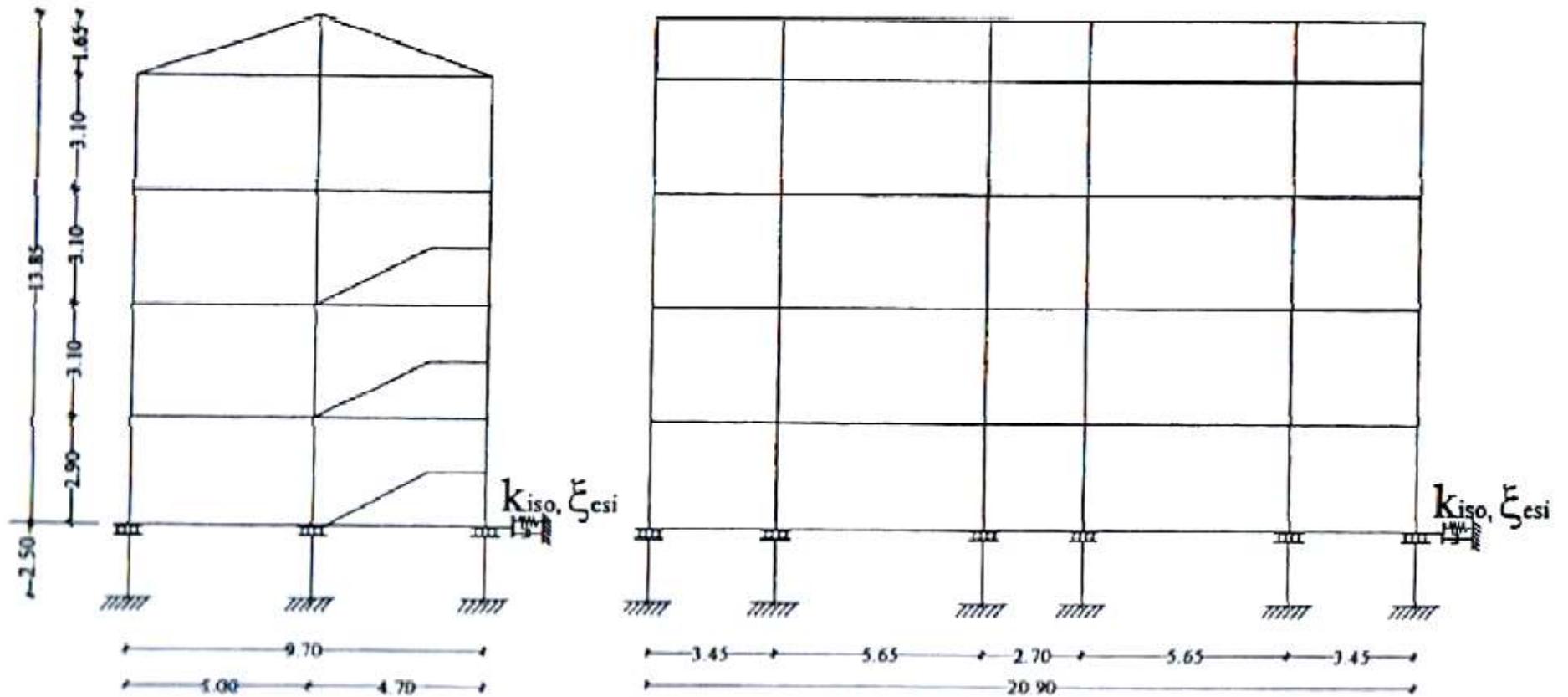
*4 Piani di cui 3 Abitabili – 6 Alloggi – Sottotetto non abitabile a falde*



# SEZIONI



# SEZIONI



# MATERIALI

## *2. Materiali e Dettagli Costruttivi (FASE 2)*

### *2.1. Caratteristiche dei Materiali*

Si assume come calcestruzzo una classe di resistenza C20/25

La resistenza di calcolo a compressione  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 20 / 1.5 = 13.33$  MPa

La resistenza di calcolo a trazione per flessione  $f_{ctd} = 1.2 \times 0.30 f_{ck}^{2/3} = 1.2 \times 0.30 \times 20^{2/3} = 2.65$  MPa

Il modulo elastico istantaneo  $E_{cm} = 22000 (f_{cm}/10)^{0.3} = 22000 ((f_{ck} + 8)/10)^{0.3} = 29962$  MPa.

Si assume come acciaio per c.a. un B450 C con  $f_{y, nom} = 450$  MPa.

La resistenza di calcolo  $f_{yd} = f_{y, nom} / 1.15 = 450 / 1.15 = 391.30$  MPa

Il modulo elastico  $E = 206000$  MPa

Tali caratteristiche dovranno essere controllate su provini di materiale durante l'esecuzione dell'opera in ottemperanza ai punti 11.2 e 11.3 delle NTC 08.

# CARICHI

## 3. Carichi ed Azioni (FASE 2)

### 3.1. Carichi

Peso del solaio del piano tipo:

• <b>carichi fissi</b>		<b>2.82</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
soletta in c.a. (spessore di 4 cm)	$0.04\text{m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 1\text{m} \cdot 1\text{m}$	1.00	“
travetti	$2 \cdot (0.10 \cdot 0.16)\text{m}^2 \cdot 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 1\text{m}$	0.80	“
laterizi	$2 \cdot (0.40 \cdot 0.16)\text{m}^2 \cdot 8 \text{ kN/m}^3 \cdot 1\text{m}$	1.02	“
• <b>carichi permanenti</b>		<b>2.80</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
massetto e pavimento		1.50	“
intonaco di calce (1.5 cm)		0.30	“
incidenza tramezzi		1.00	“
• <b>TOTALE</b>		<b>5.62</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
• <b>sovraccarichi variabili</b>	locali abitazione	<b>2.00</b>	“
	balconi	<b>4.00</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>

# CARICHI

## 3. Carichi ed Azioni (FASE 2)

### 3.1. Carichi

Peso del solaio di sottotetto:

• <b>carichi fissi</b>		<b>2.82</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
soletta in c.a. (spessore di 4 cm)	$0.04m \cdot 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 1m \cdot 1m$	1.00	“
travetti	$2 \cdot (0.10 \cdot 0.16)m^2 \cdot 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 1m$	0.80	“
laterizi	$2 \cdot (0.40 \cdot 0.16) m^2 \cdot 8 \text{ kN/m}^3 \cdot 1m$	1.02	“
• <b>carichi permanenti</b>		<b>0.30</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
intonaco di calce (1.5 cm)		0.30	“
• <b>TOTALE</b>		<b>3.12</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
• <b>sovraccarichi variabili</b>	sottotetti accessibili (per sola manutenzione)	<b>1.00</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>

Peso del solaio di copertura:

• <b>carichi fissi</b>		<b>3.25</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
soletta in c.a. (spessore di 4 cm) in proiezione orizzontale	$0.04m \cdot 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 1m \cdot 1m / \cos 30^\circ$	1.15	“
travetti	$2 \cdot (0.10 \cdot 0.16)m^2 \cdot 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 1m / \cos 30^\circ$	0.92	“
laterizi	$2 \cdot (0.40 \cdot 0.16) m^2 \cdot 8 \text{ kN/m}^3 \cdot 1m / \cos 30^\circ$	1.18	“
• <b>carichi permanenti</b>		<b>2.08</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
massetto e coppi	$1.50 / \cos 30^\circ$	1.73	“
intonaco di calce (1.5 cm)	$0.30 / \cos 30^\circ$	0.35	“
• <b>TOTALE</b>		<b>5.33</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
• <b>carico neve</b>	(Zona I - 620 m slm - $\alpha = 30^\circ$ )	<b>2.86</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>

Tamponature perimetrali

• <b>Senza aperture</b>	$(0.2m \cdot 8 \text{ kN/m}^2 + 0.60 \text{ kN/m}^2) \cdot 3m$	<b>6.60</b>	<b>kN/m</b>
• <b>Con aperture</b>	$(0.2m \cdot 8 \text{ kN/m}^2 + 0.60 \text{ kN/m}^2) \cdot 3m \cdot 80\%$	<b>5.28</b>	<b>kN/m</b>

# AZIONI

## 3. Carichi ed Azioni (FASE 2)

Le verifiche agli stati limite ultimi o di esercizio devono essere effettuate per la combinazione dell'azione sismica con le altre azioni:

$$G_1 + G_2 + E + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj}$$

Le masse da prendere in considerazione nell'analisi della struttura sono pari a:

$$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj}$$

Categoria/Azione variabile	$\psi_{2j}$
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0.3
Categoria C – Ambienti suscettibili di affollamento	0.6
Categoria H - Coperture	0.0
Vento	0.0
Neve (a quota > 1000m s.l.m.)	0.2
Variazione termica	0.0

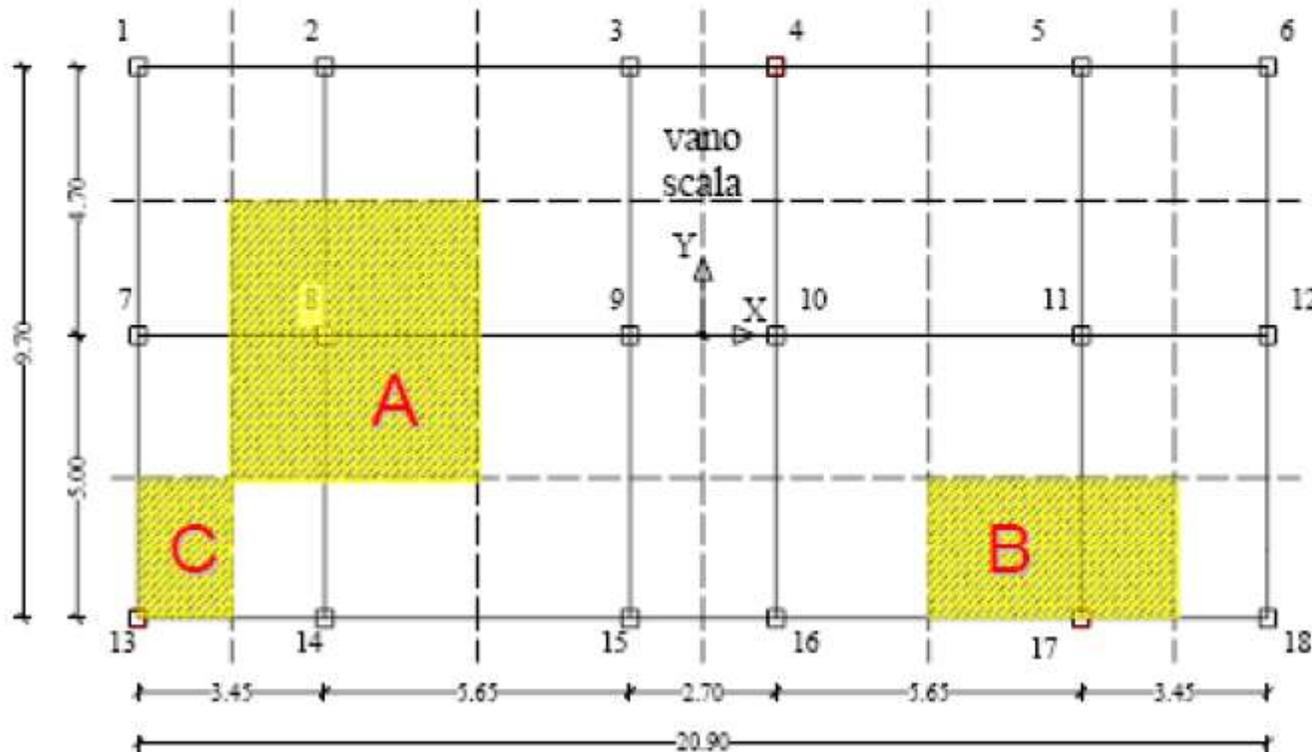
	Peso	Massa
<b>Piano</b>	W(kN)	W/g (t)
Sottostruttura	384.6	39.2
Base	2124.8	216.6
I Piano	2211.2	225.4
II Piano	2220.0	226.3
III Piano	2215.1	225.8
Sottotetto	2038.3	207.8
Copertura	833.1	84.9
Totale	12027.1	1226.0

# STRUTTURA

## 4. Predimensionamento (FASE 4)

### 4.1. Struttura

- Orientamento stabilito, compatibilmente con i vincoli architettonici, in base a considerazioni sul comportamento dinamico della struttura;
- Tensione di progetto di riferimento  $\sigma_m = f_{cd}/2 = 13.3 / 2 = 6.65 \text{ MPa}$



### *Pilastrini tipo:*

A: 30 x 50

B: 30 x 30

C: 30 x 30

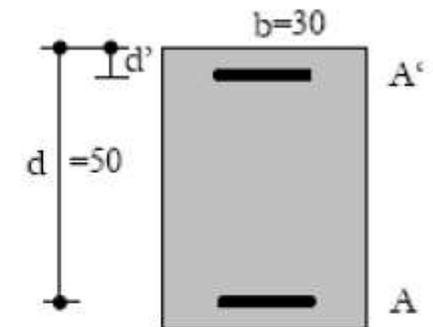
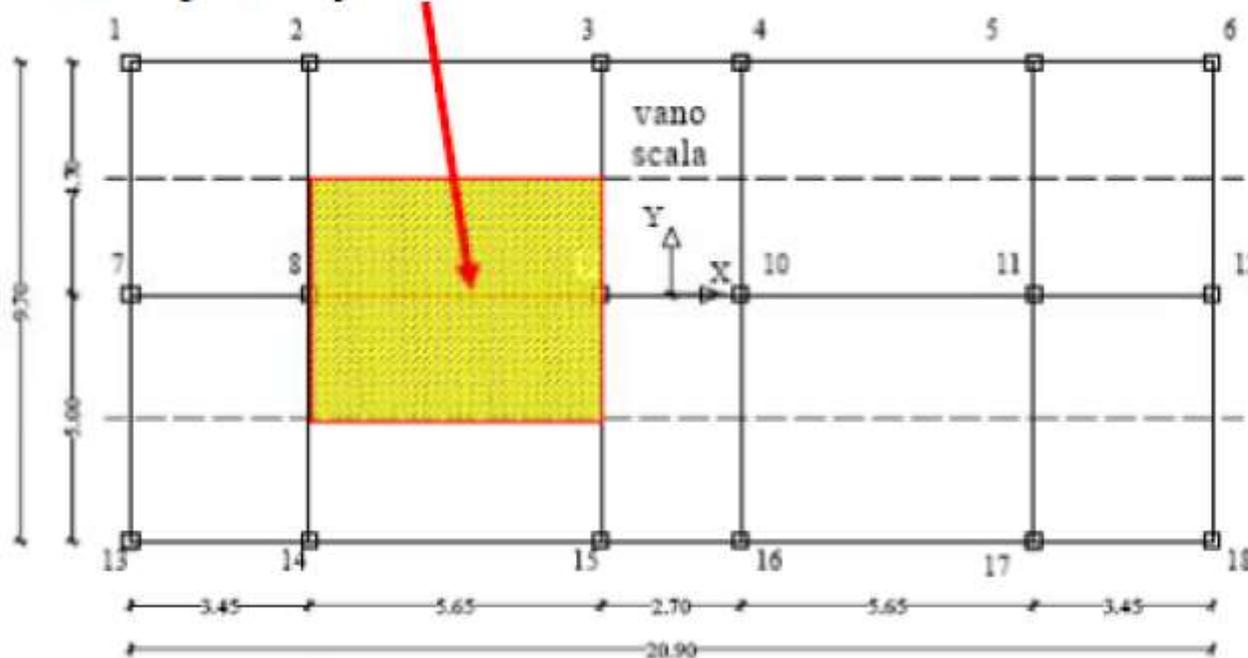
# STRUTTURA

## 4. Predimensionamento (FASE 4)

### 4.1. Struttura

In questa fase si individua una sola tipologia di trave principale, con riferimento alla condizione più gravosa, considerando la sollecitazione di flessione; il carico di progetto derivante dal solaio:

$$Q_{\text{solaio}} = \gamma_g G_k + \gamma_q Q_i$$

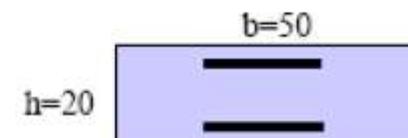


-  $\mu = \frac{A'}{A} = 0.6;$

-  $\lambda = \frac{d'}{d} = 0.07;$

-  $b = 30 \text{ cm};$

Le travi secondarie a spessore sono dimensionate con la stessa procedura, considerando una fascia di influenza di solaio pari a 1m. Si ottiene una sezione pari 50x20cm.



# SOTTOSTRUTTURA

## 4. Predimensionamento (FASE 4)

### 4.2. Sottostruttura

Le strutture del piano di posa degli isolatori e del piano su cui appoggia la sovrastruttura devono essere dimensionate in modo da assicurare un comportamento rigido nel piano suddetto, così da limitare gli effetti di spostamenti sismici differenziali (punto 7.10.4.3 delle NTC 2008, Controllo degli spostamenti sismici differenziali del terreno).

La condizione precedente si considera soddisfatta se un diaframma rigido costituito da un solaio in c.a. oppure una griglia progettata tenendo conto di possibili fenomeni di instabilità è presente sia al di sopra che al di sotto del sistema di isolamento e se i dispositivi del sistema di isolamento sono fissati ad entrambi i diaframmi o direttamente attraverso elementi verticali il cui spostamento orizzontale in condizioni sismiche deve risultare minore di 1/20 dello spostamento relativo del sistema di isolamento. Si adotta conservativamente, essendo in fase di predimensionamento:

$$K_f \geq 40 K_{is} \quad (\text{dispositivo } k_H = 700 \text{ kN/m})$$

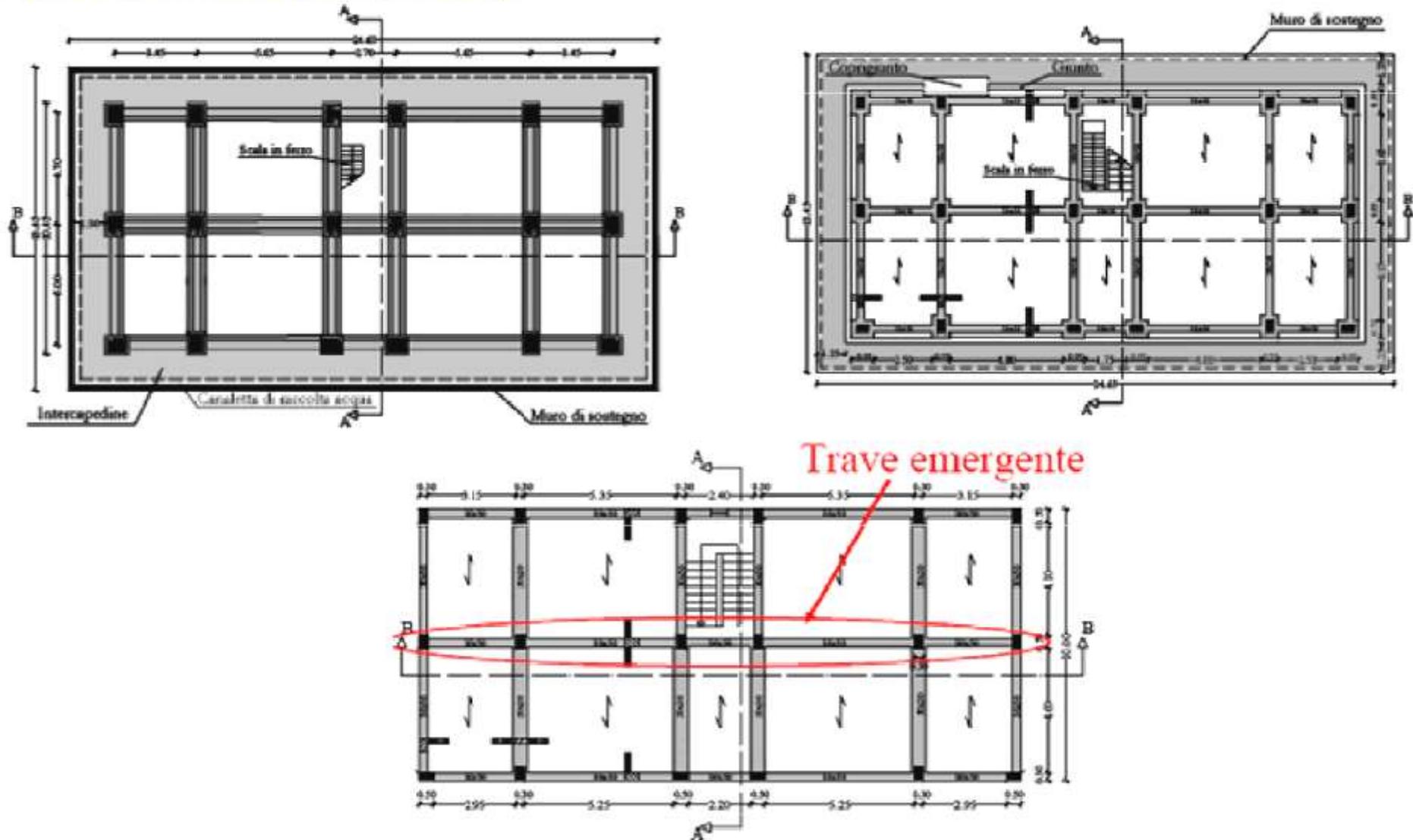
$$K_f = \frac{3 \cdot E \cdot \left( \frac{b \cdot h^3}{12} \right)}{l^3} \geq 28000 \text{ kN/m} \Rightarrow h \geq \sqrt[3]{\frac{4 \cdot l^3 \cdot K_f}{E \cdot b}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1.2^3 \cdot 28000}{29962000 \cdot 0.75}} = 0.20 \text{ m}$$

Si adottano baggioli in c.a. con dimensioni 0.75x0.95x1.20 m, sovrabbondanti rispetto alle esigenze di rigidità.

---

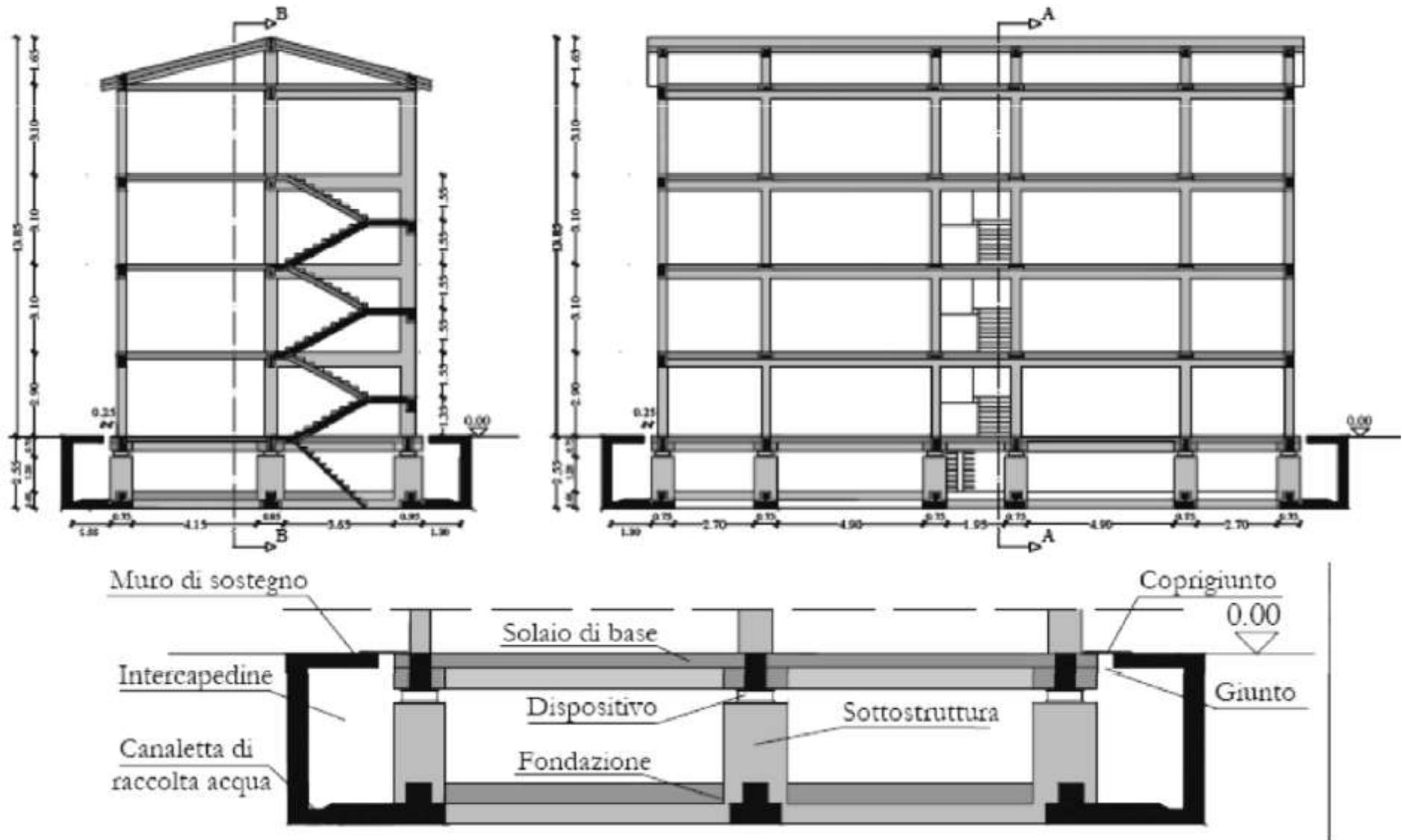
# SOTTOSTRUTTURA E STRUTTURA

## 4. Predimensionamento (FASE 4)



# SOTTOSTRUTTURA E STRUTTURA

## 4. Predimensionamento (FASE 4)



# SISTEMA DI ISOLAMENTO

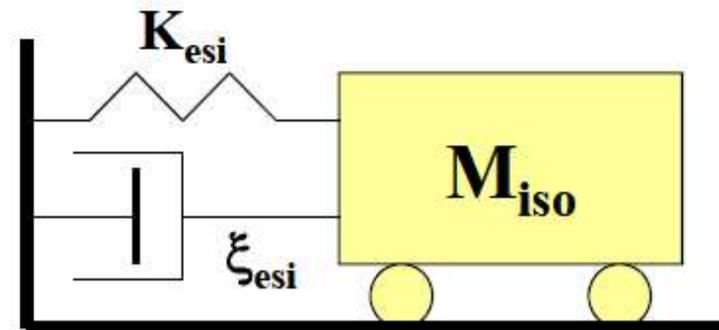
## 4. Predimensionamento (FASE 4)

### 4.3. Sistema d'isolamento: Scelta del periodo e dello smorzamento

- Scelta tipologia sistema di isolamento: isolatori elastomerici (con comportamento assimilabile a visco-elastico lineare);
  - Periodo proprio  $T$ ;
  - Smorzamento strutturale.
- } → **Rigidezza del sistema**  
**Rigidezza del singolo isolatore**

Mediante analisi statica lineare si valutano i livelli di forza e gli spostamenti derivanti dalle scelte effettuate:

<b>Caso 1) Base fissa</b>	$T_{bf} = 0.54 \text{ s}$	
<b>Caso 2) Base isolata</b>	$T_{iso} = 2.00 \text{ s}$	$\xi_{esi} = 10\%$
<b>Caso 3) Base isolata</b>	$T_{iso} = 2.00 \text{ s}$	$\xi_{esi} = 20\%$
<b>Caso 4) Base isolata</b>	$T_{iso} = 2.50 \text{ s}$	$\xi_{esi} = 10\%$
<b>Caso 5) Base isolata</b>	$T_{iso} = 2.50 \text{ s}$	$\xi_{esi} = 20\%$



# SISTEMA DI ISOLAMENTO

## 4. Predimensionamento (FASE 4)

### 4.3. Sistema d'isolamento: Scelta del periodo e dello smorzamento

- Per confrontare le sollecitazioni di progetto della sovrastruttura, occorre fare riferimento alle sollecitazioni calcolate con lo spettro di progetto allo SLU (in particolare SLV) definito al punto 3.2.3.5 delle NTC 2008 (Spettro di progetto per gli stati limite ultimi).
- Nella fase di predimensionamento le azioni sismiche sono considerate agenti separatamente nelle due direzioni principali.

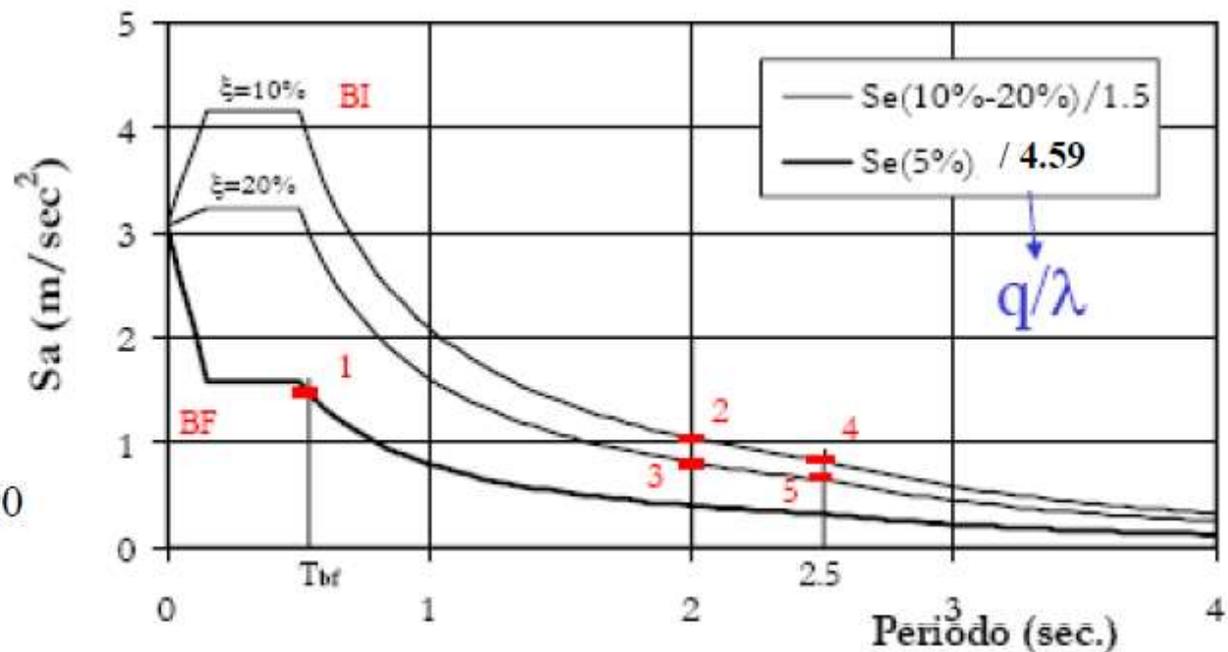
#### Struttura Isolata:

$$q = 1.15 \cdot \frac{\alpha_u}{\alpha_1} \quad \frac{\alpha_u}{\alpha_1} = 1.3 \quad q \cong 1.5$$

#### Struttura a base fissa:

$$q = q_0 \cdot K_R$$

$$q = 3.0 \cdot \frac{\alpha_u}{\alpha_1} \cdot 1.0 = 3.0 \cdot 1.3 \cdot 1.0 = 3.90$$



# SISTEMA DI ISOLAMENTO

## 4. Predimensionamento (FASE 4)

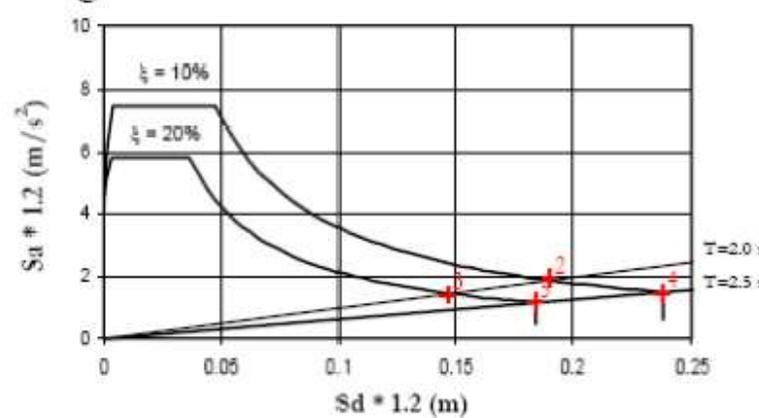
### 4.3. Sistema d'isolamento: Scelta del periodo e dello smorzamento

$$\text{Taglio} = M_1 \cdot S_d(T) \cdot \lambda = M_1 \cdot a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \frac{F_o}{q} \cdot \left( \frac{T_c}{T} \right) \cdot \lambda$$

Valida per periodi compresi  
tra  $T_C$  e  $T_D$

Caso	Configurazione	T (sec)	$\xi$ (%)	$M_1$ (t)	$S \cdot a_g$ ( $m/s^2$ )	$\eta$	q	$\lambda$	Taglio (kN)	
1	Base Fissa (BF)	0.54	5	970.2	3.06	1.00	3,9	0.85	1401	
2	Base Isolata (BI)	2.00	10	970.2	3.06	0.82	1.5	1.00	998	-28.7%
3	Base Isolata (BI)	2.00	20	970.2	3.06	0.63	1.5	1.00	767	-45.2%
4	Base Isolata (BI)	2.50	10	970.2	3.06	0.82	1.5	1.00	798	-43.0%
5	Base Isolata (BI)	2.50	20	970.2	3.06	0.63	1.5	1.00	613	-56.2%

Ai fini della progettazione degli isolatori elastomerici si considera lo spettro allo SLU (SLC)



# SISTEMA DI ISOLAMENTO

## 4. Predimensionamento (FASE 4)

### Sistema di isolamento: distribuzione delle rigidità

Scelta del periodo e dello smorzamento:

Caso	Conf.	$T_{is}$ (sec)	$\xi$ (%)	$M_{iso}$ (t)	$S \cdot a_g$ (m/s <sup>2</sup> )	$\eta$	$S_e(T, \xi)_{SLC}$ (m/s <sup>2</sup> )	$d_{dc2}$ (mm)
2	Base Isolata (BI)	2.00	10	1186.8	3.06	0.82	1.88	190.8
3	Base Isolata (BI)	2.00	20	1186.8	3.06	0.63	1.45	146.6
4	Base Isolata (BI)	2.50	10	1186.8	3.06	0.82	1.50	238.5
5	Base Isolata (BI)	2.50	20	1186.8	3.06	0.63	1.16	183.3

I valori ottenuti in fase di progettazione non tengono conto di:

- Contemporaneità delle azioni sismiche nelle due direzioni;
- Effetti torsionali dovuti ad eccentricità accidentali.

} **+ 20÷30%**

Valutazione e distribuzione delle rigidità:

$$T_{is} \Rightarrow K_{esi} = \left( \frac{2\pi}{T_{is}} \right)^2 \cdot M$$

Caso	Conf.	$T_{is}$ (sec)	$\xi$ (%)	$M_{iso}$ (t)	$K_{esi}$ (kN/m)
2	BI	2.00	10	1186.8	11713.2
3	BI	2.00	20	1186.8	11713.2
4	BI	2.50	10	1186.8	7496.5
5	BI	2.50	20	1186.8	7496.5

# SISTEMA DI ISOLAMENTO

## 4. Predimensionamento (FASE 4)

### Sistema di isolamento: distribuzione delle rigidità

Applicabilità analisi statica lineare:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i K_{iso,i} = K_{esi} \\ \text{Eccentricità massa - rigidità} = d(R;G) < 3\% \text{ della dimensione trasversale alla direzione considerata} \end{array} \right.$$

$$\text{Per } T_{is} = 2.0 \text{ sec} \rightarrow K_i = 11713.2 / 18 = 650.7 \text{ kN/m}$$

$$\text{Per } T_{is} = 2.5 \text{ sec} \rightarrow K_i = 7496.5 / 18 = 416.5 \text{ kN/m}$$

#### Baricentro delle masse

$$\left\{ \begin{array}{l} x_G = \frac{\sum m_j \cdot x_j}{\sum m_j} = 0.00m \\ y_G = \frac{\sum m_j \cdot y_j}{\sum m_j} = -0.07m \end{array} \right.$$

#### Baricentro delle rigidità (isolamento)

$$\left\{ \begin{array}{l} x_R = \frac{\sum k_i \cdot x_i}{\sum k_i} = 0.00m \\ y_R = \frac{\sum k_i \cdot y_i}{\sum k_i} = -0.10m \end{array} \right.$$

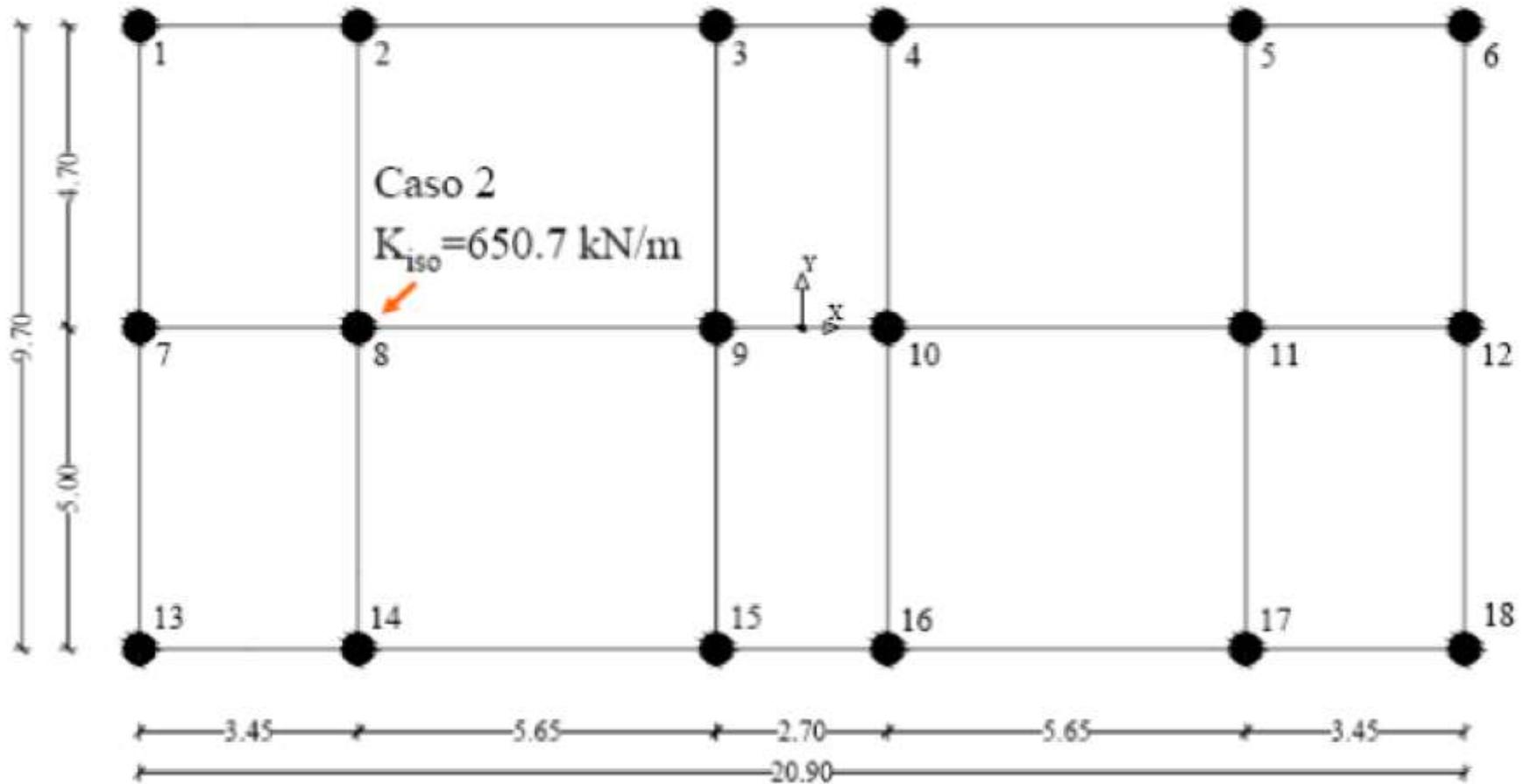
$$\left\{ \begin{array}{l} d(x_R, x_G) = |0.00 - 0.00| = 0.00m < 0.627m \\ d(y_R, y_G) = |-0.10 - (-0.07)| = 0.03m < 0.291m \end{array} \right.$$

# SOTTOSTRUTTURA

## 4. Predimensionamento (FASE 4)

### 4.2. Sottostruttura

Distribuzione delle rigidezze

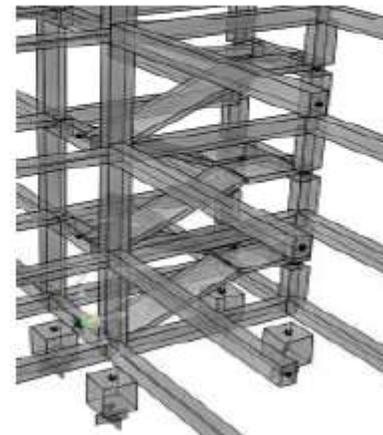
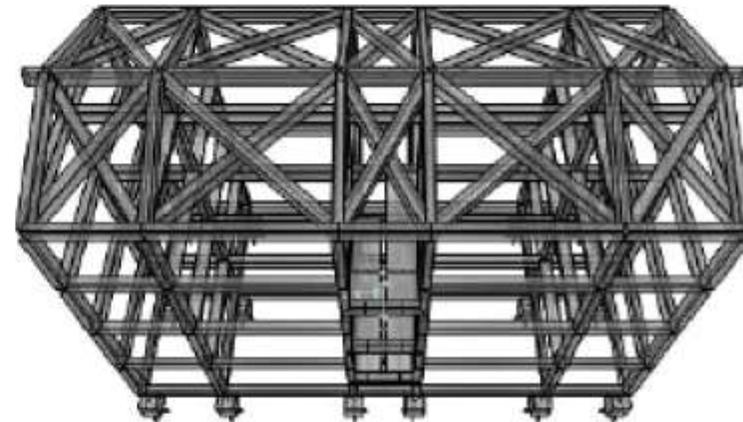
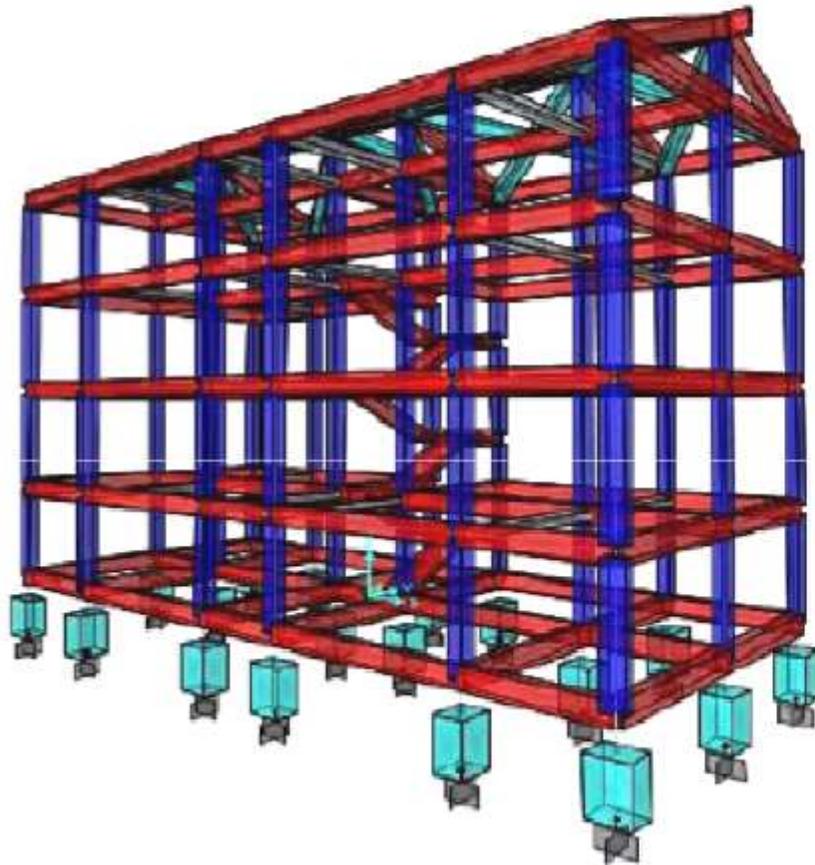


# MODELLAZIONE

## *5. Modellazione ed Analisi Strutturale (FASE 5)*

### *5.1. Modellazione*

La modellazione della struttura è stata eseguita secondo i criteri riportati al punto 7.2.6 (Criteri di modellazione della struttura e azione sismica) delle NTC 2018 utilizzando il software SAP2000.



# NORME TECNICHE

## 7. PROGETTAZIONE PER AZIONI SISMICHE

### 7.10.5. MODELLAZIONE E ANALISI STRUTTURALE

#### 7.10.5.3. Analisi

##### 7.10.5.3.1. Analisi lineare statica

#### IPOTESI DI CALCOLO

Per le strutture dotate di isolamento alla base, il **metodo** dell'**analisi statica** può essere applicato se la struttura isolata soddisfa i requisiti seguenti:

- a) Il **sistema** di **isolamento** può essere **modellato** come **lineare**, in accordo con il precedente §7.10.5.2.;
- b) Il **periodo equivalente**  $T_{is}$  della costruzione isolata ha un **valore compreso** fra  $3 \cdot T_{bf}$  e **3,0 sec**, in cui  $T_{bf}$  è il periodo della sovrastruttura assunta a base fissa, stimato con un'espressione approssimata;
- c) La **rigidezza verticale** del sistema di isolamento di isolamento  $K_v$  è almeno **800 volte** più grande della **rigidezza equivalente orizzontale** del sistema di isolamento  $K_{esi}$ ;
- d) Il **periodo** in direzione **verticale**  $T_v$ , calcolato come  $T_v = 2\pi\sqrt{M/K_v}$  è **inferiore** a **0,1sec**;
- e) **Nessun isolatore** risulta **in trazione** per l'effetto combinato dell'azione sismica e dei carichi verticali;
- f) Il sistema resistente all'azione sismica possiede una **configurazione strutturale regolare in pianta**, come è definita al §7.2.2.

# NORME TECNICHE

## 7. PROGETTAZIONE PER AZIONI SISMICHE

### 7.10.5. MODELLAZIONE E ANALISI STRUTTURALE

#### 7.10.5.3. Analisi

##### 7.10.5.3.1. Analisi lineare statica

#### IPOTESI DI CALCOLO

Ai requisiti da a) a f) si aggiungono, per le costruzioni civili e industriali, i seguenti:

- La **sovrastuttura** ha un' **altezza non maggiore di 20m** e **non più di 5 piani**;
- La **sottostruttura** può essere considerata **infinitamente rigida** ovvero il suo **periodo** proprio è **non maggiore di 0,05sec**;
- La **dimensione maggiore in pianta** della **sovrastuttura** è **inferiore a 50m**;
- In ciascuna delle direzioni principali orizzontali l' **eccentricità totale** (esclusa quella accidentale) tra il **centro di rigidezza** del sistema di isolamento e la **proiezione verticale** del **centro di massa non è superiore al 3%** della **dimensione** della **sovrastuttura trasversale** alla **direzione orizzontale** considerata.

Se le condizioni dette sono rispettate il calcolo può essere svolto su due modelli separati, per ciascuno dei quali si assume il valore corrispondente dello smorzamento, uno per la sovrastuttura più il sistema d'isolamento ed uno per la sottostruttura. Su quest'ultimo agiscono le forze ricavate dal primo modello e le forze d'inerzia prodotte direttamente dal moto del terreno.

La **forza orizzontale complessiva** applicata **al sistema d'isolamento**, da ripartire tra gli elementi strutturali costituenti la sottostruttura in proporzione alle rigidezze dei corrispondenti dispositivi d'isolamento, è pari a:

# NORME TECNICHE

## 7. PROGETTAZIONE PER AZIONI SISMICHE

### 7.10.5. MODELLAZIONE E ANALISI STRUTTURALE

#### 7.10.5.3. Analisi

##### 7.10.5.3.1. Analisi lineare statica

$$F = M \cdot S_e(T_{is}, \xi_{esi})$$

dove  $S_e(T_{is}, \xi_{esi})$  è l'accelerazione spettrale definita nel §3.2.3 per la categoria di suolo di fondazione appropriata e  $K_{esi,min}$  è la rigidezza equivalente minima in relazione alla variabilità delle proprietà meccaniche del sistema di isolamento, per effetto dei fattori definiti nel §7.10.5.1.

Lo **spostamento** del **centro di rigidezza** dovuto all'azione sismica  $\mathbf{d}_{dc}$  deve essere calcolato, in ciascuna direzione orizzontale, mediante la seguente espressione:

$$d_{dc} = \frac{M \cdot S_e(T_{is}, \xi_{esi})}{K_{esi,min}}$$

Le **forze orizzontali** da applicare **a ciascun livello** della **sovrastuttura** debbono essere calcolate, in ciascuna direzione orizzontale, mediante la seguente espressione:

$$f_j = m_j \cdot S_e(T_{is}, \xi_{esi})$$

in cui  $m_j$  è la massa del livello  $j$ -esimo.

---

# NORME TECNICHE

## 7. PROGETTAZIONE PER AZIONI SISMICHE

### 7.10.5. MODELLAZIONE E ANALISI STRUTTURALE

#### 7.10.5.3. Analisi

##### 7.10.5.3.1. Analisi lineare statica

Gli **effetti** della **torsione** d'insieme della **sovrastuttura** sui **singoli dispositivi** di isolamento possono essere messi in conto **amplificando** in ciascuna direzione gli **spostamenti** e le **forze** precedentemente definiti mediante i fattori  $\delta_{xi}$  e  $\delta_{yi}$ , da applicare, rispettivamente, alle azioni in direzione x e y:

$$\delta_{xi} = 1 + \frac{e_{tot,y}}{r_y^2} y_i \quad \delta_{yi} = 1 + \frac{e_{tot,x}}{r_x^2} x_i$$

in cui:

$(x_i, y_i)$  sono le coordinate del dispositivo rispetto al centro di rigidezza;

$e_{tot\ x,y}$  è l'eccentricità totale nella direzione x, y, inclusa quella accidentale;

$r_{x,y}$  sono le componenti, in direzione x e y del raggio torsionale del sistema di isolamento, date dalle seguenti espressioni:

$$r_x^2 = \sum (x_i^2 \cdot K_{yi} + y_i^2 \cdot K_{xi}) / \sum K_{yi} \quad r_y^2 = \sum (x_i^2 \cdot K_{yi} + y_i^2 \cdot K_{xi}) / \sum K_{xi}$$

$K_{xi}$ ,  $K_{yi}$  sono le rigidezze equivalenti del dispositivo i-esimo rispettivamente nelle direzioni x e y.

# NORME TECNICHE

## *7. PROGETTAZIONE PER AZIONI SISMICHE*

### *7.10.5. MODELLAZIONE E ANALISI STRUTTURALE*

#### *7.10.5.3.2. Analisi lineare dinamica*

Per le costruzioni con isolamento alla base l'**analisi dinamica lineare** è ammessa quando risulta possibile **modellare elasticamente** il **comportamento** del **sistema di isolamento**, nel rispetto delle condizioni di cui al §7.10.5.2.

Per il sistema complessivo, formato dalla sottostruttura, dal sistema d'isolamento e dalla sovrastruttura, si assume un comportamento elastico lineare. Il **modello** deve **comprendere** sia la **sovrastuttura** che la **sottostruttura**, qualora il sistema di **isolamento non sia immediatamente al di sopra** delle **fondazioni**.

L'analisi può essere svolta mediante **analisi modale con spettro di risposta** o mediante **integrazione al passo delle equazioni del moto**, eventualmente previo disaccoppiamento modale, considerando un numero di modi tale da portare in conto anche un'aliquota significativa della massa della sottostruttura, se inclusa nel modello.

Nel caso si adotti l'analisi modale con spettro di risposta questa deve essere svolta secondo quanto specificato in §7.3.3.1., salvo diverse indicazioni fornite nel presente paragrafo.

# NORME TECNICHE

## 7. PROGETTAZIONE PER AZIONI SISMICHE

### 7.10.5. MODELLAZIONE E ANALISI STRUTTURALE

#### 7.10.5.3.2. Analisi lineare dinamica

Le due **componenti orizzontali** dell'azione sismica si considerano in generale **agenti simultaneamente**, adottando ai fini della combinazione gli effetti, le regole riportate in §7.3.3.1.

La **componente verticale** deve essere messa in conto nei casi previsti in §7.2.1 e, in ogni caso quando il **rapporto** tra la **rigidezza verticale** del sistema di isolamento  $K_v$  e la **rigidezza equivalente**  $K_{esi}$  risulti **inferiore a 800**. In tali casi si avrà cura che la massa eccitata dai modi in direzione verticale considerati nell'analisi sia significativa.

Lo spettro elastico definito in §3.2.3.2 va ridotto per tutto il campo di periodi  $T \geq 0.8T_{is}$ , assumendo per il coefficiente riduttivo  $\eta$  il valore corrispondente al coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi_{esi}$  del sistema di isolamento.

Nel caso di analisi lineare con integrazione al passo, la messa in conto del corretto valore del coefficiente di smorzamento viscoso  $\xi$  si ottiene, quando si opera sulle singole equazioni modali disaccoppiate, assegnando a ciascuna equazione il corrispondente valore modale di  $\xi$  o, quando si opera sul sistema completo, definendo in maniera appropriata la matrice di smorzamento del sistema.

# VERIFICHE SOTTOSTRUTTURA

## 6. Verifiche Sotto Struttura

### Stato limite ultimo sottostruttura (SLV)

Presso-flessione deviata  
ottenuta dalle combinazioni:

*STATICO* ± *SISMA X*

$$\begin{cases} N_{stat} \pm (1.0 \cdot \delta_x \cdot N_X + 0.3 \cdot \delta_y \cdot N_Y) = N \\ M_{x,stat} \pm (1.0 \cdot \delta_x \cdot M_{xX} + 0.3 \cdot \delta_y \cdot M_{xY}) = M_x \\ M_{y,stat} \pm (1.0 \cdot \delta_x \cdot M_{yX} + 0.3 \cdot \delta_y \cdot M_{yY}) = M_y \end{cases}$$

*STATICO* ± *SISMA Y*

$$\begin{cases} N_{stat} \pm (0.3 \cdot \delta_x \cdot N_X + 1.0 \cdot \delta_y \cdot N_Y) = N \\ M_{x,stat} \pm (0.3 \cdot \delta_x \cdot M_{xX} + 1.0 \cdot \delta_y \cdot M_{xY}) = M_x \\ M_{y,stat} \pm (0.3 \cdot \delta_x \cdot M_{yX} + 1.0 \cdot \delta_y \cdot M_{yY}) = M_y \end{cases}$$

Taglio  $T_x$  e  $T_y$  ottenuti  
dalle seguenti combinazioni:

*STATICO* ± *SISMA X*

$$\begin{cases} T_{x,stat} \pm (1.0 \cdot \delta_x \cdot T_{xX} + 0.3 \cdot \delta_y \cdot T_{xY}) = T_x \\ T_{y,stat} \pm (1.0 \cdot \delta_x \cdot T_{yX} + 0.3 \cdot \delta_y \cdot T_{yY}) = T_y \end{cases}$$

*STATICO* ± *SISMA Y*

$$\begin{cases} T_{x,stat} \pm (0.3 \cdot \delta_x \cdot T_{xX} + 1.0 \cdot \delta_y \cdot T_{xY}) = T_x \\ T_{y,stat} \pm (0.3 \cdot \delta_x \cdot T_{yX} + 1.0 \cdot \delta_y \cdot T_{yY}) = T_y \end{cases}$$

# VERIFICHE SOVRASTRUTTURA

## 6. Verifiche Struttura (FASE 6)

### Sovrastruttura

Le condizioni di resistenza degli elementi della sovrastruttura devono essere soddisfatte considerando gli effetti dell'azione sismica di progetto allo SLU, divisi per il fattore  $q=1,15 \cdot \alpha_u/\alpha_1$

#### PILASTRI

*STATICO ± SISMA X*

$$\begin{cases} N_{stat} \pm (1.0 \cdot \delta_x \cdot N_X + 0.3 \cdot \delta_y \cdot N_Y) / q = N \\ M_{x,stat} \pm (1.0 \cdot \delta_x \cdot M_{xX} + 0.3 \cdot \delta_y \cdot M_{xY}) / q = M_x \\ M_{y,stat} \pm (1.0 \cdot \delta_x \cdot M_{yX} + 0.3 \cdot \delta_y \cdot M_{yY}) / q = M_y \end{cases}$$

#### PRESSO-FLESSIONE

##### DEVIATA

*STATICO ± SISMA Y*

$$\begin{cases} N_{stat} \pm (0.3 \cdot \delta_x \cdot N_X + 1.0 \cdot \delta_y \cdot N_Y) / q = N \\ M_{x,stat} \pm (0.3 \cdot \delta_x \cdot M_{xX} + 1.0 \cdot \delta_y \cdot M_{xY}) / q = M_x \\ M_{y,stat} \pm (0.3 \cdot \delta_x \cdot M_{yX} + 1.0 \cdot \delta_y \cdot M_{yY}) / q = M_y \end{cases}$$

*STATICO ± SISMA X*

$$\begin{cases} T_{x,stat} \pm (1.0 \cdot \delta_x \cdot T_{xX} + 0.3 \cdot \delta_y \cdot T_{xY}) / q = T_x \\ T_{y,stat} \pm (1.0 \cdot \delta_x \cdot T_{yX} + 0.3 \cdot \delta_y \cdot T_{yY}) / q = T_y \end{cases}$$

#### TAGLIO

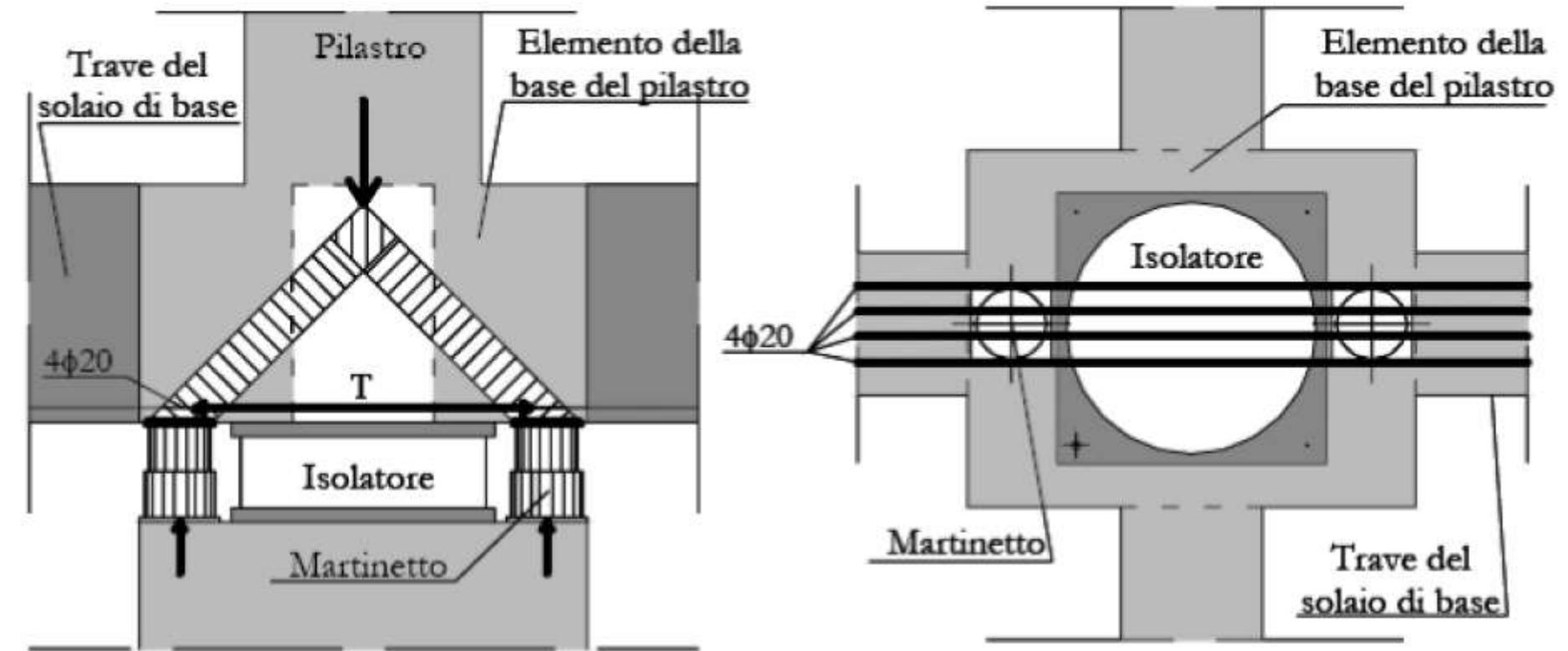
*STATICO ± SISMA Y*

$$\begin{cases} T_{x,stat} \pm (0.3 \cdot \delta_x \cdot T_{xX} + 1.0 \cdot \delta_y \cdot T_{xY}) / q = T_x \\ T_{y,stat} \pm (0.3 \cdot \delta_x \cdot T_{yX} + 1.0 \cdot \delta_y \cdot T_{yY}) / q = T_y \end{cases}$$

# VERIFICHE SOVRASTRUTTURA

## 6. Verifiche Struttura (FASE 6)

### Sovrastruttura – Base



# VERIFICHE ISOLATORI

## *7. Verifiche Dispositivi (FASE 7)*

*Per gli isolatori elastomerici (HDRB), i principali parametri sono:*

- La rigidezza a taglio (orizzontale)  $K_{iso}$ , funzione della geometria e del numero degli strati di gomma e del tipo di elastomero (in particolare del modulo elastico tangenziale,  $G$ );
- La rigidezza assiale (verticale)  $K_v$ , funzione degli stessi parametri che condizionano la rigidezza a taglio;
- Lo smorzamento  $\xi$ , funzione principalmente delle caratteristiche del materiale elastomerico, nella sua composizione e nei suoi additivi.

*Le verifiche mirano a valutare la congruenza con i parametri di progetto e le condizioni di sicurezza rispetto a:*

- Tensione di trazione negli inserti in acciaio;
- Deformazione tangenziale massima nella gomma;
- Instabilità sotto carico assiale e in condizioni deformate a taglio (massimo spostamento).

# VERIFICHE ISOLATORI

## 7. Verifiche Dispositivi (FASE 7)

### VERIFICHE ALLO SLE

- Per gli isolatori elastomerici, il livello di protezione richiesto allo SLD è da ritenere conseguito se sono soddisfatte le verifiche nei confronti dello SLV.

### VERIFICHE ALLO SLU

- Le verifiche sui dispositivi si riferiscono allo SLC; in particolare il parametro principale per l'esecuzione delle verifiche allo SLU dei dispositivi di isolamento è lo spostamento massimo  $d_2$ .
- Con l'analisi statica lineare, si considerano gli effetti della torsione, tenuto conto anche dell'eccentricità accidentale, amplificando gli spostamenti mediante:

$$\delta_{xi} = 1 + \frac{e_{tot,y}}{r_y^2} y_i \quad \delta_{yi} = 1 + \frac{e_{tot,x}}{r_x^2} x_i$$

$$e_{tot,x} = d(x_R, x_G) + 5\% \cdot L_Y = 0.00 + 0.05 \cdot 9.70 = 0.00 + 1.045 = 1.045 \text{ m}$$

$$e_{tot,y} = d(y_R, y_G) + 5\% \cdot L_X = 0.03 + 0.05 \cdot 20.90 = 0.03 + 0.485 = 0.515 \text{ m}$$

$$r_{xy}^2 = 69.03 \text{ m}^2$$

# VERIFICHE ISOLATORI

## 7. Verifiche Dispositivi (FASE 7)

### *Caratteristiche dei dispositivi elastomerici*

I principali parametri di progetto del complesso struttura-isolatori che influenzano il dimensionamento degli isolatori elastomerici sono dati da:

- Rigidezza orizzontale dell'isolatore:

$$k_h = \frac{G_{din} \cdot A}{t_e}$$

$G_{din}$  = modulo dinamico di taglio, determinato con le prove di qualificazione sui dispositivi in accordo con il punto 11.9.7 delle NTC 2018. Deve ricadere nell'intervallo 0.35÷1.50 MPa;

$A$  = area superficie dello strato di elastomero, depurata degli eventuali fori (se non riempiti successivamente);

$t_e$  = somma degli spessori dei singoli strati di elastomero valutata maggiorando lo spessore dei due strati esterni, se maggiore di 3mm, del fattore 1.4.

# VERIFICHE ISOLATORI

## 7. Verifiche Dispositivi (FASE 7)

### Caratteristiche dei dispositivi elastomerici

- Rigidezza verticale dell'isolatore:

$$k_v = \frac{E_c \cdot A'}{t_e}$$

$E_c$  = modulo di compressibilità assiale dato da (in MPa):

$$E_c = \left( \frac{1}{6 \cdot G_{dim} \cdot S_1^2} + \frac{4}{3 \cdot E_b} \right)^{-1}$$

$E_b$  = modulo di compressibilità volumetrica della gomma, assunto pari a 2000 MPa;

$S_1$  = fattore di forma primario, dato da:

$$S_1 = \frac{A'}{L}$$

$A'$  = Area superficie comune alla singola piastra d'acciaio e allo strato di elastomero depurata degli eventuali fori (se non riempiti successivamente);

$L$  = superficie laterale libera del singolo strato di elastomero per la parte confinata dalle piastre in acciaio, maggiorata della superficie laterale degli eventuali fori (se non riempiti successivamente).

# VERIFICHE ISOLATORI

## 7. Verifiche Dispositivi (FASE 7)

Oltre a possedere le caratteristiche di rigidezza di progetto gli isolatori devono soddisfare le verifiche di sicurezza allo SLU:

- Trazione nell'acciaio;
- Deformazione tangenziale della gomma;
- Instabilità.

Occorre definire le seguenti grandezze:

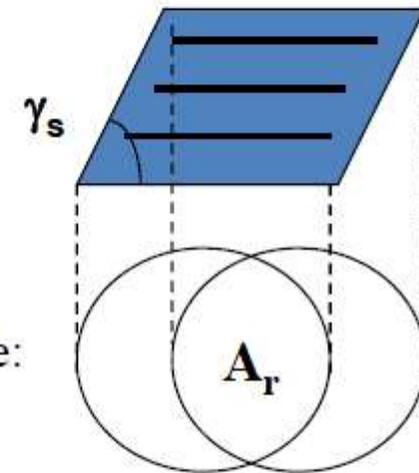
- Deformazione di taglio nell'elastomero prodotta dalla compressione:

$$\gamma_c = \frac{1,5 V}{S_1 \cdot G_{din} \cdot A_r}$$

$V$  = sforzo normale massimo sull'isolatore, derivato dalla combinazione dell'azione sismica con le altre azioni (punto 2.5.3 delle NTC 2008, Combinazioni delle azioni);

$A_r$  = Area ridotta efficace dell'isolatore calcolata, per isolatori di diametro  $D$ , come:

$$A_r = (\phi - \sin\phi) D^2 / 4 \quad \text{con } \phi = 2 \arccos (d_{Ed} / D)$$



# VERIFICHE ISOLATORI

## 7. Verifiche Dispositivi (FASE 7)

- **Deformazione di taglio dell'elastomero prodotta dallo spostamento sismico totale** (inclusi gli effetti torsionali):

$$\gamma_s = \frac{d_{Ed}}{t_e}$$

- **Deformazioni di taglio dovuta alla rotazione angolare:**

$$\gamma_\alpha = \frac{a^2}{2 \cdot t_i \cdot t_e}$$

$a^2 = 3 \alpha D^2 / 4$  nel caso di isolatori circolari;

$\alpha = (\alpha_x^2 + \alpha_y^2)^{1/2}$  con  $\alpha_x$  e  $\alpha_y$  le rotazioni intorno all'asse x ed y;

- **Deformazione di taglio totale di progetto** (inclusi gli effetti torsionali):

$$\gamma_t = \gamma_c + \gamma_s + \gamma_\alpha$$

- **Carico verticale critico:**

$$V_{cr} = \frac{G_{din} \cdot A_r \cdot S_1 \cdot D}{t_e}$$

# VERIFICHE ISOLATORI

## VERIFICA ALLO SLU DEGLI ISOLATORI ELASTOMERICI

Gli isolatori in elastomero ed acciaio debbono soddisfare le verifiche di seguito elencate.

### Tensione negli inserti in acciaio

La tensione massima  $\sigma_s$  agente nella generica piastra in acciaio

$$\sigma_s = \frac{1,3 V (t_1 + t_2)}{A_r \cdot t_s} \leq f_{yk}$$

dove  $t_1$  e  $t_2$  sono gli spessori dei due strati di elastomero direttamente a contatto con la piastra e  $t_s$  è il suo spessore ( $t_s \geq 2\text{mm}$ ) deve risultare inferiore alla tensione di snervamento dell'acciaio  $f_{yk}$ ;  $A_r$  è l'area ridotta efficace dell'isolatore.

### Deformazioni di taglio massima degli isolatori

Devono risultare soddisfatte le condizioni:

$$\gamma_t \leq 5 \quad \gamma_s \leq \left( \frac{\gamma^*}{1,5} \right) \leq 2$$

dove  $\gamma^*$  è il valore massimo della deformazione di taglio raggiunto nelle prove di qualificazione relative all'efficacia dell'aderenza elastomero-acciaio, senza segni di rottura.

### Instabilità

Il carico massimo verticale agente sul singolo isolatore dovrà essere inferiore al carico critico  $V_{cr}$  diviso per un coefficiente di sicurezza 2.