

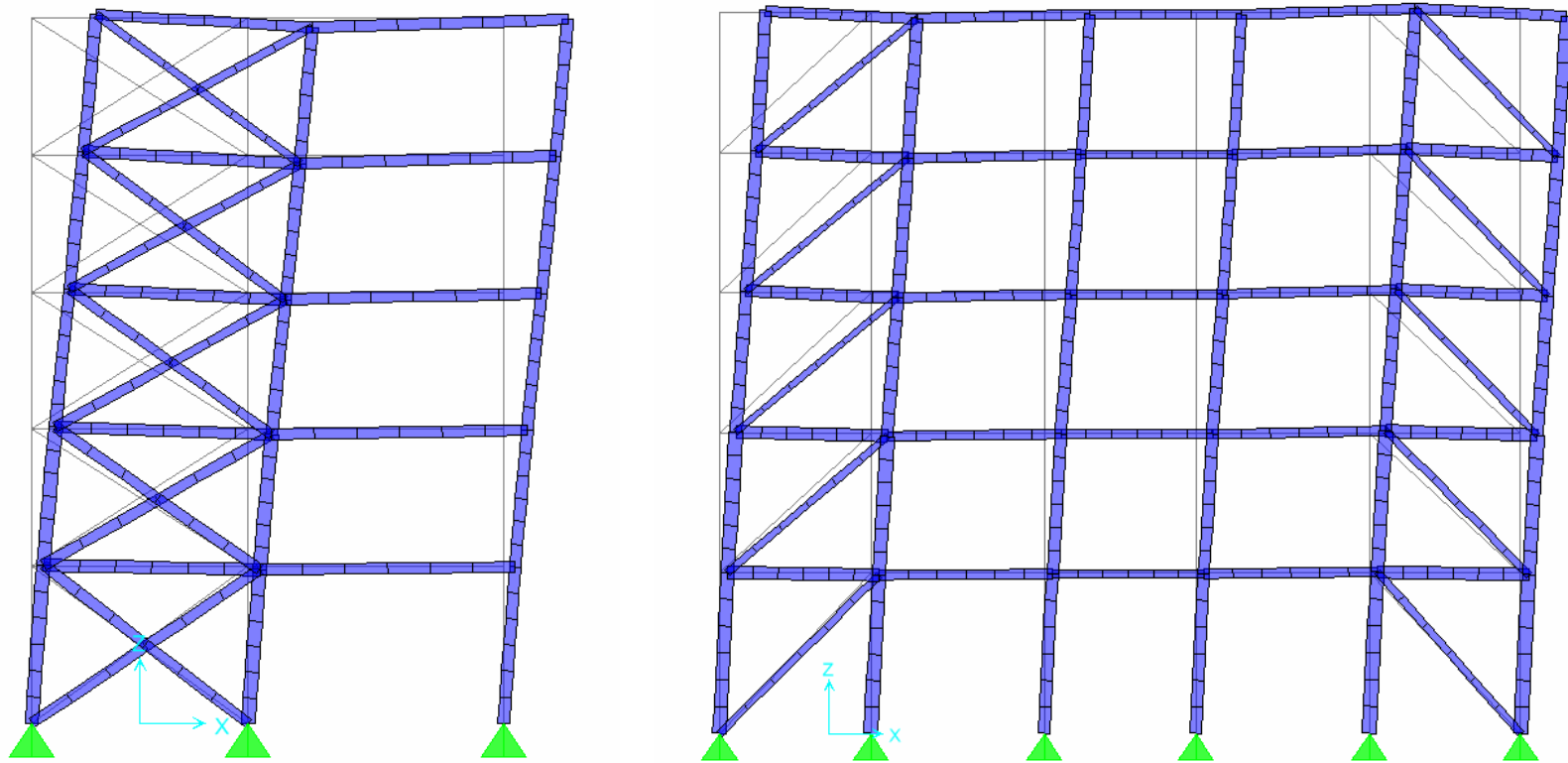
# Progettazione delle Strutture Sismo-Resistenti di Acciaio

Ordinanza n. 3274 e s.m.i.

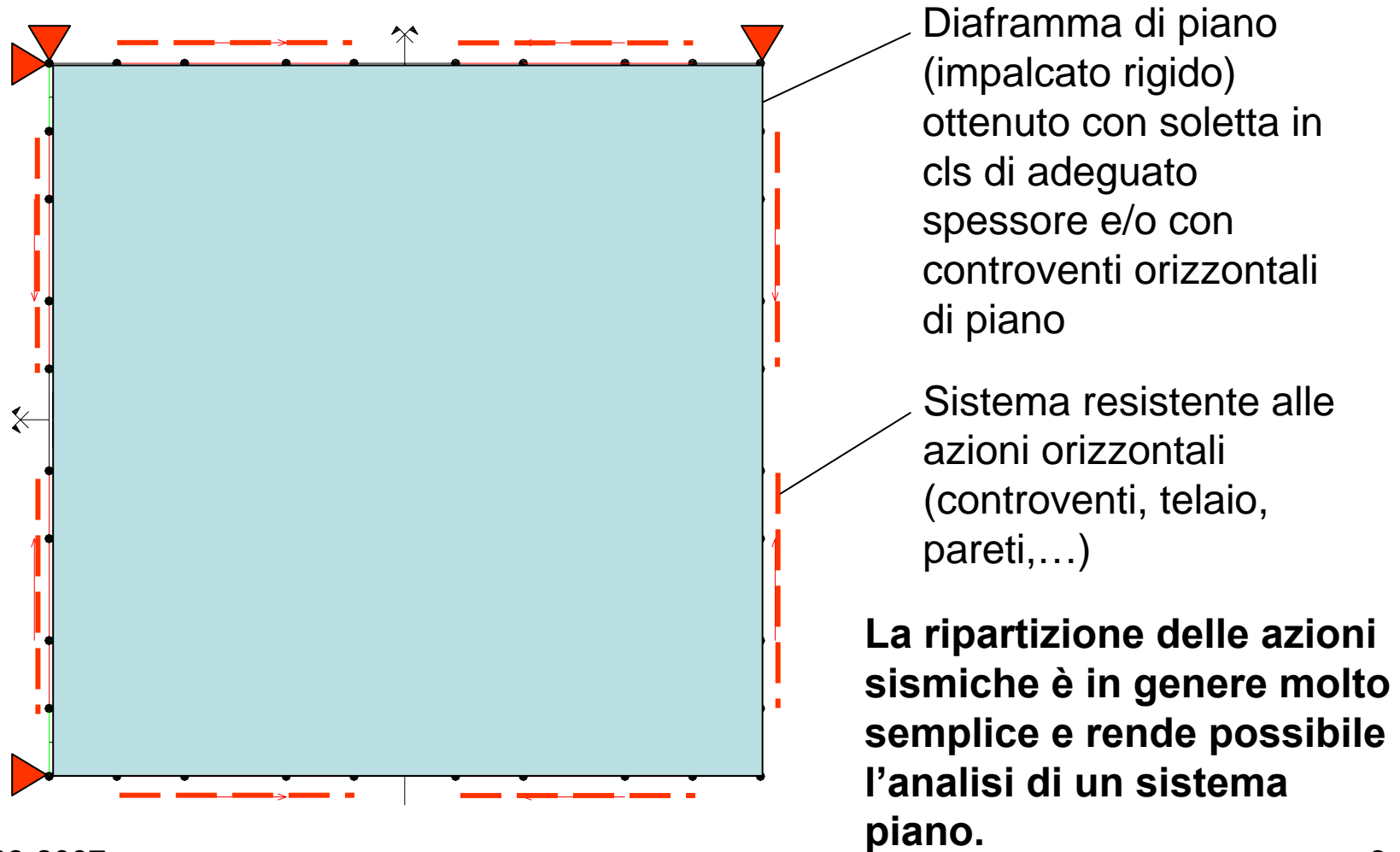
Castellammare (NA), 22 marzo 2007

# Esempi progettuali

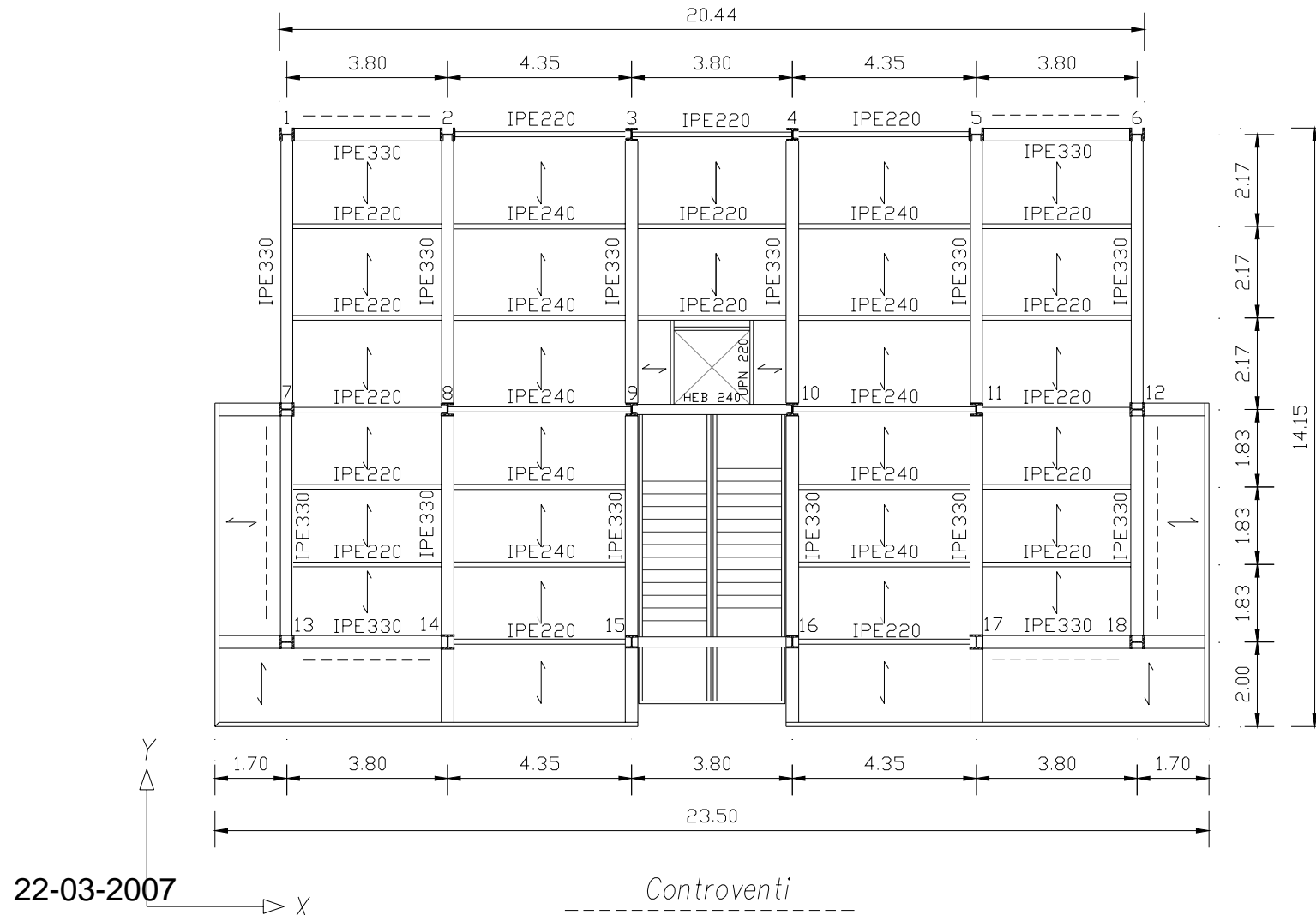
Strutture con controventi concentrici a croce di S.Andrea e a diagonale singola



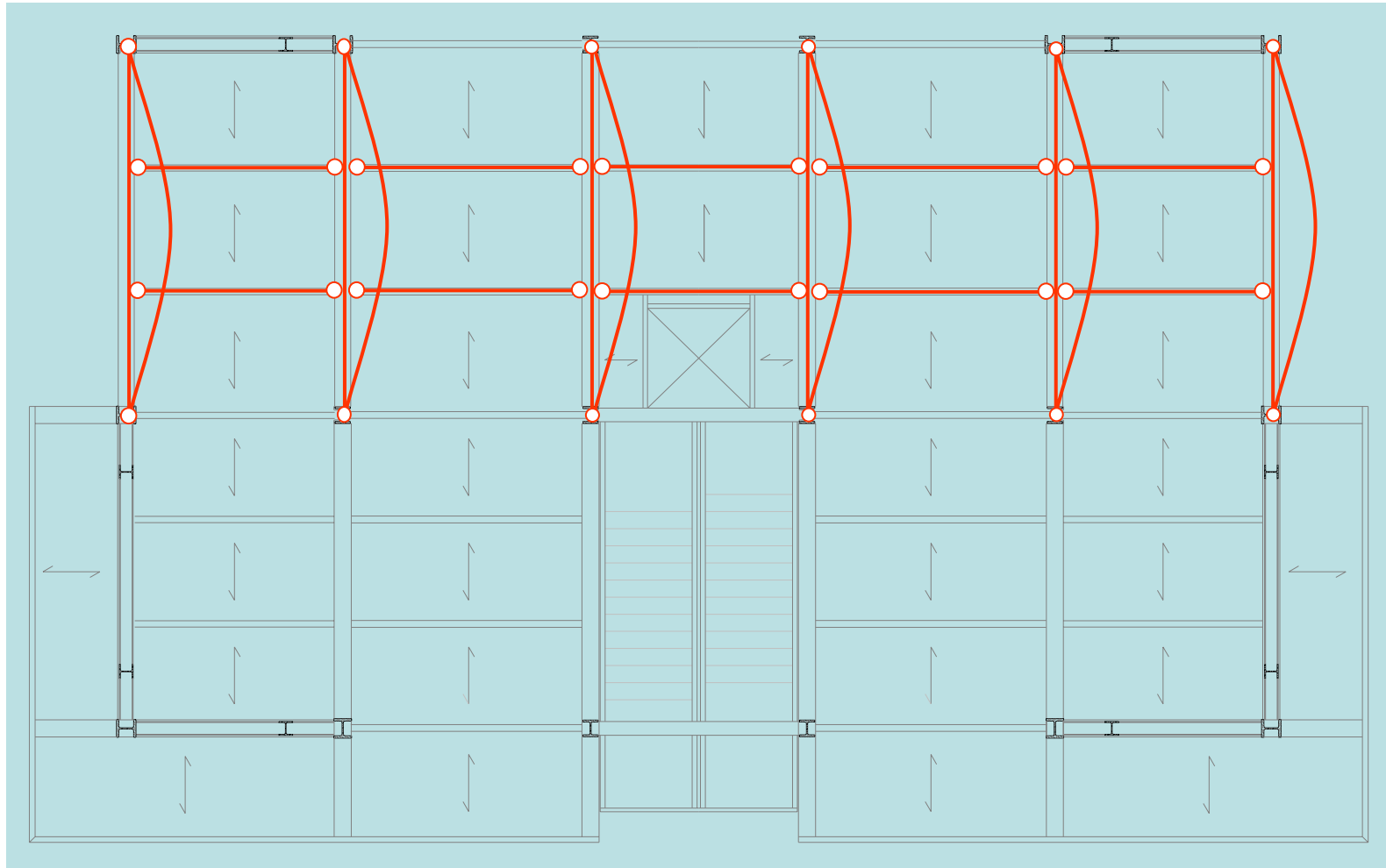
## Concezione strutturale



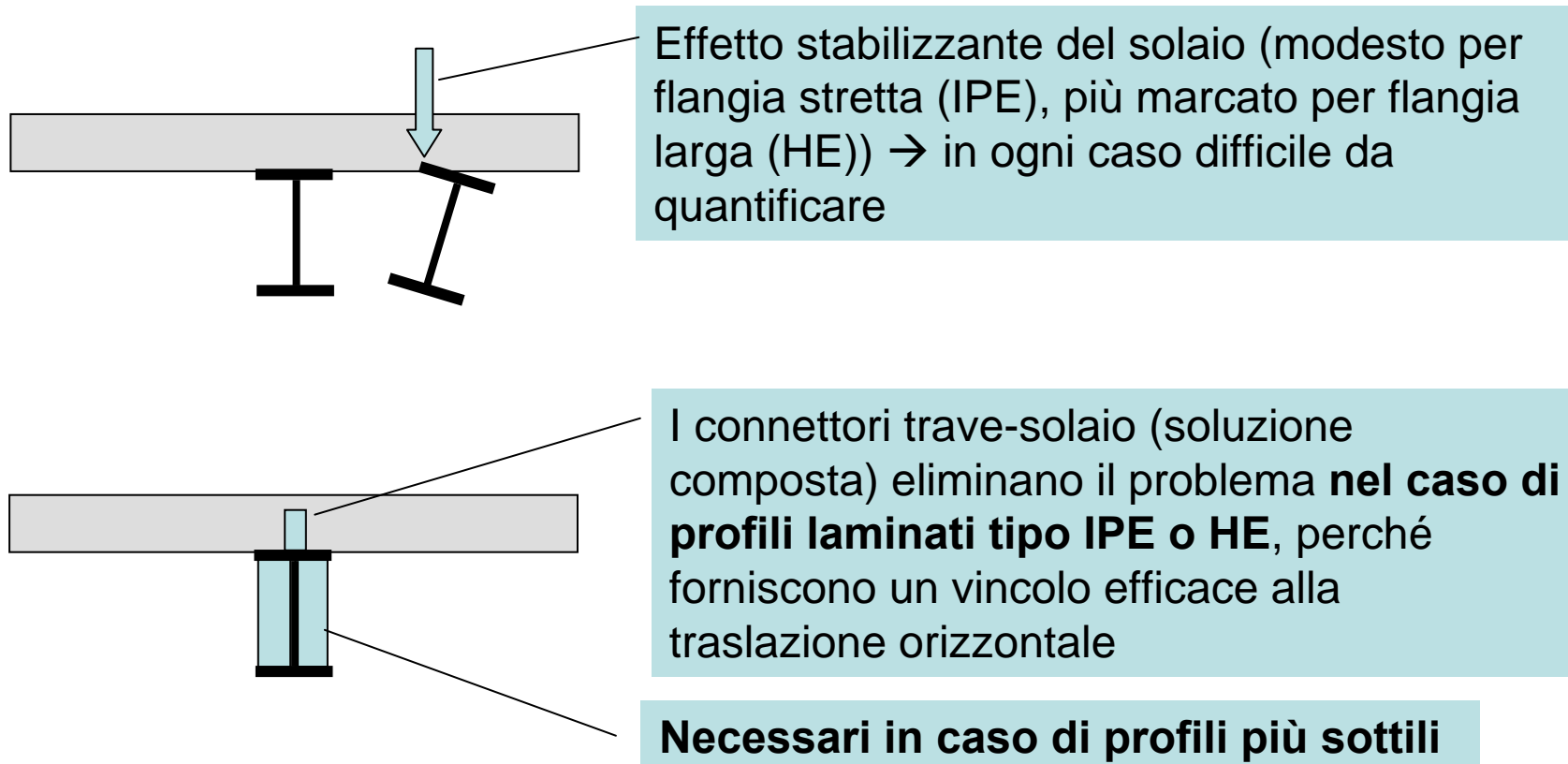
## Carpenteria di piano



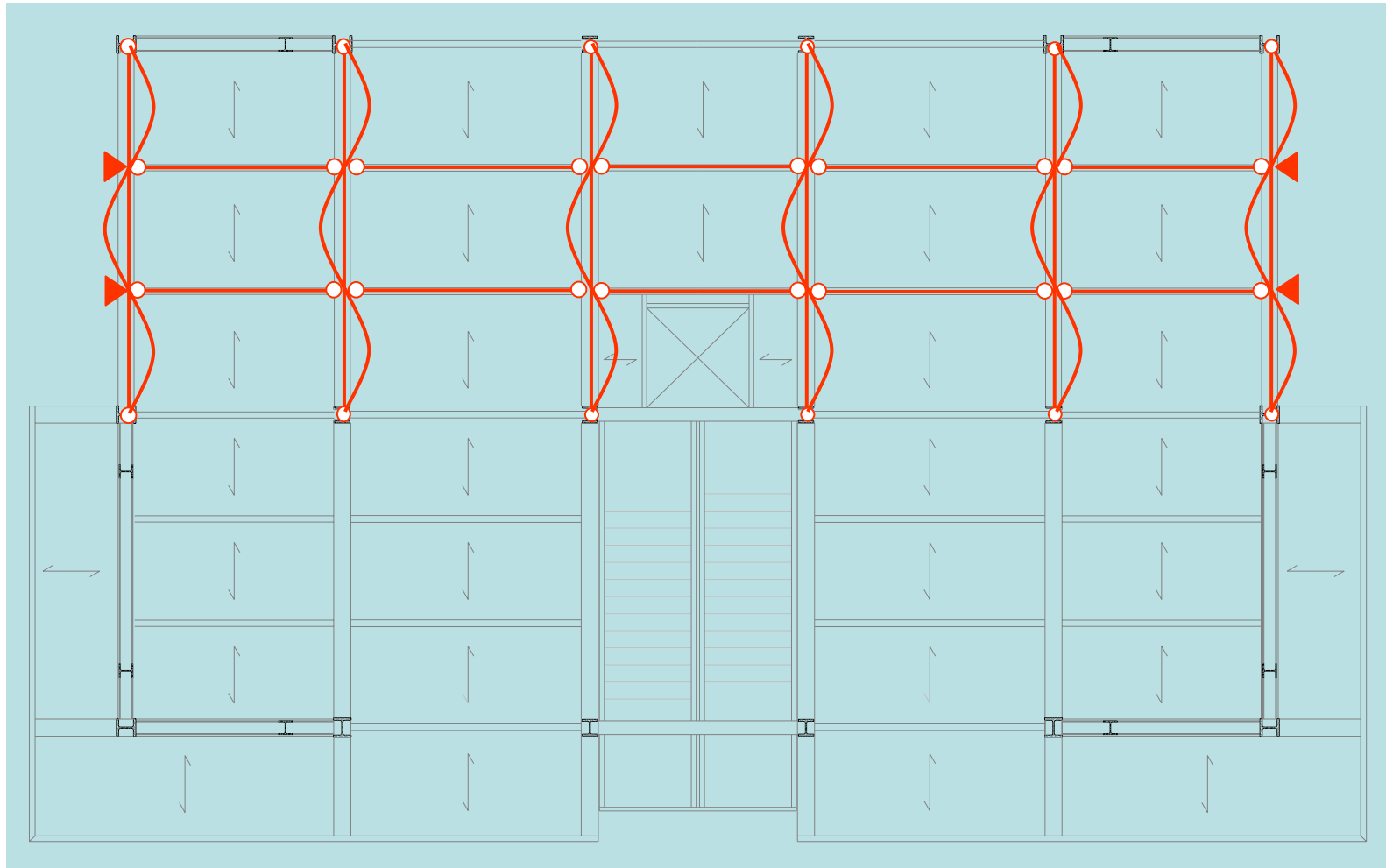
## Verifiche delle travi: stabilità



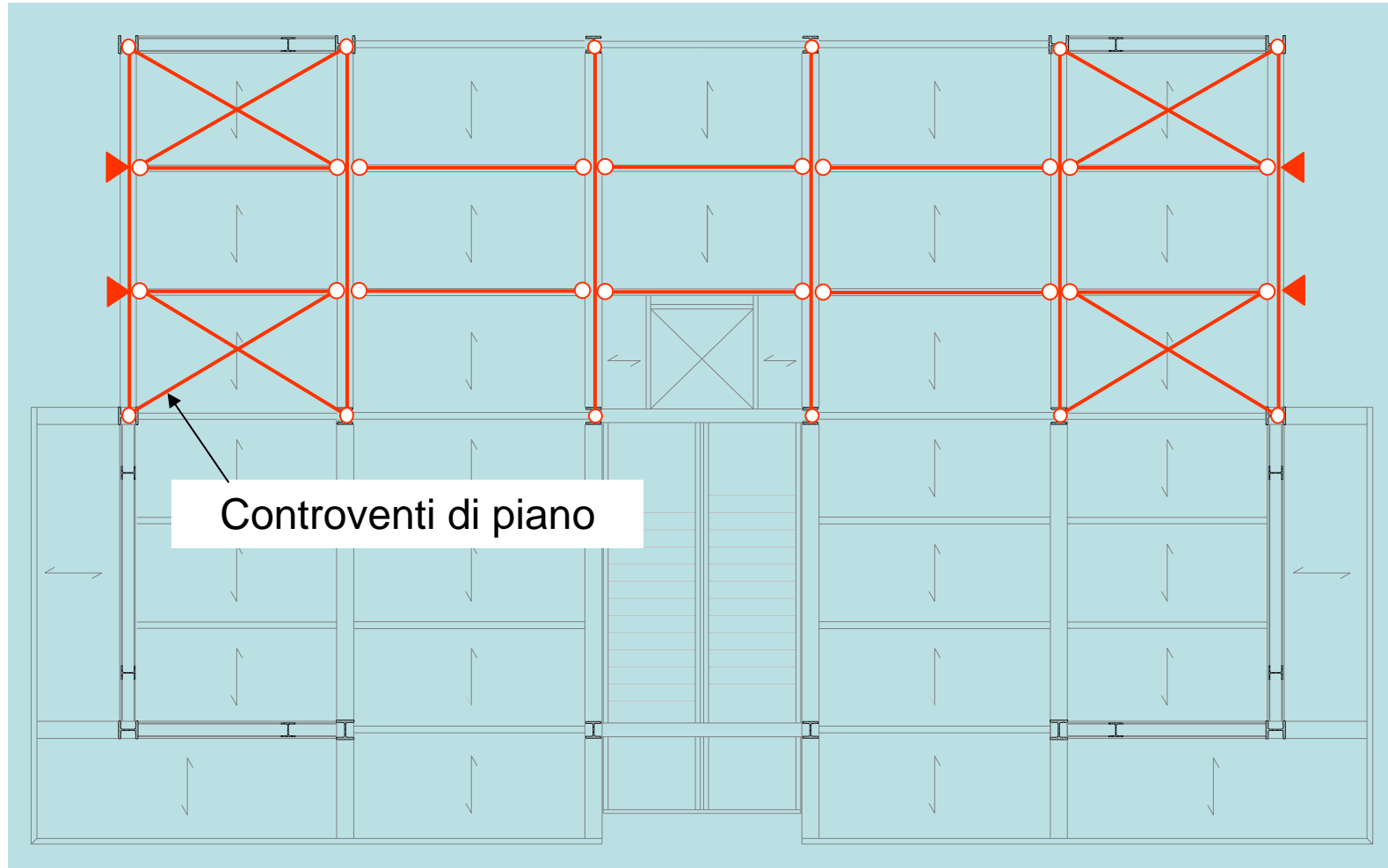
## Verifiche delle travi: stabilità



## Verifiche delle travi: stabilità

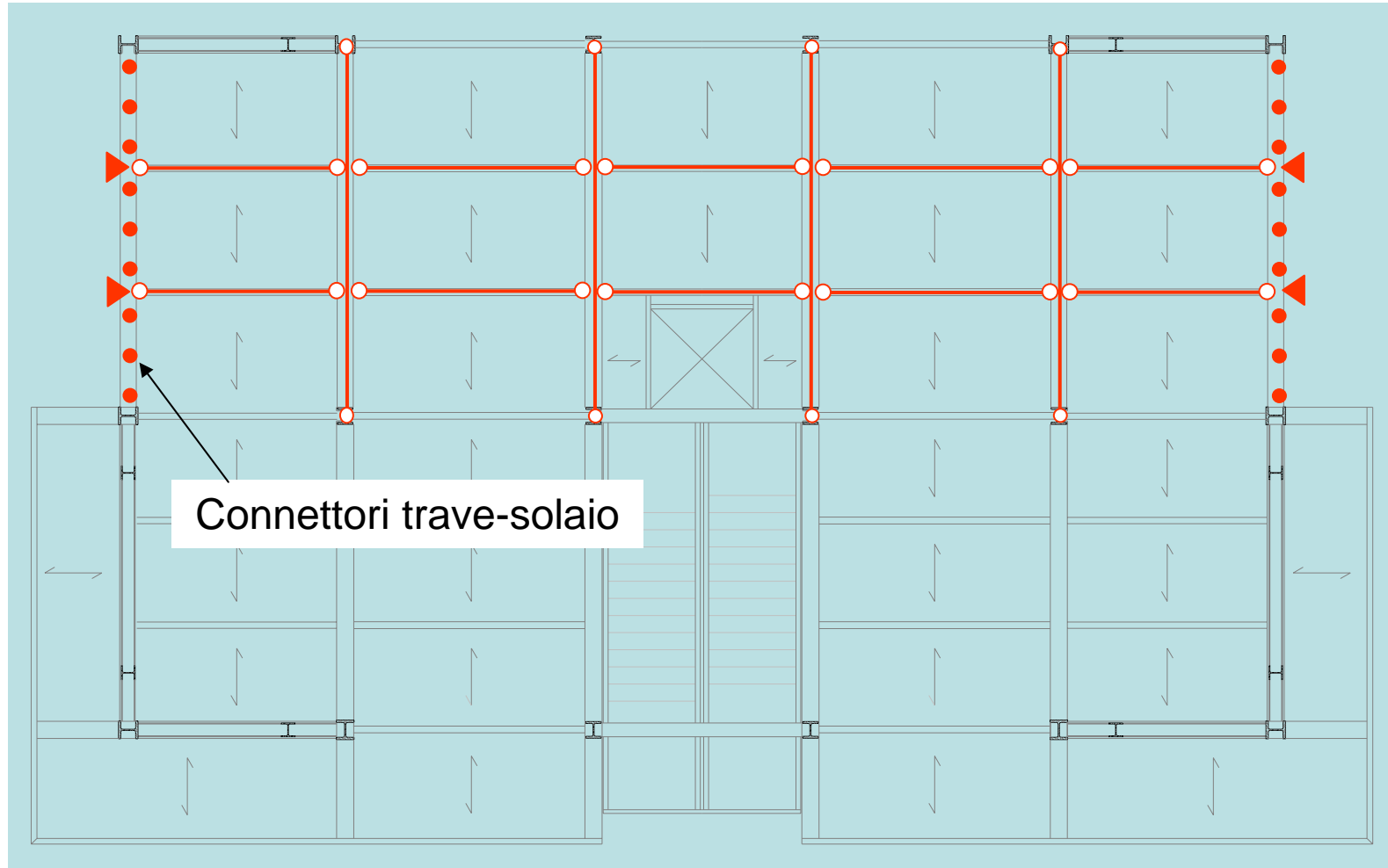


## Verifiche delle travi: stabilità

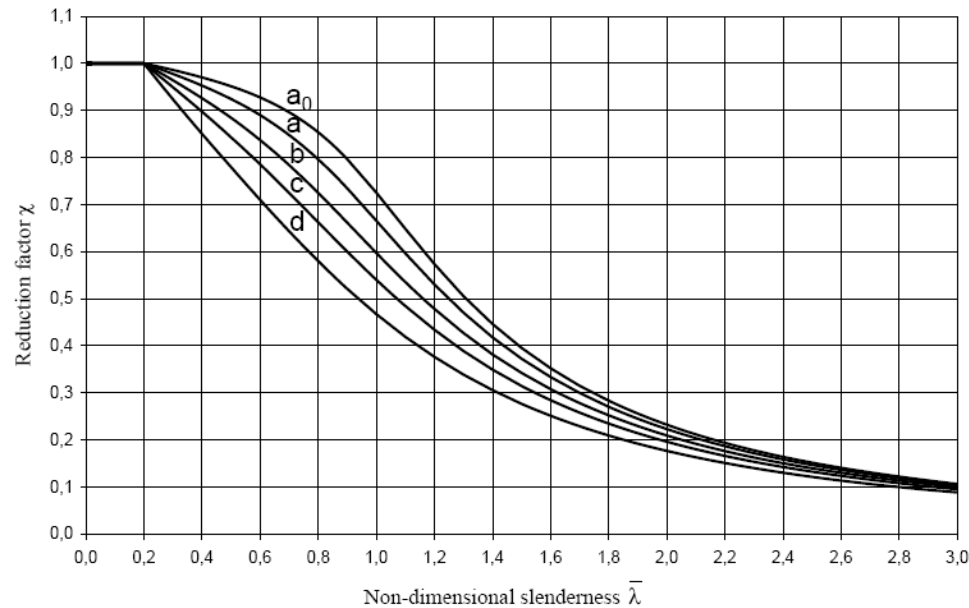




## Verifiche delle travi: stabilità



## Verifiche delle colonne: stabilità

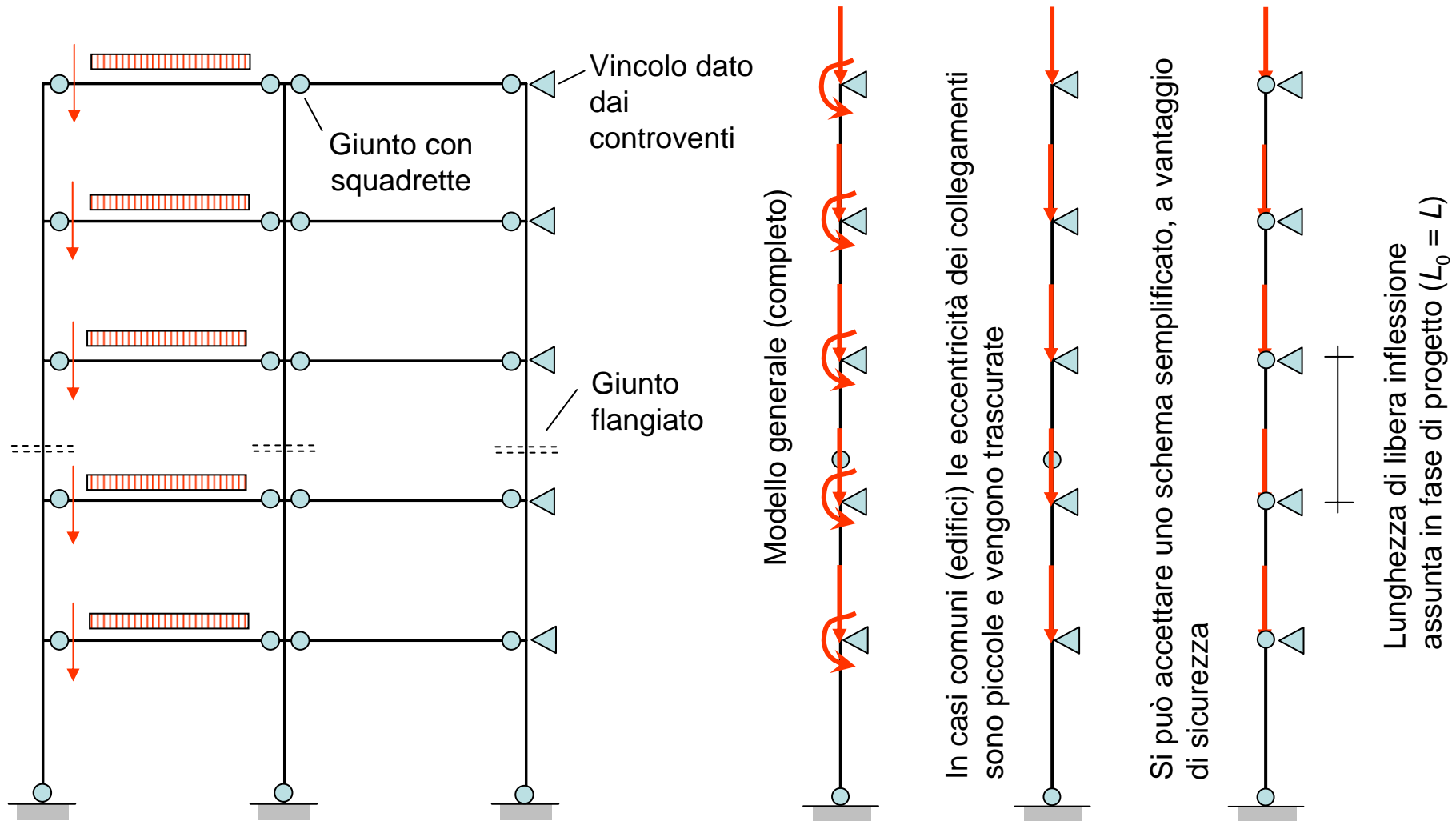


$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_m$$

$$\bar{\lambda} = \left( \frac{f_y A}{N_{cr}} \right)^{0.5}$$

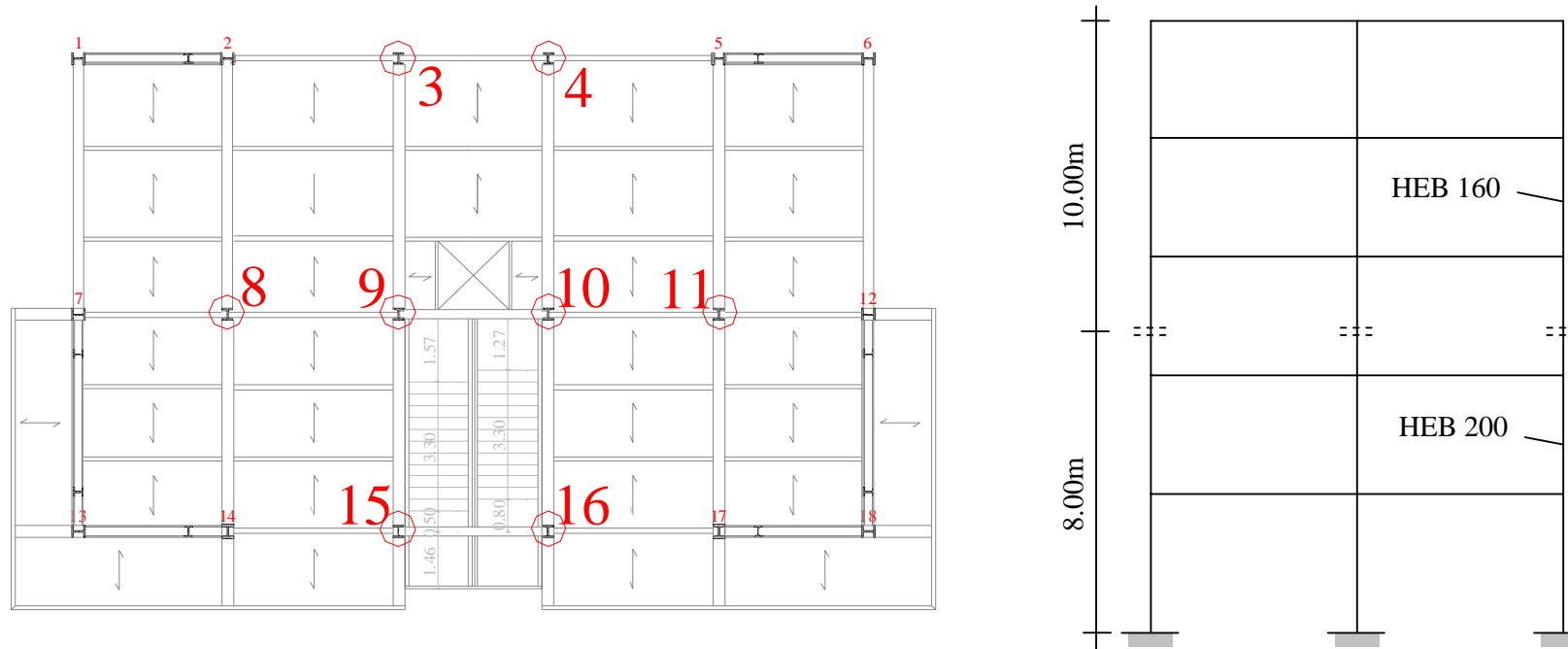
Cross section	Limits	Buckling about axis	Buckling curve	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Rolled sections 	$h/b > 1.2$ $t_f \leq 40 \text{ mm}$ $40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y	a	a <sub>0</sub>
		z-z	b	a
	$h/b \leq 1.2$ $t_f \leq 100 \text{ mm}$ $t_f > 100 \text{ mm}$	y-y	b	a
		z-z	c	c
Welded I-sections 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ $t_f > 40 \text{ mm}$	y-y	b	b
		z-z	c	c
Hollow sections 	hot finished	any	a	a <sub>0</sub>
	cold formed	any	c	c
Welded box sections 	generally (except as below)	any	b	b
	thick welds: $a > 0.5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	any	c	c
U-, T- and solid sections 		any	c	c
L-sections 		any	b	b

## Verifiche delle colonne: stabilità



22-03-2007

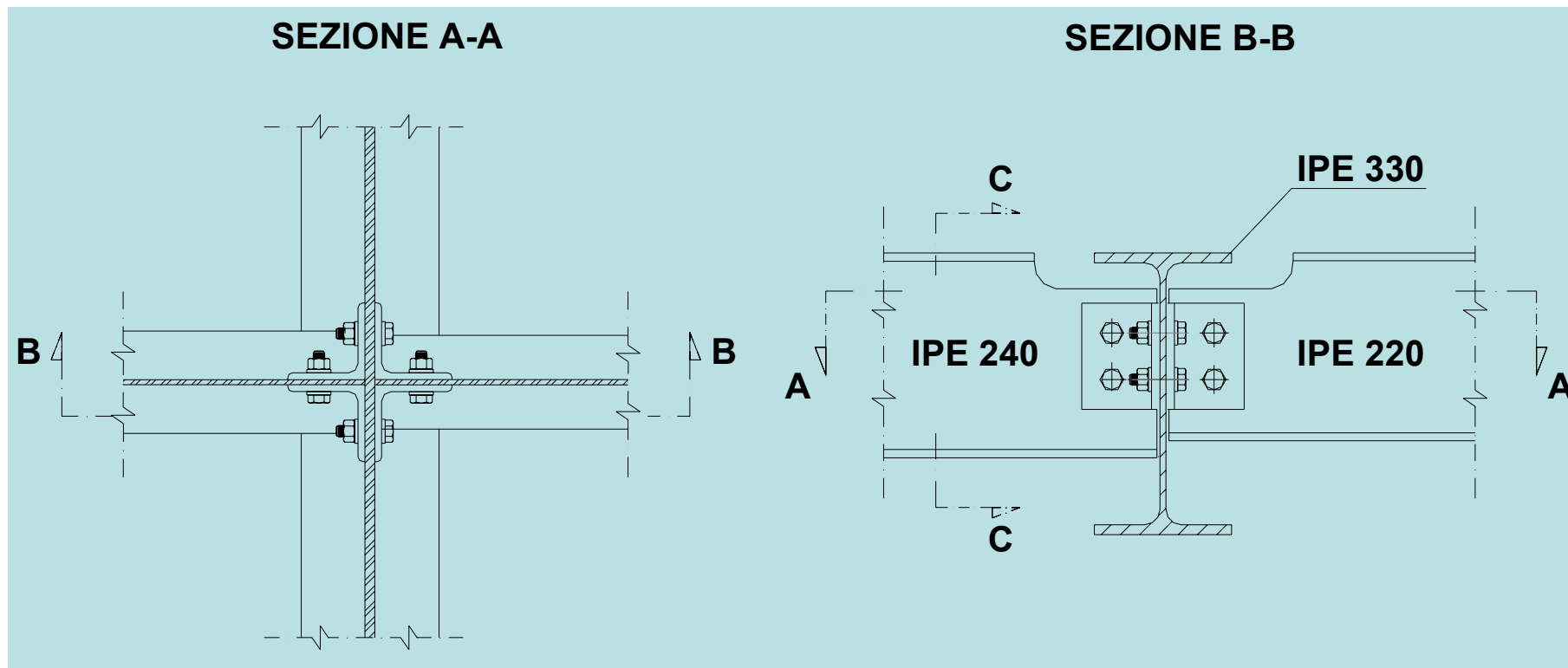
## Verifiche delle colonne



SEZIONE	$L_0$ (m)	$\rho_{\min}$ (mm)	$\lambda_1$	$\lambda$	$\bar{\lambda}$	$\phi$	$\chi$	$N_{pl,Rd}$ (kN)	$N_{b,Rd}$ (kN)	$N_{Sd}$ (kN)	$\frac{N_{b,Rd}}{N_{Sd}}$
HEB160	3.5	40.5	93.9	69.1	0.74	0.86	0.76	1214	926	701	1.32
HEB200	4.0	50.7		63.1	0.67	0.81	0.80	1747	1397	1171	1.19

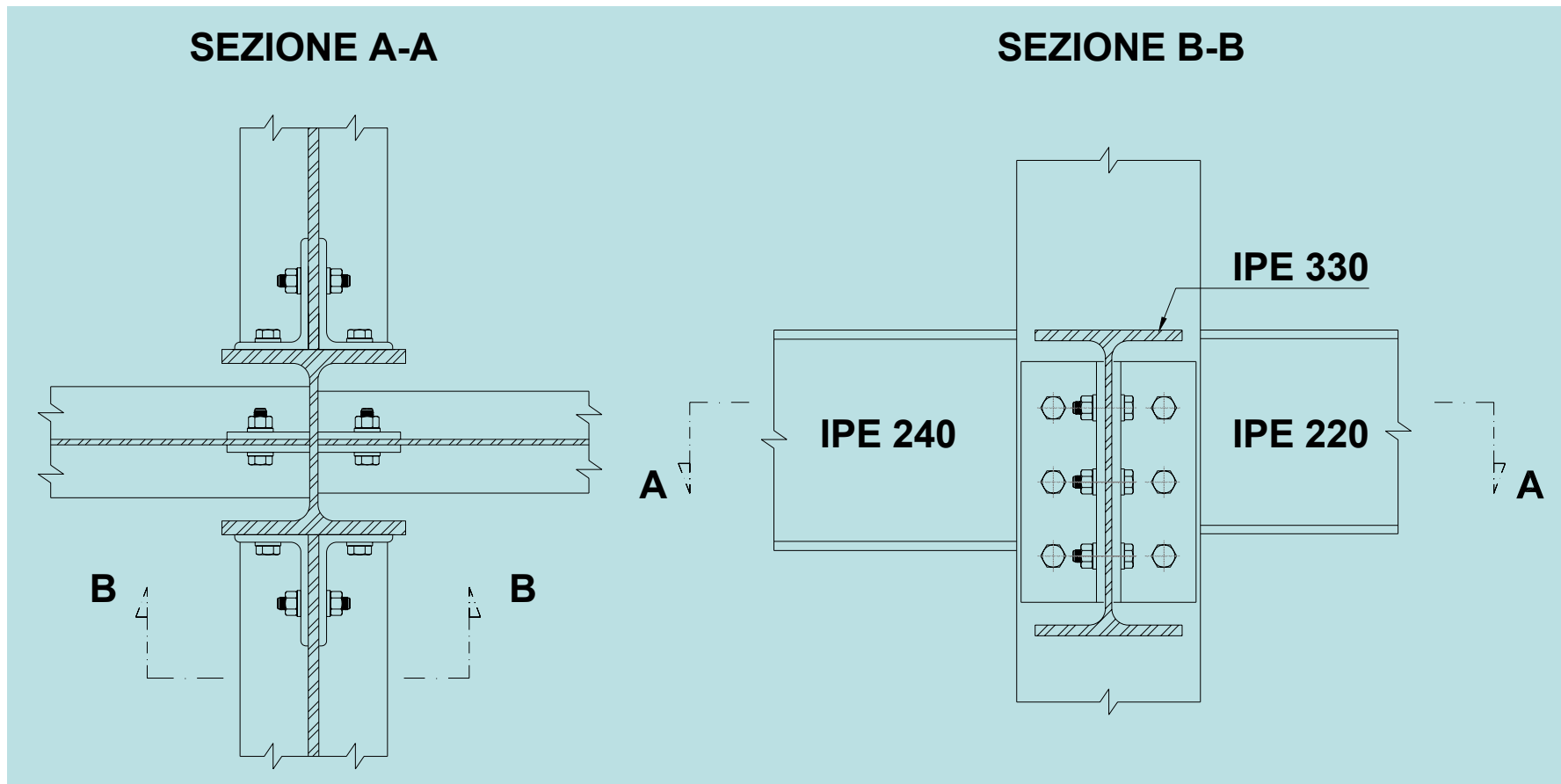
## Tipologie di collegamenti

### Collegamento trave secondaria – trave principale



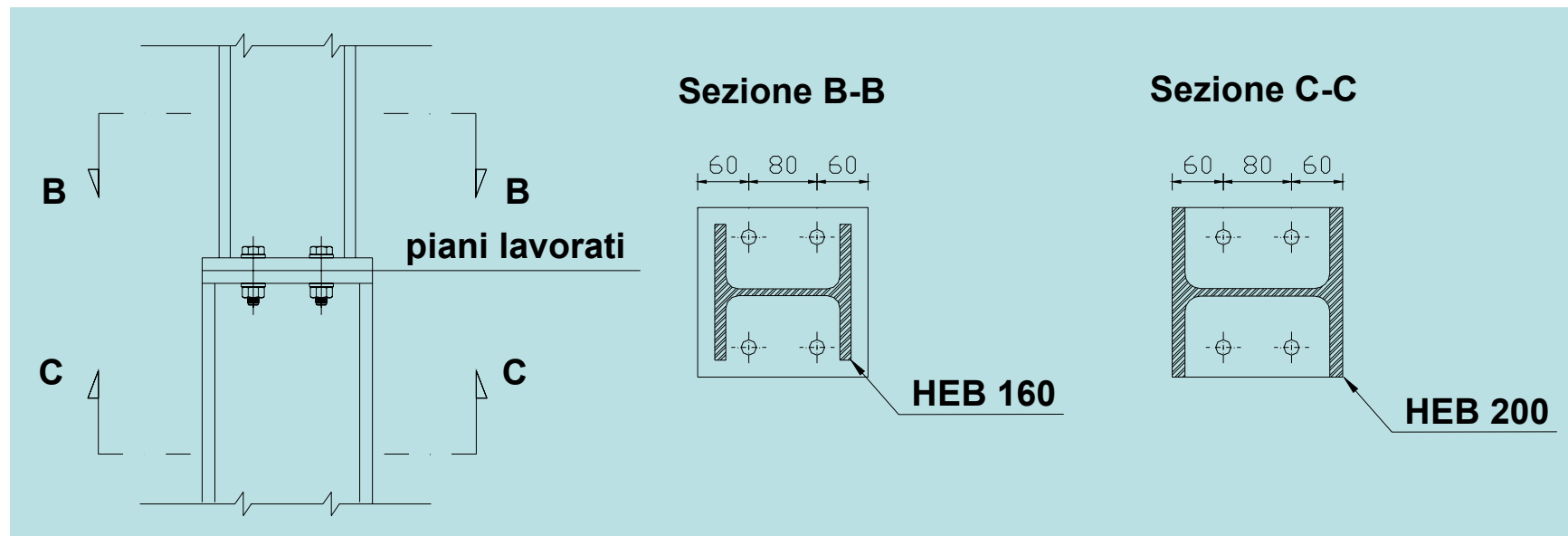
## Tipologie di collegamenti

### Collegamento trave – colonna



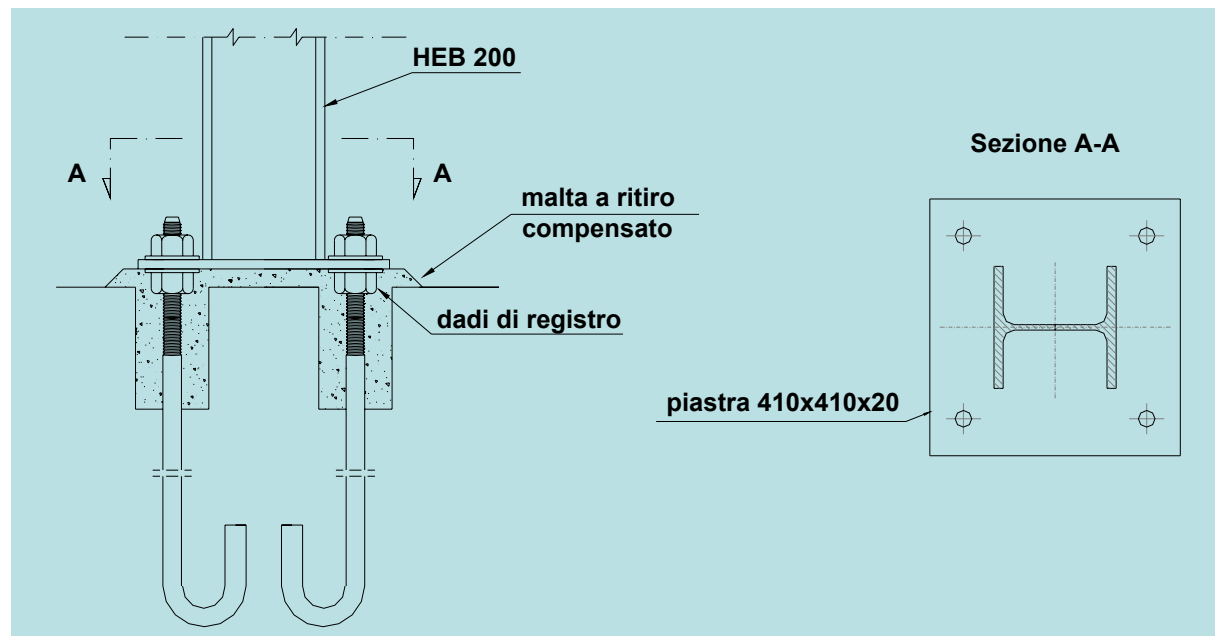
## Tipologie di collegamenti

### Collegamento colonna – colonna



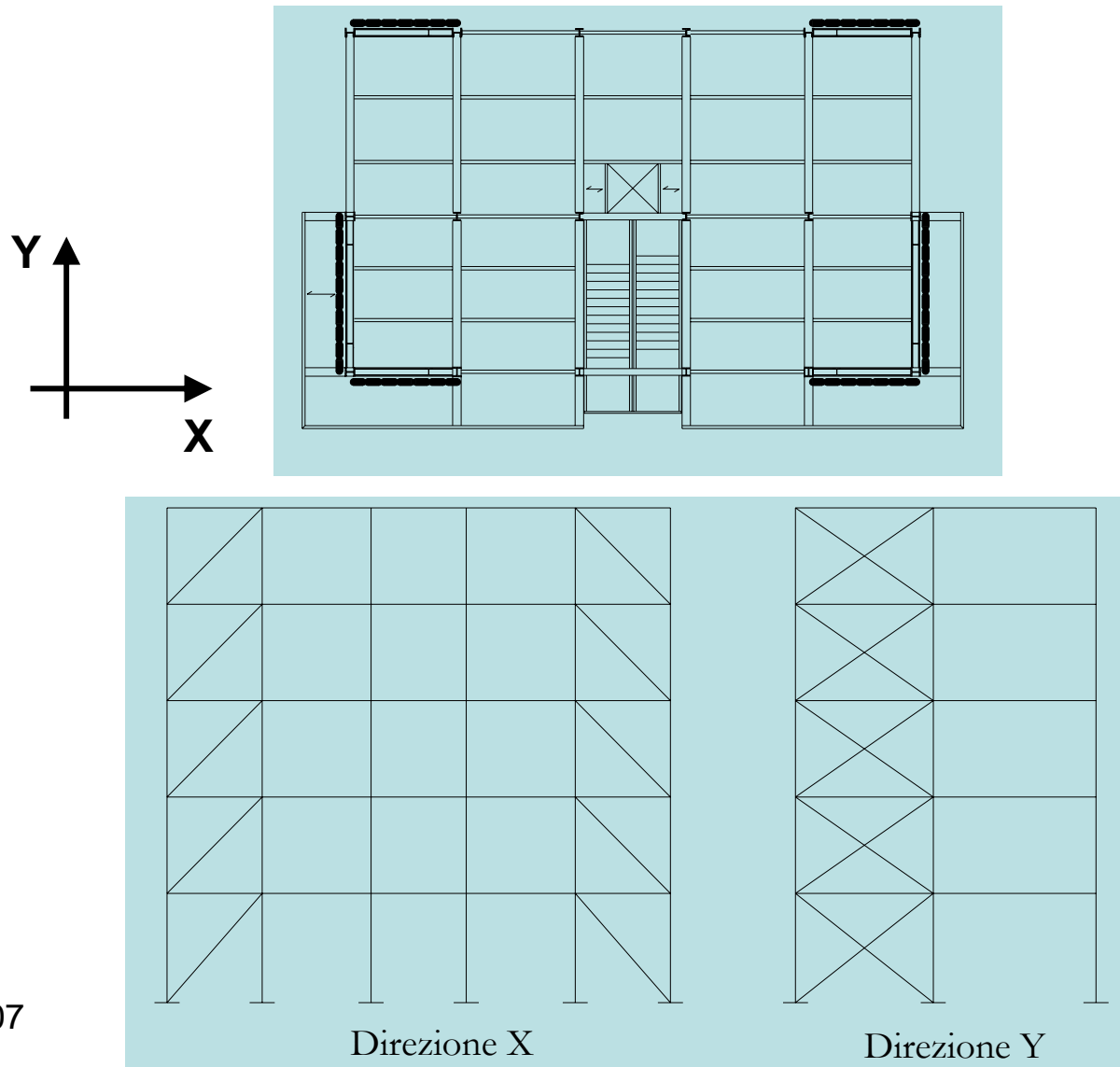
## Tipologie di collegamenti

### Collegamento colonna – fondazione

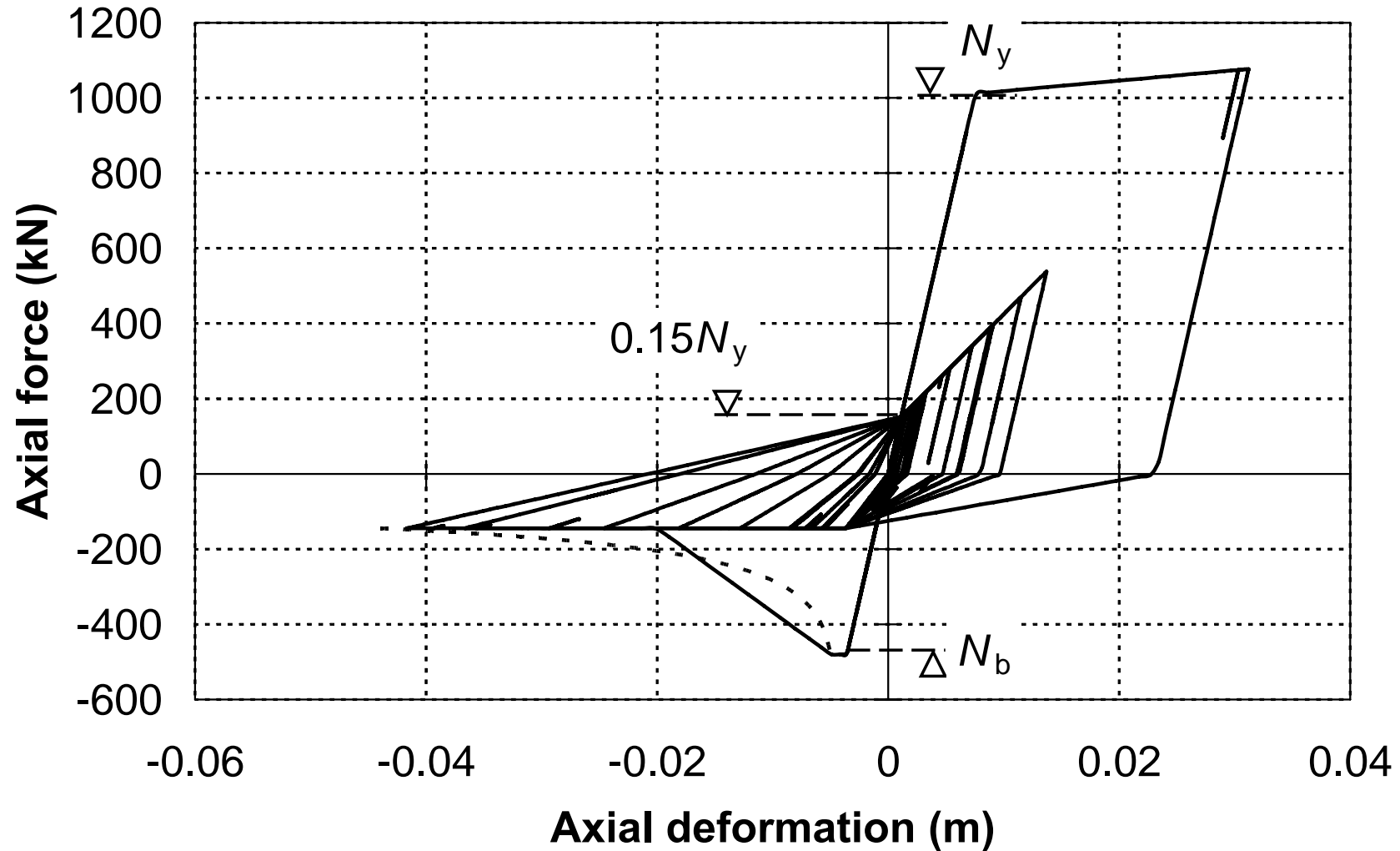




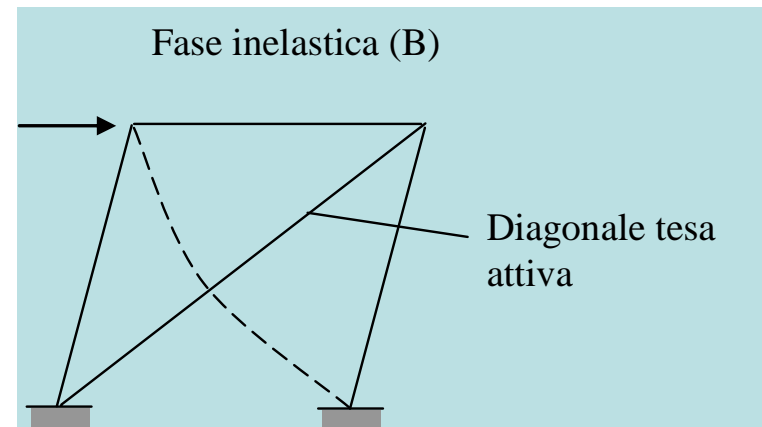
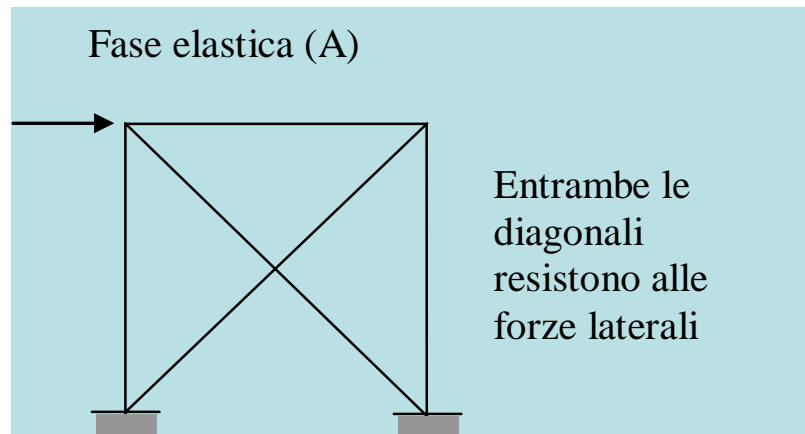
## Progetto dei controventi



## Risposta sismica dei controventi



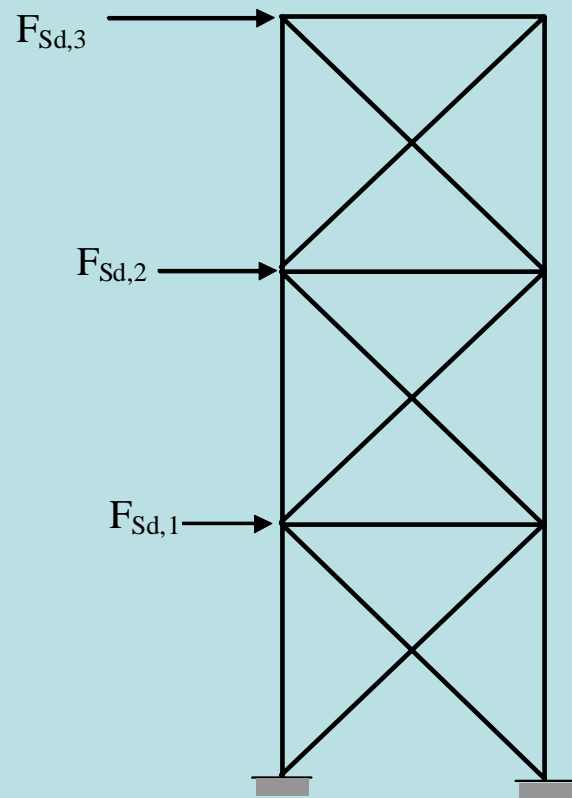
## Modellazione strutturale



**In fase elastica, reagiscono sia la diagonale tesa che quella compressa. Conseguentemente, le proprietà di vibrazione elastica e le forze massime agenti sono condizionate da entrambe le diagonali.**

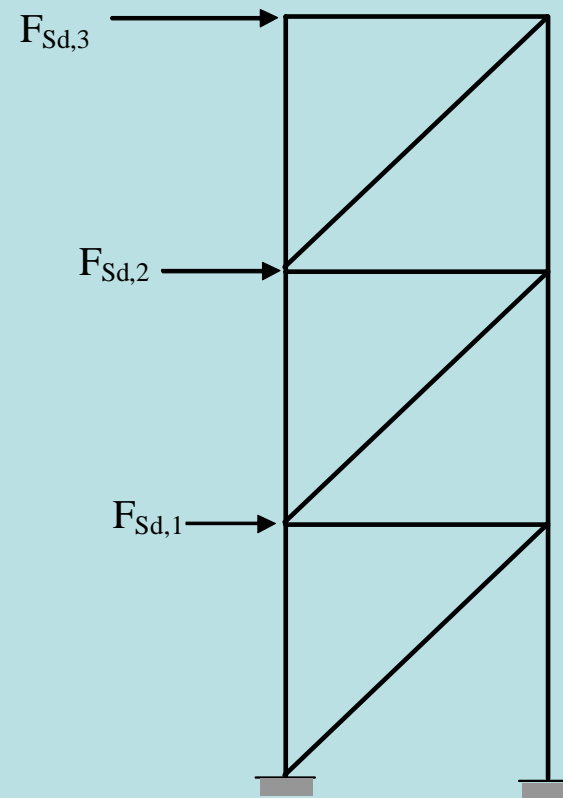
**In fase inelastica, la resistenza *post-buckling* della diagonale compressa è molto ridotta. Tale contributo dipende da diversi fattori, principalmente dalla snellezza globale della diagonale. Al crescere della snellezza si riduce il contributo resistente della diagonale compressa. In favore di sicurezza, l'Ordinanza suggerisce di trascurare completamente il contributo delle diagonali compresse.**

## Modellazione strutturale



### Fase A:

- Determinazione delle proprietà di vibrazione elastica e delle forze di progetto
- Verifica di stabilità delle diagonali

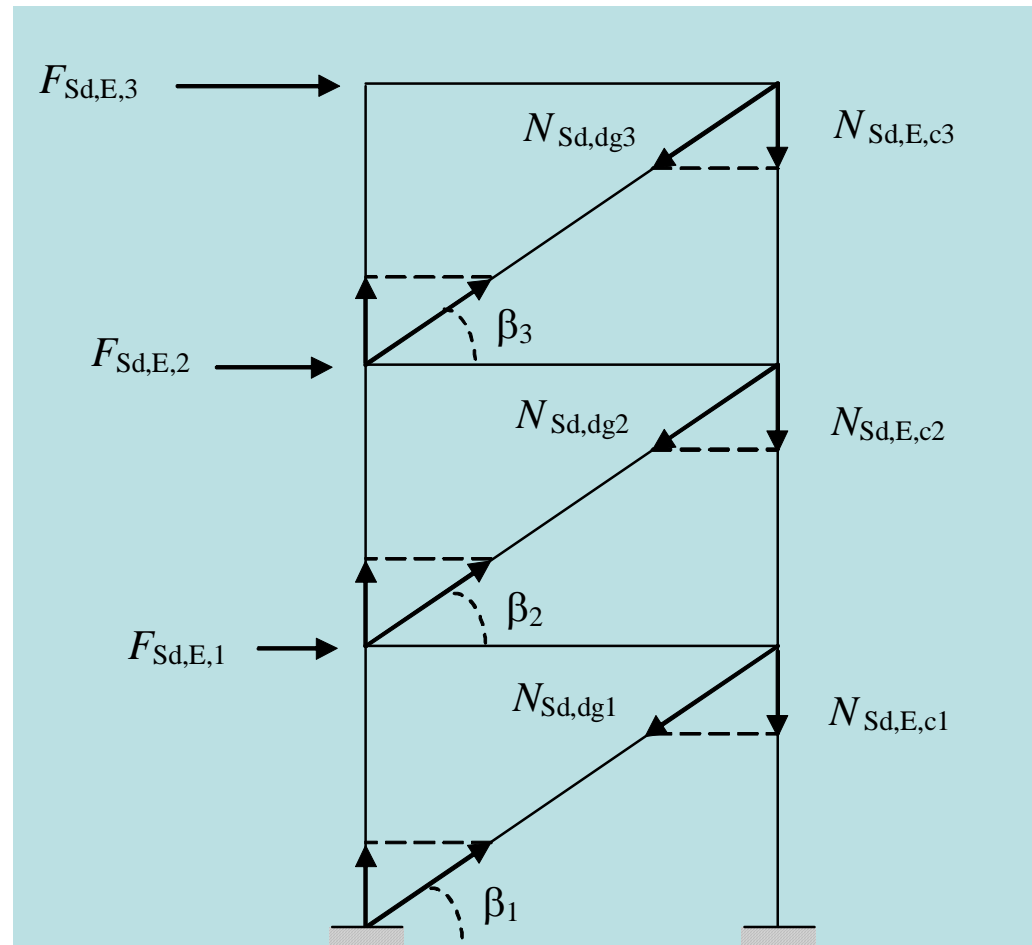
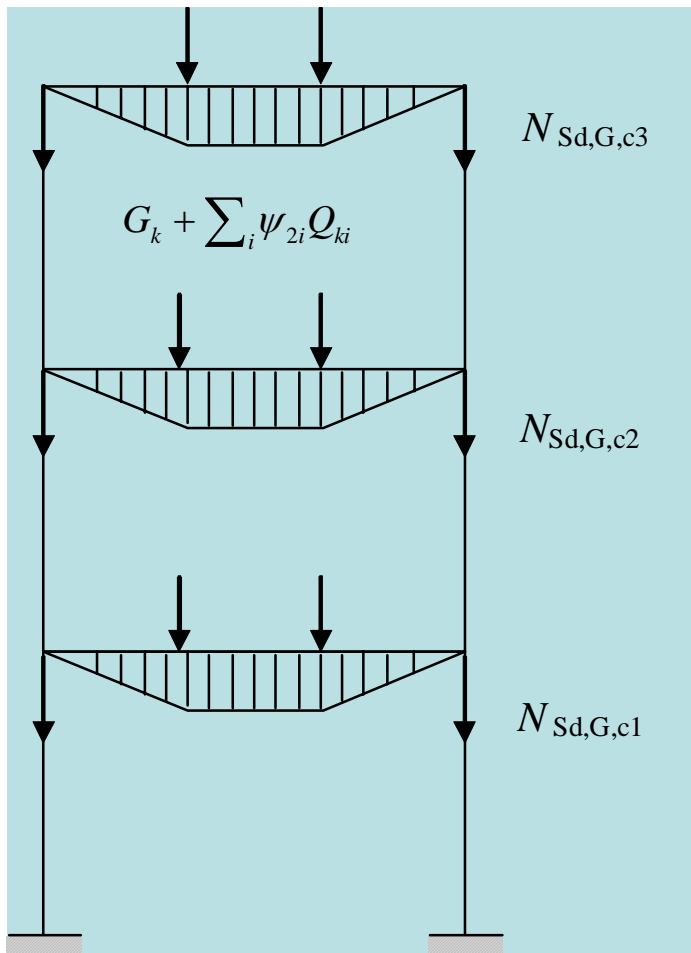


### Fase B:

- Verifica di resistenza della diagonale tesa
- Verifica di travi, colonne, collegamenti, fondazioni (gerarchia delle resistenze)

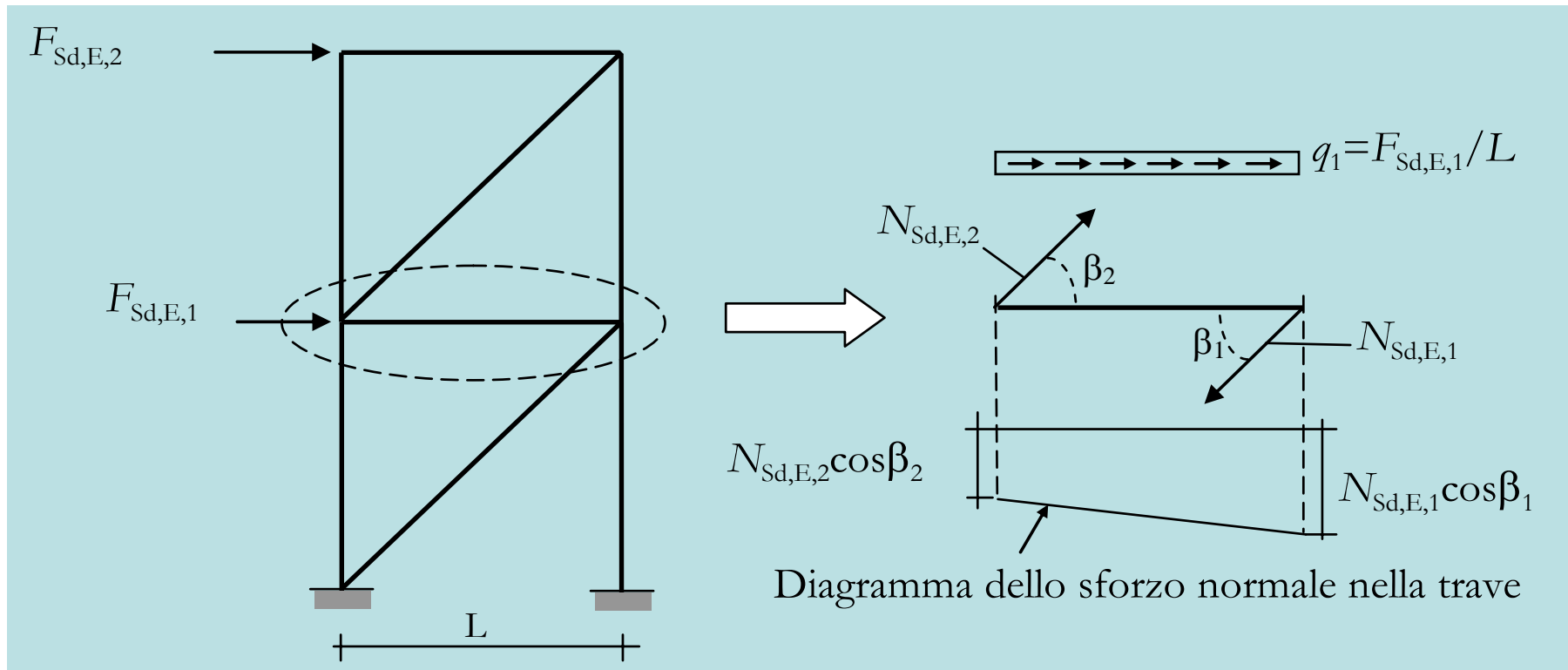
## Modellazione strutturale

### Schema delle sollecitazioni:



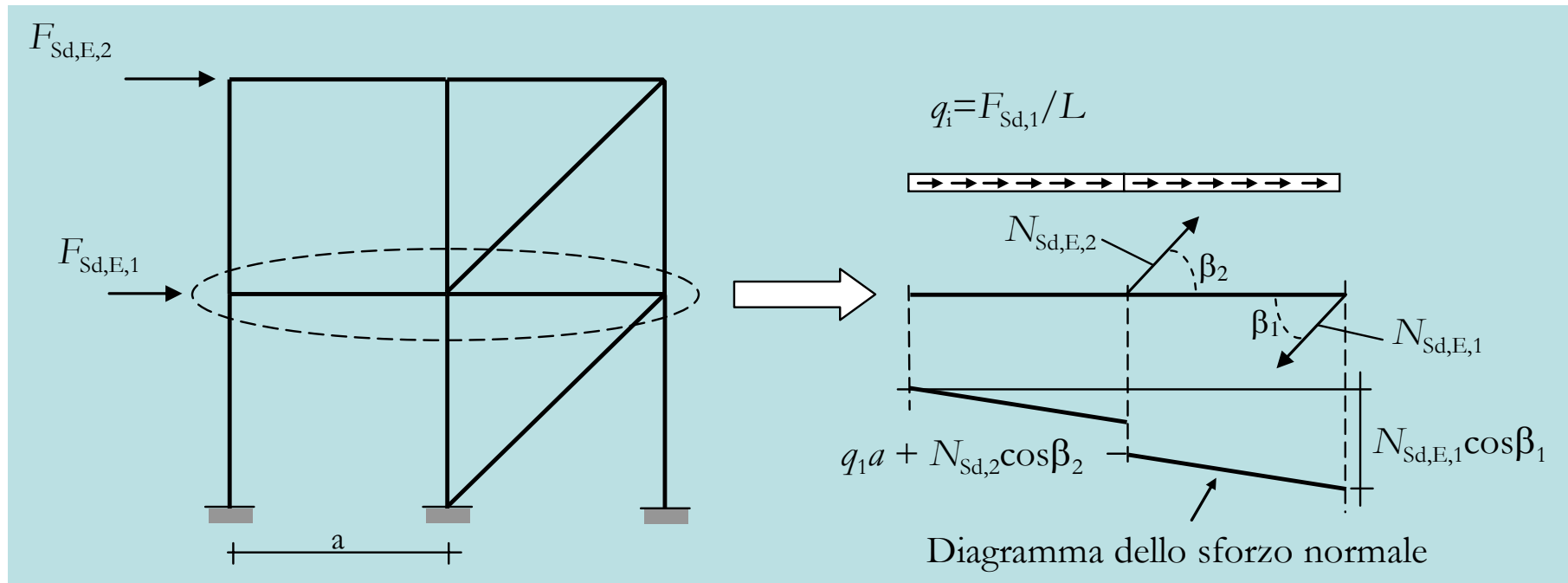
## Modellazione strutturale

### Sforzo normale nelle travi:



## Modellazione strutturale

### Sforzo normale nelle travi:



## Gerarchia delle resistenze – Definizioni preliminari

$(\cdot)_{Sd}$



Valore di progetto della generica sollecitazione, determinato con un modello elastico, sottoposto alla combinazione sismica delle azioni di progetto

$(\cdot)_{Sd,G}$



Valore di  $(\cdot)_{Sd}$  dovuto ai carichi gravitazionali

$(\cdot)_{Sd,E}$



Valore di  $(\cdot)_{Sd}$  dovuto alle forze sismiche

$$\alpha_i = \frac{\gamma_{ov} S N_{pl,Rd,i}}{N_{Sd,E,i}}$$



Coefficiente di sovraresistenza 'locale' (relativo all'i-esima diagonale tesa)

$$\alpha = \min \left\{ \frac{\gamma_{ov} S N_{pl,Rd,i}}{N_{Sd,E,i}} \right\} \leq q$$

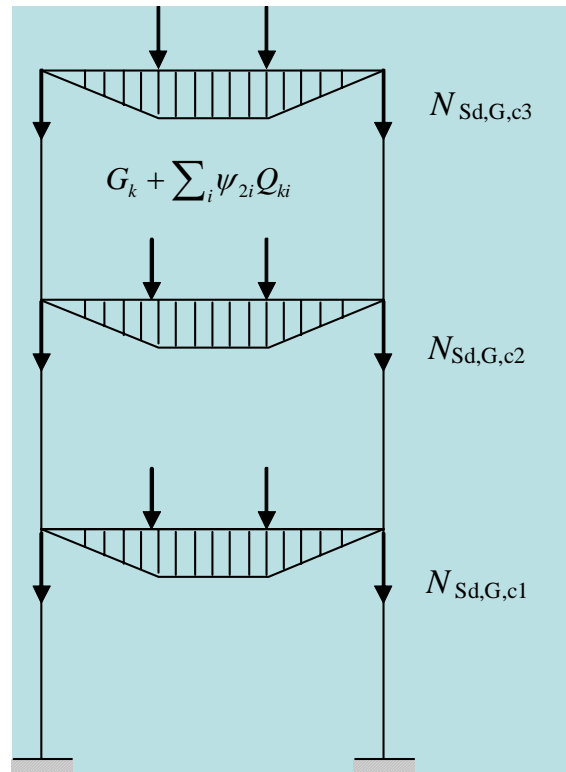


Coefficiente di sovraresistenza 'globale' (relativo all'intera struttura)

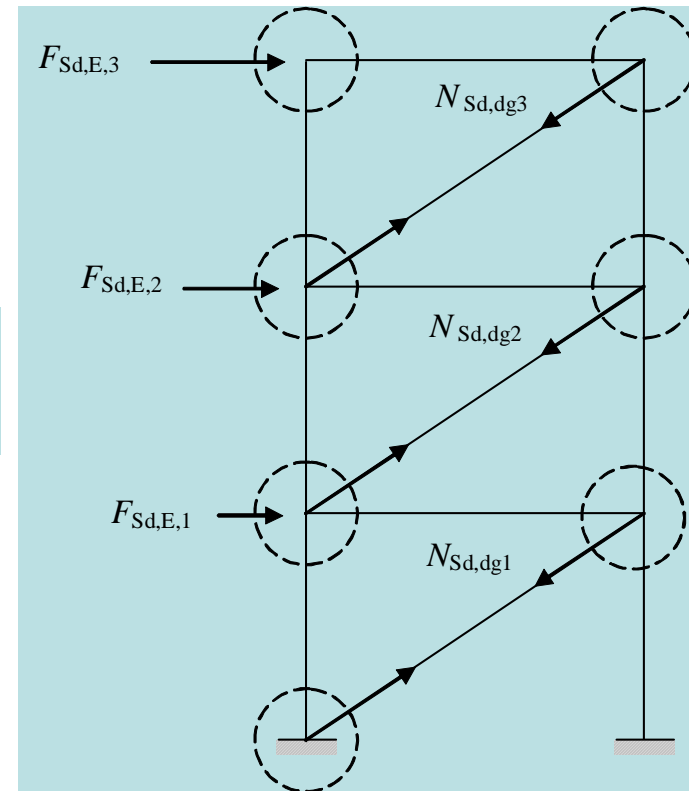


# Gerarchia delle resistenze - Collegamenti

## Sollecitazioni di verifica dei collegamenti



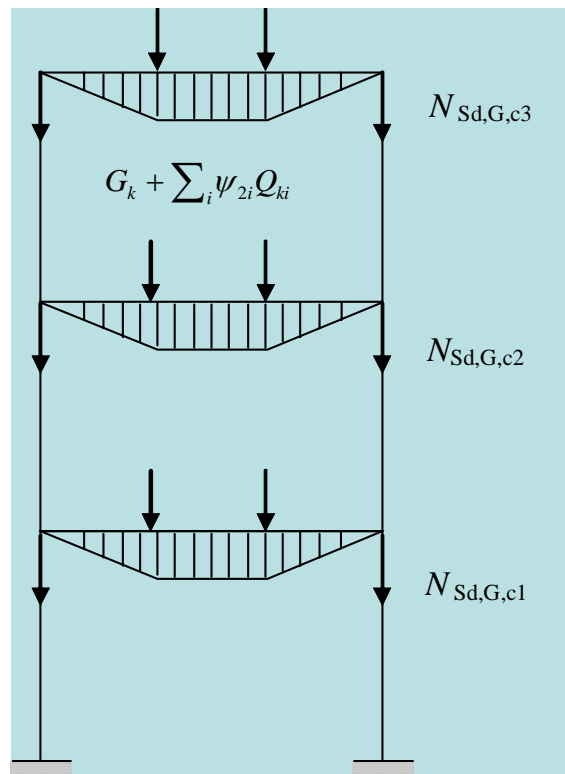
$$+ \alpha_{i=1,2,3} \times$$



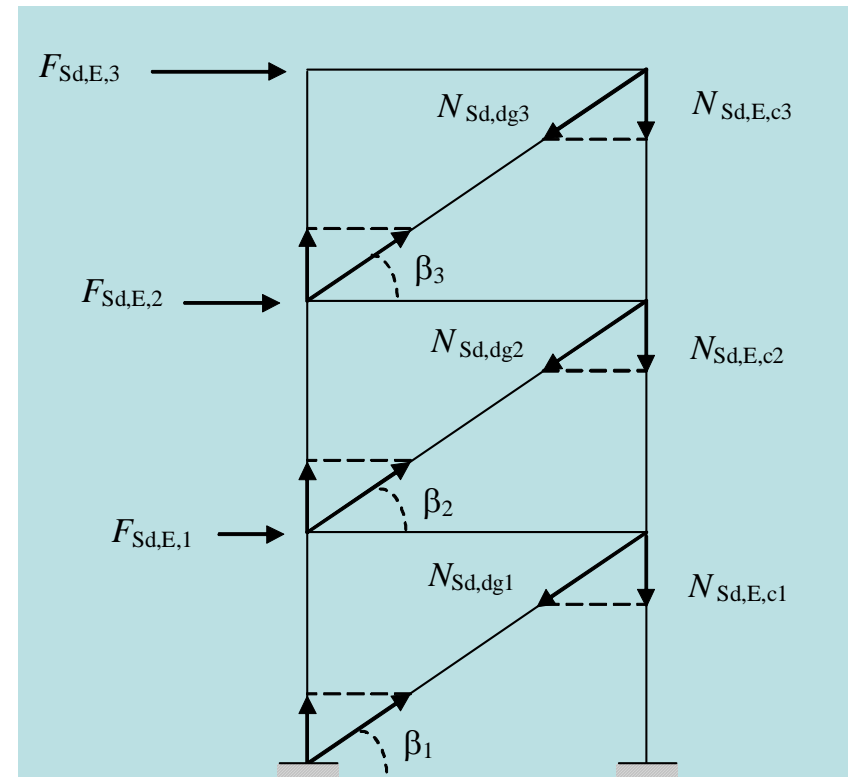
$$\alpha_i = \frac{\gamma_{ov} S N_{pl,Rd,i}}{N_{Sd,E,i}}$$

# Gerarchia delle resistenze – Travi e colonne

## Sollecitazioni di verifica di travi e colonne



+  $\alpha$  x



$$\alpha = \min \left\{ \frac{\gamma_{ov} s N_{pl,Rd,i}}{N_{Sd,E,i}} \right\} \leq q$$

## Gerarchia delle resistenze – Prescrizioni OPCM

### Strutture a 'duttilità bassa'

Verifiche basate su



$$\left\{ \begin{array}{l} (\cdot)_{Sd} \\ (\cdot)_{Sd,G} + \alpha_i (\cdot)_{Sd,E} \end{array} \right.$$

Gerarchia solo per i collegamenti delle zone dissipative

### Strutture a 'duttilità alta'

Verifiche basate su

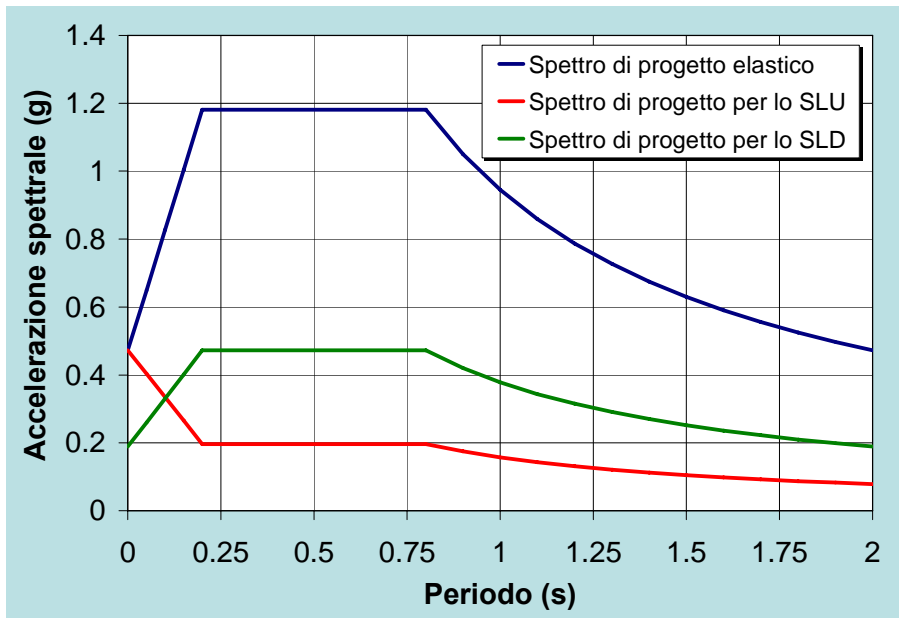


$$\left\{ \begin{array}{l} (\cdot)_{Sd} \\ (\cdot)_{Sd,G} + \alpha_i (\cdot)_{Sd,E} \\ (\cdot)_{Sd,G} + \alpha (\cdot)_{Sd,E} \end{array} \right.$$

Gerarchia per tutti i collegamenti e le membrature non dissipative

## Azione sismica: spettri di progetto

### Spettro delle accelerazioni di progetto:



$$0 < T < T_B \dots \dots S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left( 1 + \frac{T}{T_B} \cdot \left( \frac{2.5}{q} - 1 \right) \right)$$

$$T_B < T < T_C \dots \dots S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q}$$

$$T_B < T < T_C \dots \dots S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D < T \dots \dots S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

Categoria suolo	S	T <sub>B</sub>	T <sub>C</sub>	T <sub>D</sub>
A	1,0	0,15	0,40	2,0
B, C, E	1,25	0,15	0,50	2,0
D	1,35	0,20	0,80	2,0

Zona	Valore di a <sub>g</sub>
1	0,35g
2	0,25g
3	0,15g
4	0,05g

**Zona 1 – Suolo tipo A**  
**T = 0.67 s**



**a<sub>g</sub> = 0.35g; S = 1.0; S<sub>a,e</sub> = 0.53g**

## Azione sismica: fattore di struttura

$$q = q_0 k_D k_R$$

$q_0 \rightarrow$  tipologia strutturale e criteri di gerarchia

$k_D \rightarrow$  risorse di duttilità locale

$k_R \rightarrow$  regolarità strutturale

TIPOLOGIA STRUTTURALE	CLASSE DI DUTTILITÀ	
	BASSA	ALTA
Strutture intelaiate	4	$5\alpha_u/\alpha_1$
Controventi reticolari concentrici	2	4
Controventi eccentrici	4	$5\alpha_u/\alpha_1$
Strutture a mensola o a pendolo invertito	2	—
Strutture intelaiate controventate	4	$4\alpha_u/\alpha_1$

zona dissipativa 'duttile'  $s \geq 1.2 \Leftrightarrow k_D = 1.0$

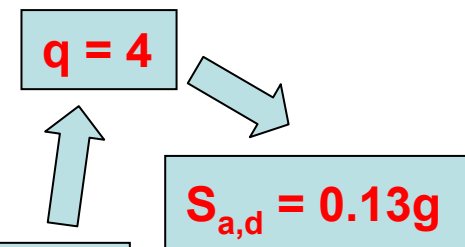
zona dissipativa 'plastica'  $1.0 \leq s \leq 1.2 \Leftrightarrow k_D = 0.75$

zona dissipativa 'snella'  $s \leq 1.0 \Leftrightarrow k_D = 0.5$

regolare in elevazione  $\Leftrightarrow k_R = 1.0$

irregolare in elevazione  $\Leftrightarrow k_R = 0.8$

$$q_0 = 4; k_D = 1; k_R = 1$$



## Forze sismiche di piano

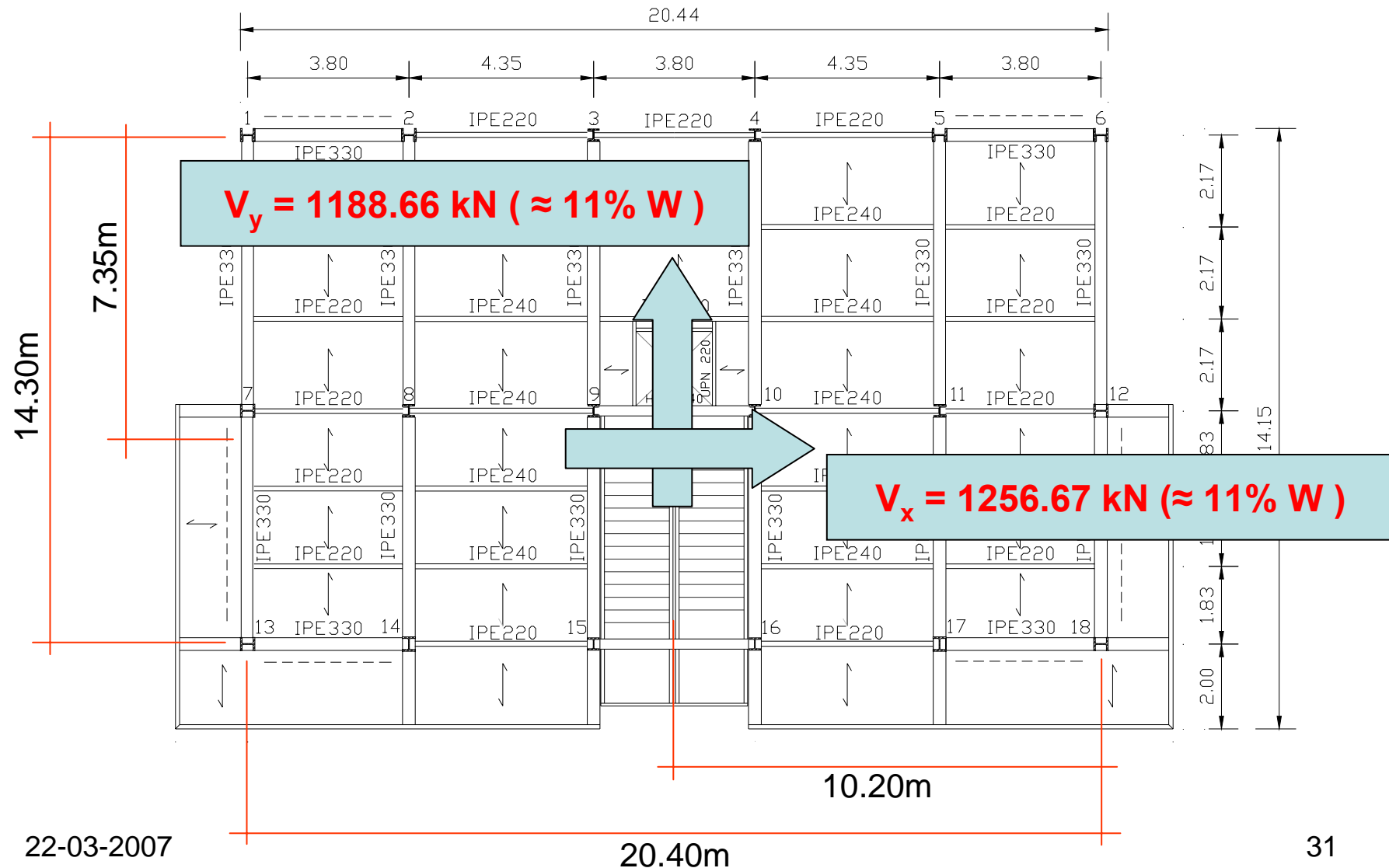
$z_i$ (m)	Impalcato	Masse ( $m_i$ )	$m_i \times z_i$	Fi-X ( $T_{1X}=0.67s$ ) (kN)		Fi-Y ( $T_{1Y}=0.67s$ ) (kN)	
				SLU	SLD	SLU	SLD
18.00	5	204.79	3686.22	368.55	592.39	368.55	592.39
14.50	4	218.54	3168.83	316.82	509.23	316.82	509.23
11.00	3	218.62	2404.82	240.43	386.46	240.43	386.46
7.50	2	223.21	1674.08	167.37	269.03	167.37	269.03
4.00	1	227.09	908.36	90.82	145.98	90.82	145.98
Totale		1092.25	11842.31	1184.00	1903.09	1184.00	1903.09

$$F_i = F_h \frac{m_i z_i}{\sum m_j z_j}$$

$$F_h = \lambda M S_d(T_1) = \lambda W S_d(T_1) / g$$

$$\lambda = 0.85$$

## Forze sismiche di piano



## Forze sismiche sui controventi più sollecitati

regolare in pianta, eccentricità accidentali  $\Leftrightarrow \delta = 1 + 0.6 \frac{x}{L_e}$

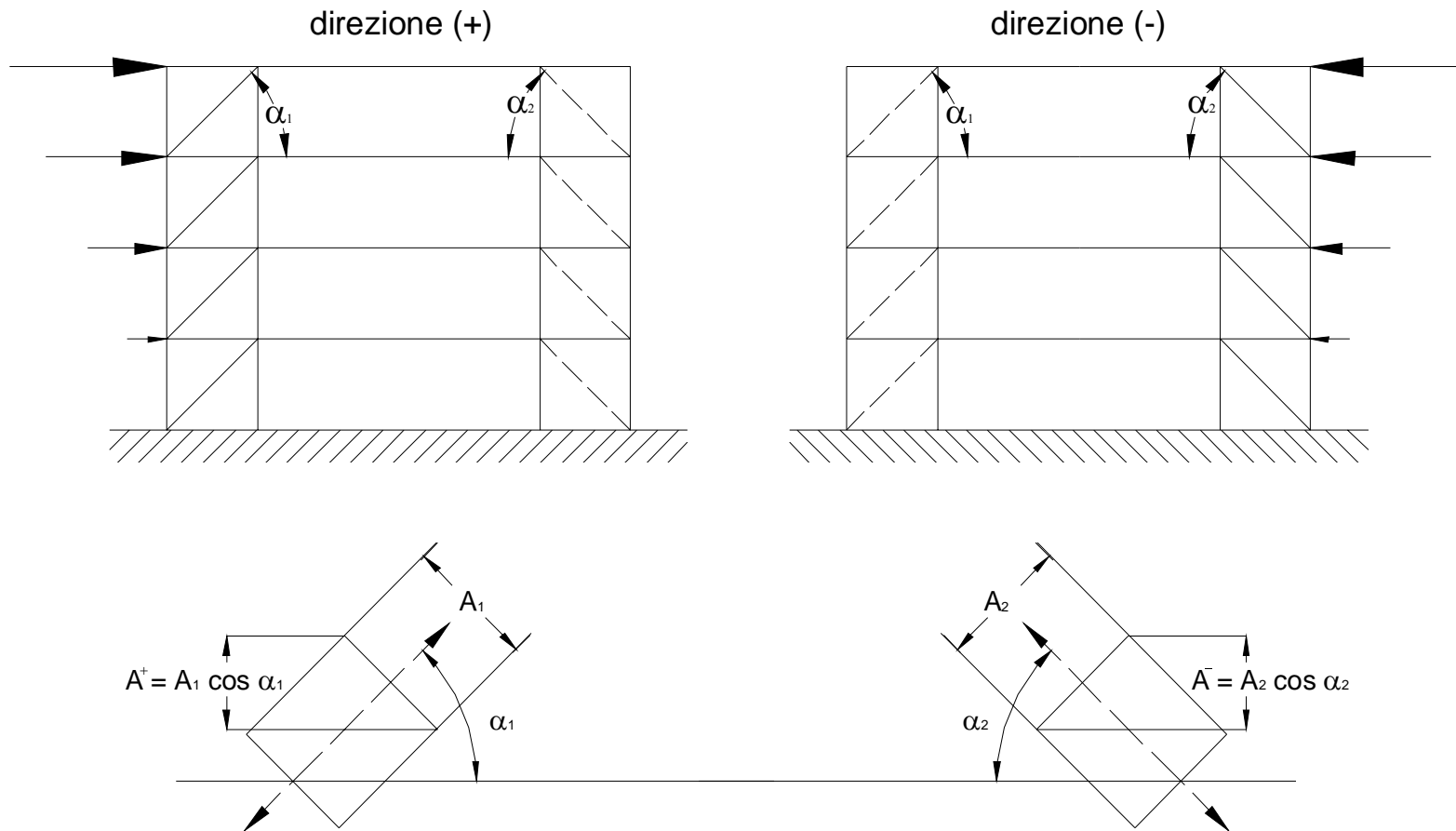
$$\delta_x = 1 + 0.6 \cdot \frac{7.35}{14.3} = 1.31$$

$$\delta_y = 1 + 0.6 \cdot \frac{10.2}{20.4} = 1.30$$

Piano	$F_{x,i}$ (kN)		$F_{y,i}$ (kN)	
	SLU	SLD	SLU	SLD
5	254.26	406.82	240.50	385.35
4	218.57	349.71	206.74	331.25
3	165.86	265.38	156.89	251.37
2	115.48	184.77	109.23	175.01
1	62.66	100.26	59.27	94.97
Taglio alla base	816.83	1306.93	772.63	1237.96



## Verifica delle diagonali



$$\frac{|A_v^+ - A_v^-|}{A_v^+ - A_v^-} \leq 0.05$$

## Verifica delle diagonali

$$V_{Sd} \leq f_y A_d \cos \alpha$$



Verifica della diagonale tesa

$$V_{Sd} \leq 2\chi f_y A_d \cos \alpha$$



Verifica della diagonale compressa

$$\bar{\lambda} > 1.3 \Rightarrow \chi < 0.5 \quad (\text{per profili europei})$$



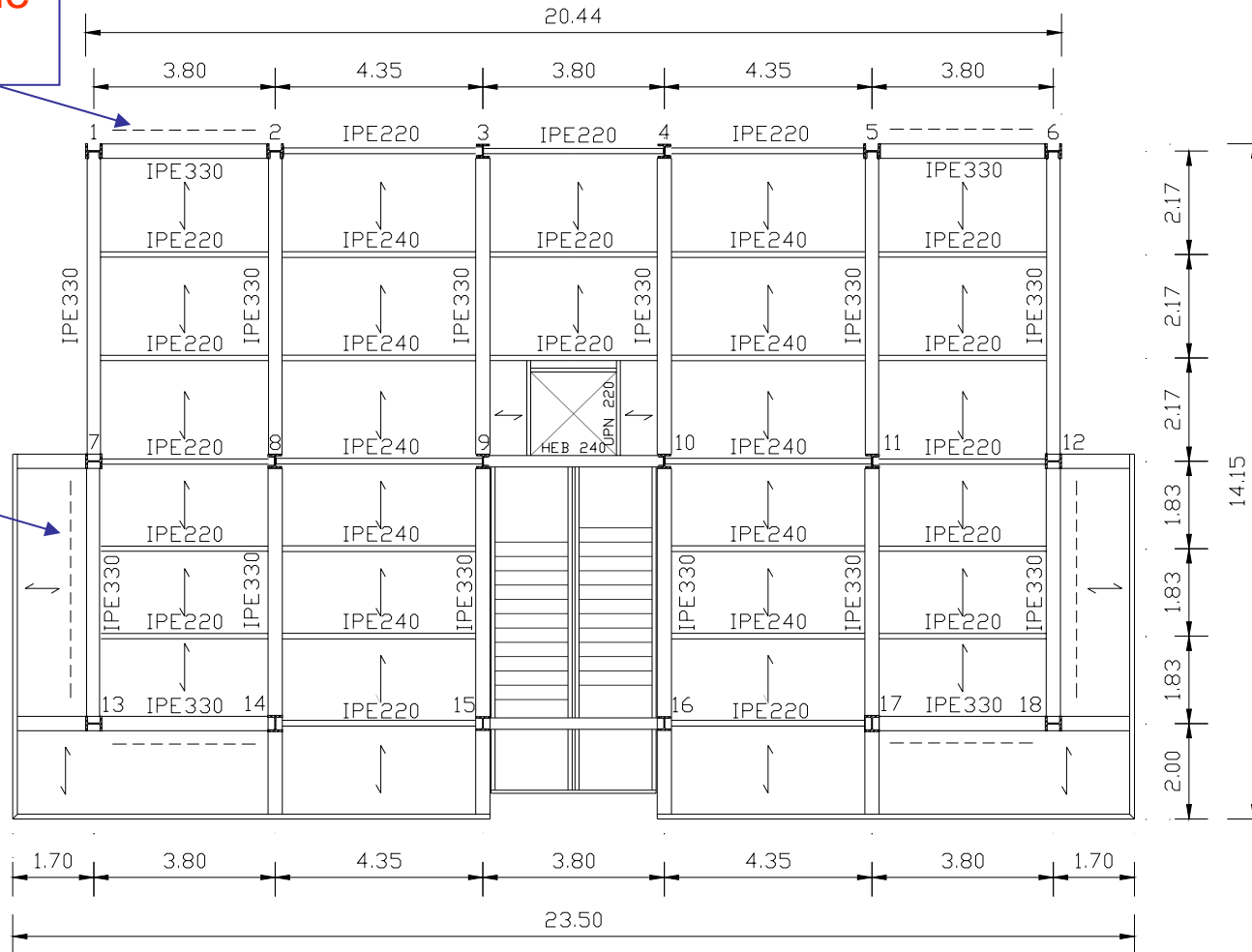
è condizionante la verifica della diagonale compressa

(i controventi a X, per i quali è prescritto  $\bar{\lambda} > 1.3$ , sono sempre condizionati dalla diagonale compressa, per i controventi a diagonale semplice dipende dalla snellezza adottata)

## Verifica delle diagonali

Controventi  
a diagonale  
singola

Controventi  
a croce di  
S.Andrea

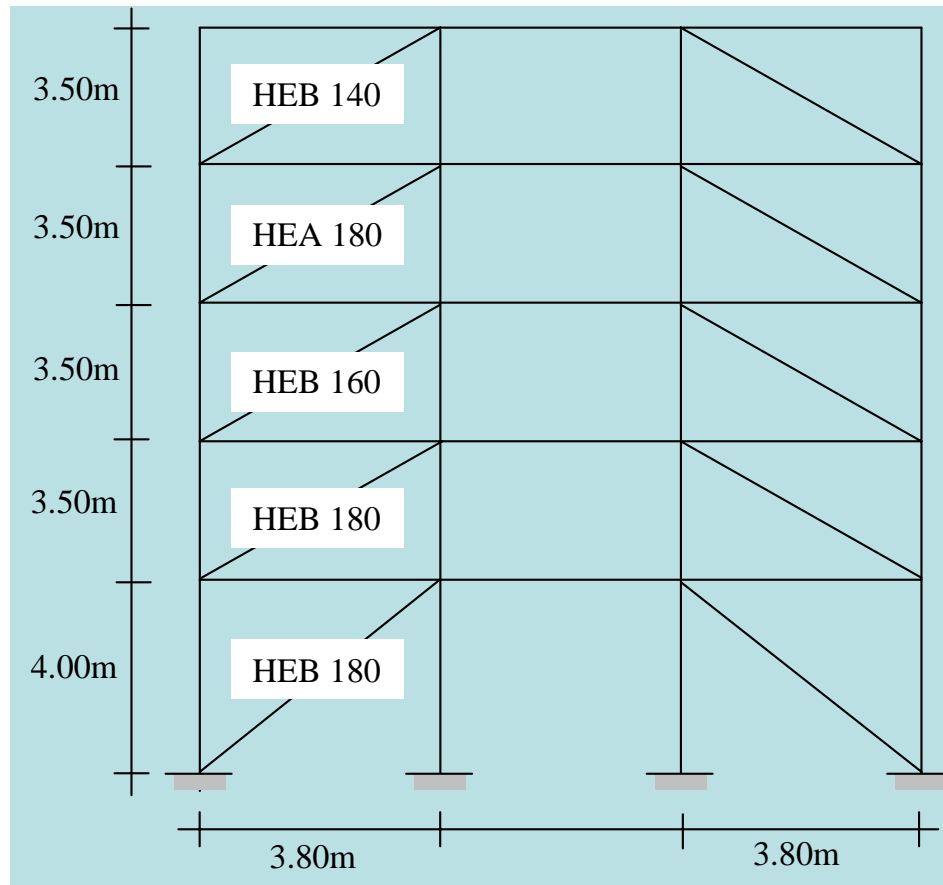


22-03-2007

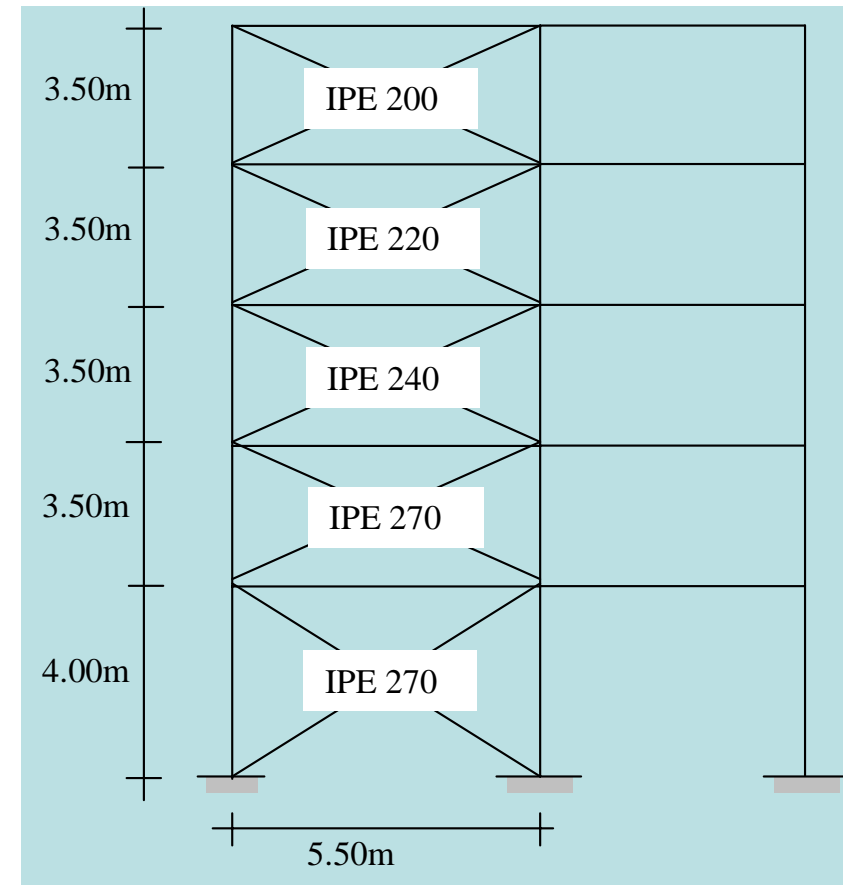
Controventi

## Verifica delle diagonali

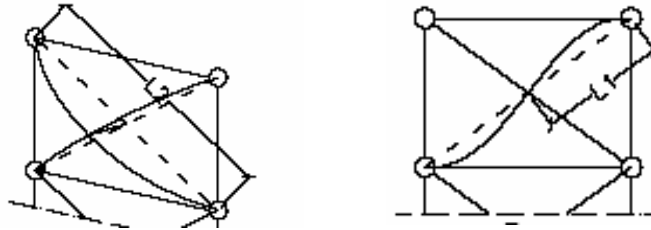
**Direzione X**



**Direzione Y**



## Verifica delle diagonali



### Direzione X

Sezione	$\lambda^*$	$\lambda^{**}$	$\bar{\lambda}^*$	$\bar{\lambda}^{**}$	$\chi$	$N_{b,Rd}$ (kN)	$N_{Sd}$ (kN)	$\frac{N_{b,Rd}}{N_{Sd}}$	$N_{pl,Rd}$ (kN)	$2N_{Sd}$ (kN)	$\frac{N_{pl,Rd}}{2N_{Sd}}$
HEB 140	103.2	169.9	1.10	1.81	0.25	190.07	172.84	1.10	961.49	345.68	2.20
HEB 160	76.7	128.4	0.82	1.37	0.40	399.58 500.40	321.42 434.17	1.24 1.15	1204.10	642.84 868.33	1.57 1.46
HEB 180	67.9	113.8	0.72	1.21	0.47	688.96	512.67	1.34	1460.36	1025.33	1.42
HEB 180	70.5	118.2	0.75	1.26	0.45	653.46	592.98	1.10		1185.97	1.23

### Direzione Y

Sezione	$\lambda^*$	$\lambda^{**}$	$\bar{\lambda}^*$	$\bar{\lambda}^{**}$	$\chi$	$N_{b,Rd}$ (kN)	$N_{Sd}$ (kN)	$\frac{N_{b,Rd}}{N_{Sd}}$	$N_{pl,Rd}$ (kN)	$2N_{Sd}$ (kN)	$\frac{N_{pl,Rd}}{2N_{Sd}}$
IPE 200	78.7	145.1	1.03	1.90	0.20	193.84	142.53	1.36	963.57	285.07	3.38
IPE 220	71.35	131.05	0.93	1.72	0.24	265.31	265.06	1.00	1128.22	530.11	2.13
IPE 240	65.2	120.8	0.85	1.58	0.26	367.62	358.03	1.03	1388.76	716.07	1.94
IPE270	58.0	107.6	0.76	1.41	0.31	482.59	422.77	1.14	1551.86	845.54	1.84
IPE270	60.7	113	0.79	1.47	0.35	546.44	482.89	1.13		965.79	1.61

## Gerarchia delle resistenze

Determinati sullo schema a diagonale singola

### Calcolo del coefficiente $\alpha$ per i controventi a diagonale semplice:

Piani	$N_{pl,Rd}$ (kN)	$N_{Sd}$ (kN)	$\alpha_i = \frac{\gamma_{ov} s_i N_{pl,Rd,i}^*}{N_{Sd,i}}$
5	961.49	345.68	3.30
4	1204.10	642.84	2.24
3	1204.10	868.33	1.75
2	1460.36	1025.33	1.78
1	1460.36	1185.97	1.54

➔  $\alpha = 1.54$

\*  $\gamma_{ov} = 1.2$  (acciaio S235),  $s_i = 1.25$  (membrature di classe duttile)

### Calcolo del coefficiente $\alpha$ per i controventi a croce di S. Andrea:

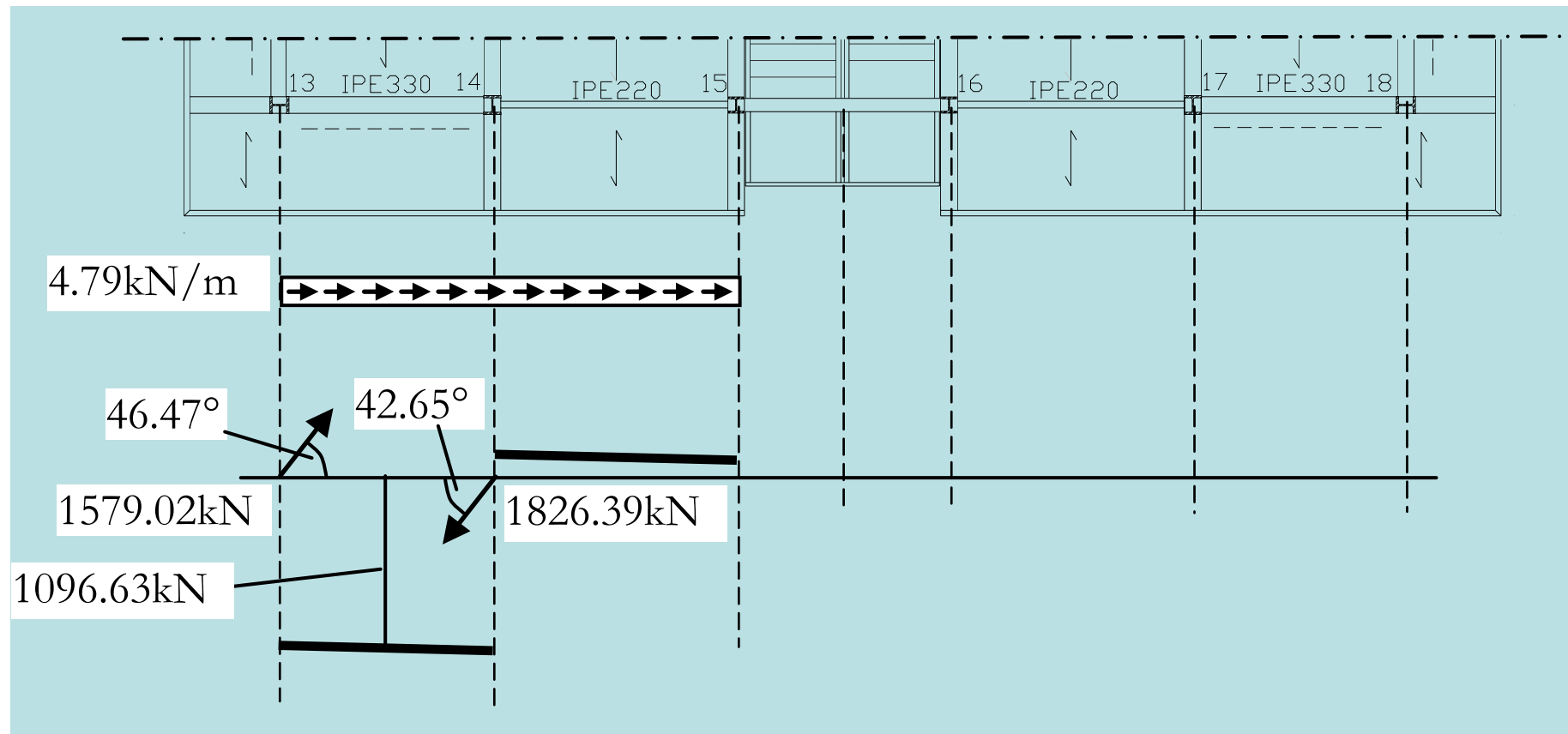
Piani	$N_{pl,Rd}$ (kN)	$N_{Sd}$ (kN)	$\alpha_i = \frac{\gamma_{ov} s_i N_{pl,Rd,i}^*}{N_{Sd,i}}$
5	963.57	285.07	4.65
4	1128.22	530.11	2.93
3	1388.76	716.07	2.54
2	1551.86	845.54	2.52
1	1551.86	965.79	2.21

➔  $\alpha = 2.21$

22-03-20\*  $\gamma_{ov} = 1.1$  (acciaio S355),  $s_i = 1.25$  (membrature di classe duttile)

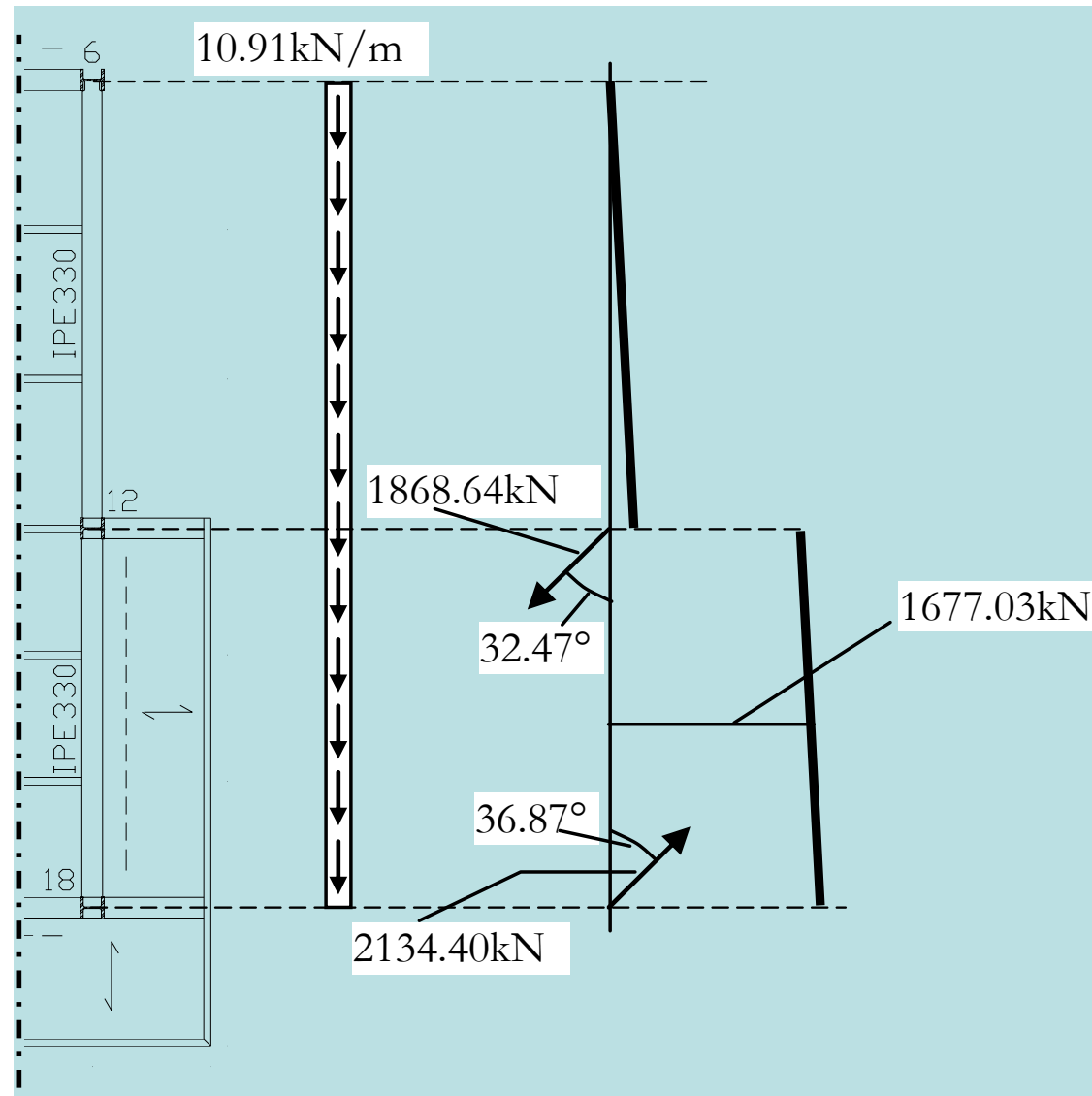
## Verifica delle travi – Calcolo dello sforzo normale

Direzione X



## Verifica delle travi – Calcolo dello sforzo normale

Direzione Y





## Verifica delle travi

**Dominio N-M semplificato (per profili a doppio T laminati a caldo)**

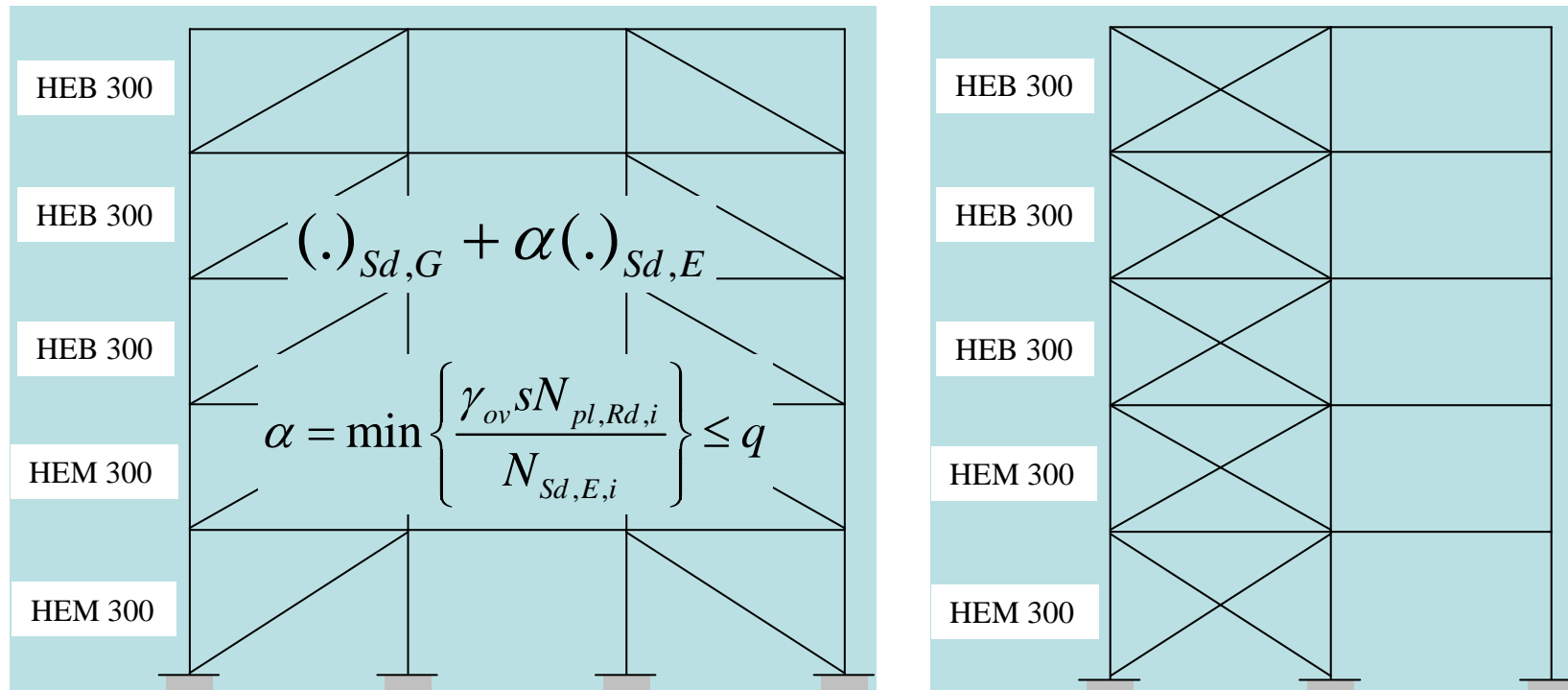
$$M_{N,Rd} = 1.11 \cdot M_{pl,Rd} \left( 1 - \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} \right) \leq M_{pl,Rd}$$

**L'interazione con il taglio è trascurabile se quest'ultimo è inferiore alla metà del taglio plastico**

Direzione del sisma	Trave	Forza di piano amplificata con $\alpha$ (kN)	Carico distribuito equivalente (kN/m)	$N_{Sd}$ in mezzeria (kN)	$V_{Sd}$ (kN)	$M_{Sd}$ in mezzeria (kNm)
X	13-14	96.32	4.79	1168.33	14.33	13.61
-Y	7-13	130.95	10.91	1677.03	24.58	41.44

Direzione del sisma	Trave	Sezione	Acciaio	$V_{pl,Rd}$ (kN)	$M_{pl,Rd}$ (kNm)	$N_{pl,Rd}$ (kN)	Verifica in mezzeria
X	13-14	IPE 330	S355	601.46	271.93	2116.81	0.36
-Y	7-13						0.78

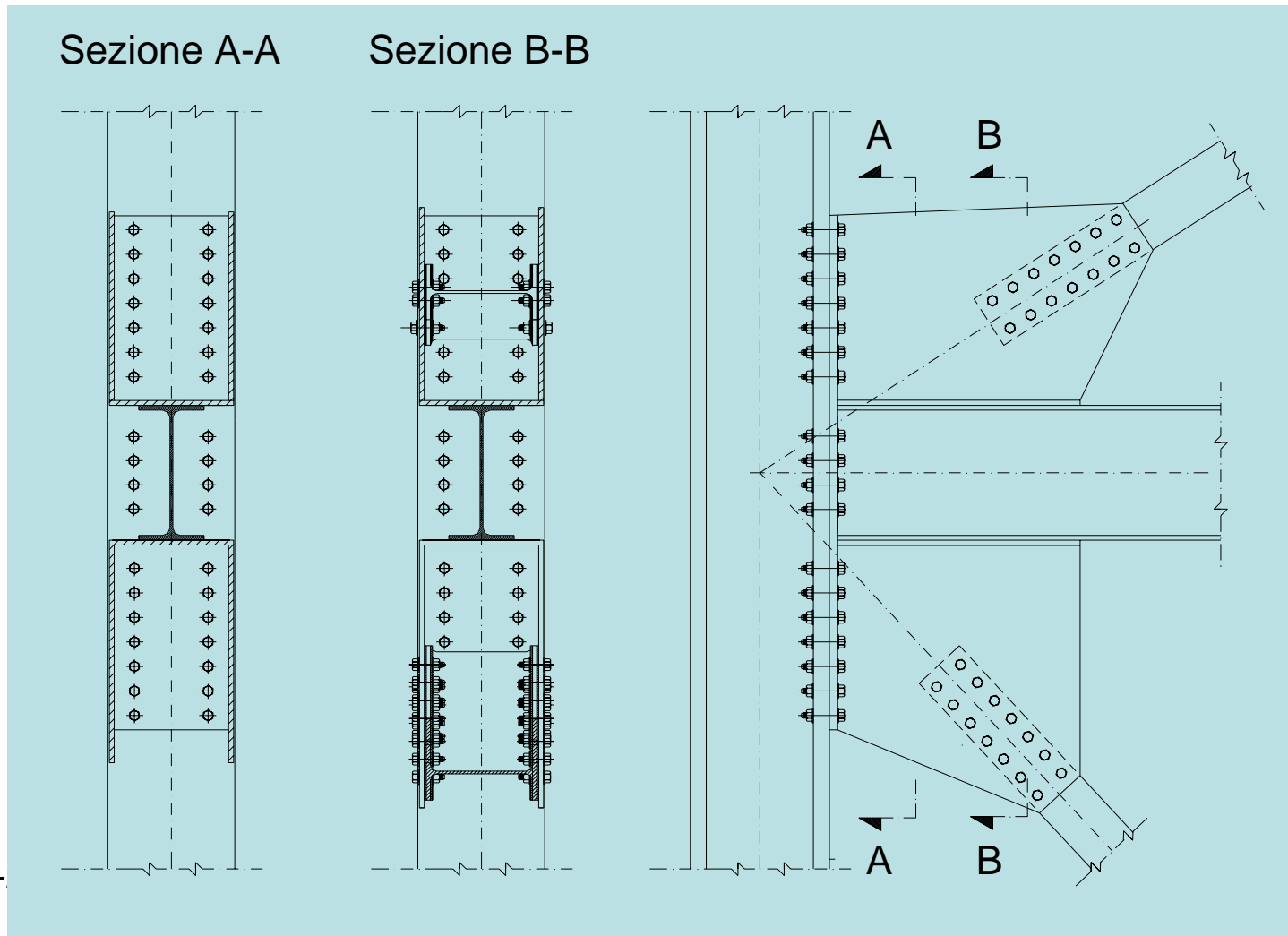
## Verifica delle colonne



Direzione Sisma	Colonna	Sezione	Acciaio	$\lambda$	$\bar{\lambda}$	$\chi$	$N_{pl,Rd}$ (kN)	$N_{b,Rd}$ (kN)	$N_{Sd,G} + \alpha N_{Sd,E}$ (kN)	$\frac{N_{b,Rd}}{N_{Sd}}$
X	Interna	HEM 300	S275	40.0	0.46	0.90	7935.71	7142.14	4673.84	1.53
	Esterna								2781.13	2.85
Y	Interna								4429.91	1.61
	Esterna								2602.21	3.05

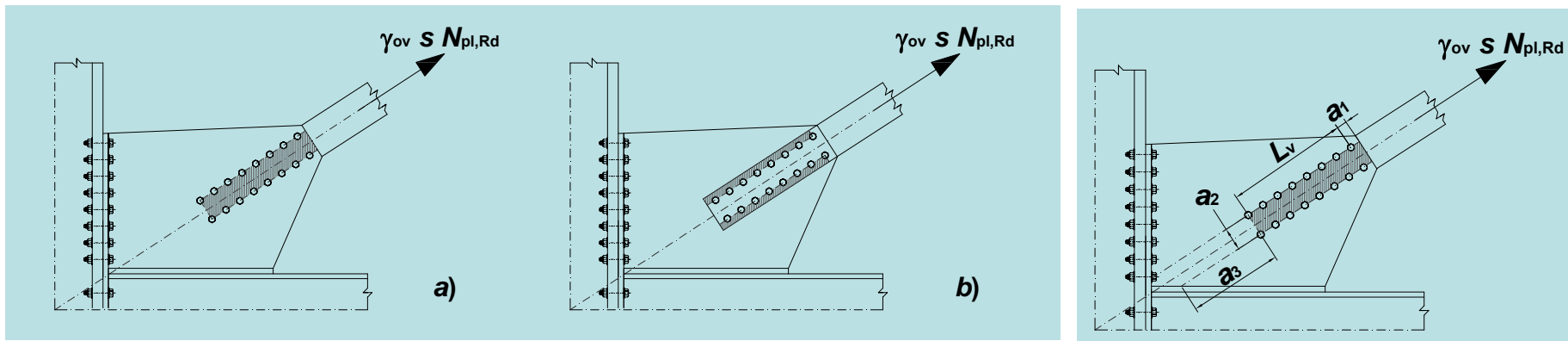
# Collegamenti

## Collegamento diagonale – trave – colonna



# Collegamenti

## Collegamento diagonale – trave – colonna



Resistenza a taglio →

$$F_{V,Rd} = \frac{0.5 f_{ub} A_b}{\gamma_{mb}}$$

Resistenza a rifollamento →

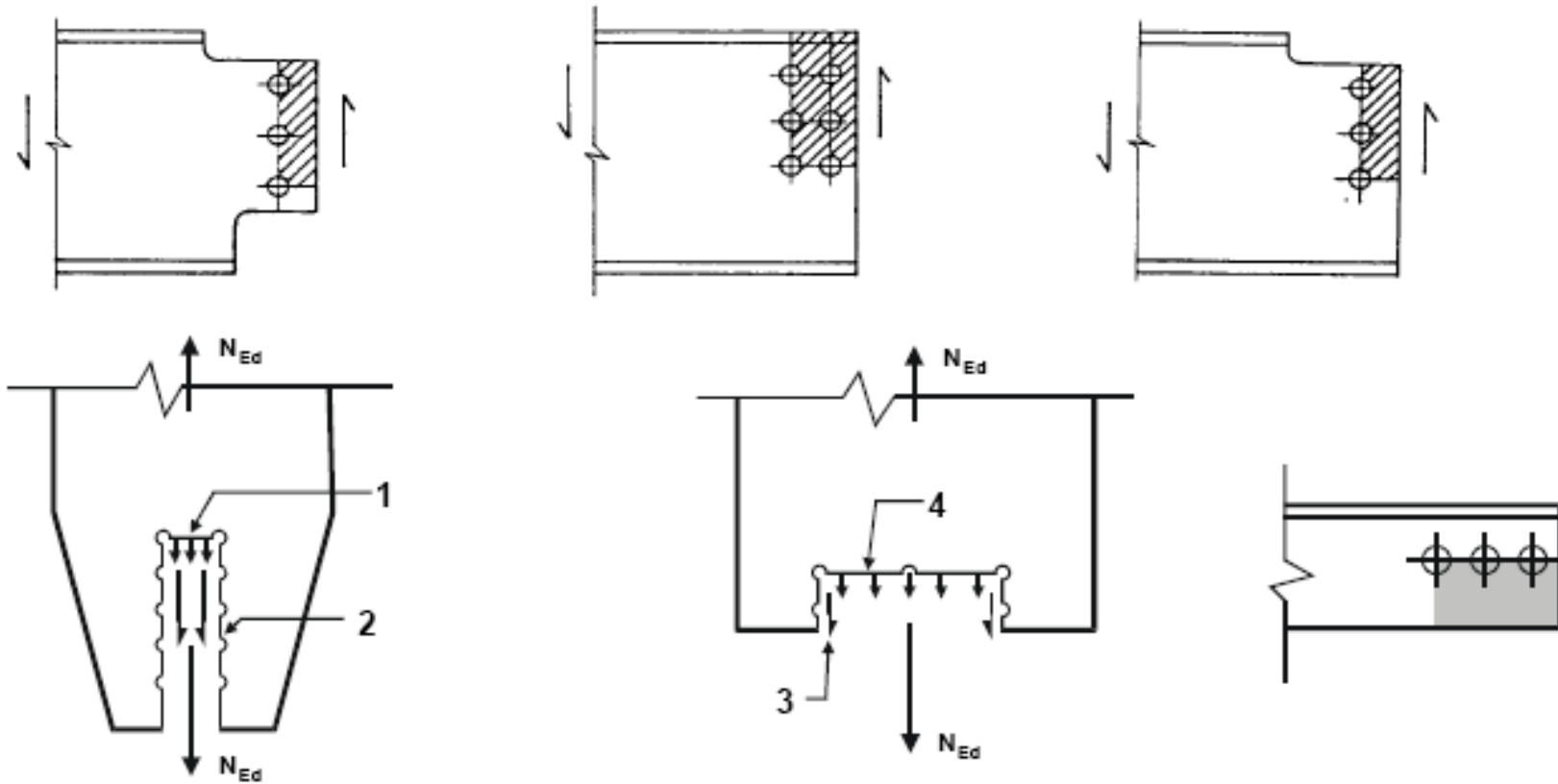
$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \alpha f_u d t}{\gamma_{mb}} \quad \alpha = \min \left( \frac{e_1}{3d_o}; \frac{p_1}{3d_o} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right)$$

Block tearing →

$$F_{Rd} = \frac{f_u}{\gamma_{M2}} A_{nt} + \frac{f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} A_{nv}$$

Z2-U3-ZU07

## Meccanismo *block tearing*



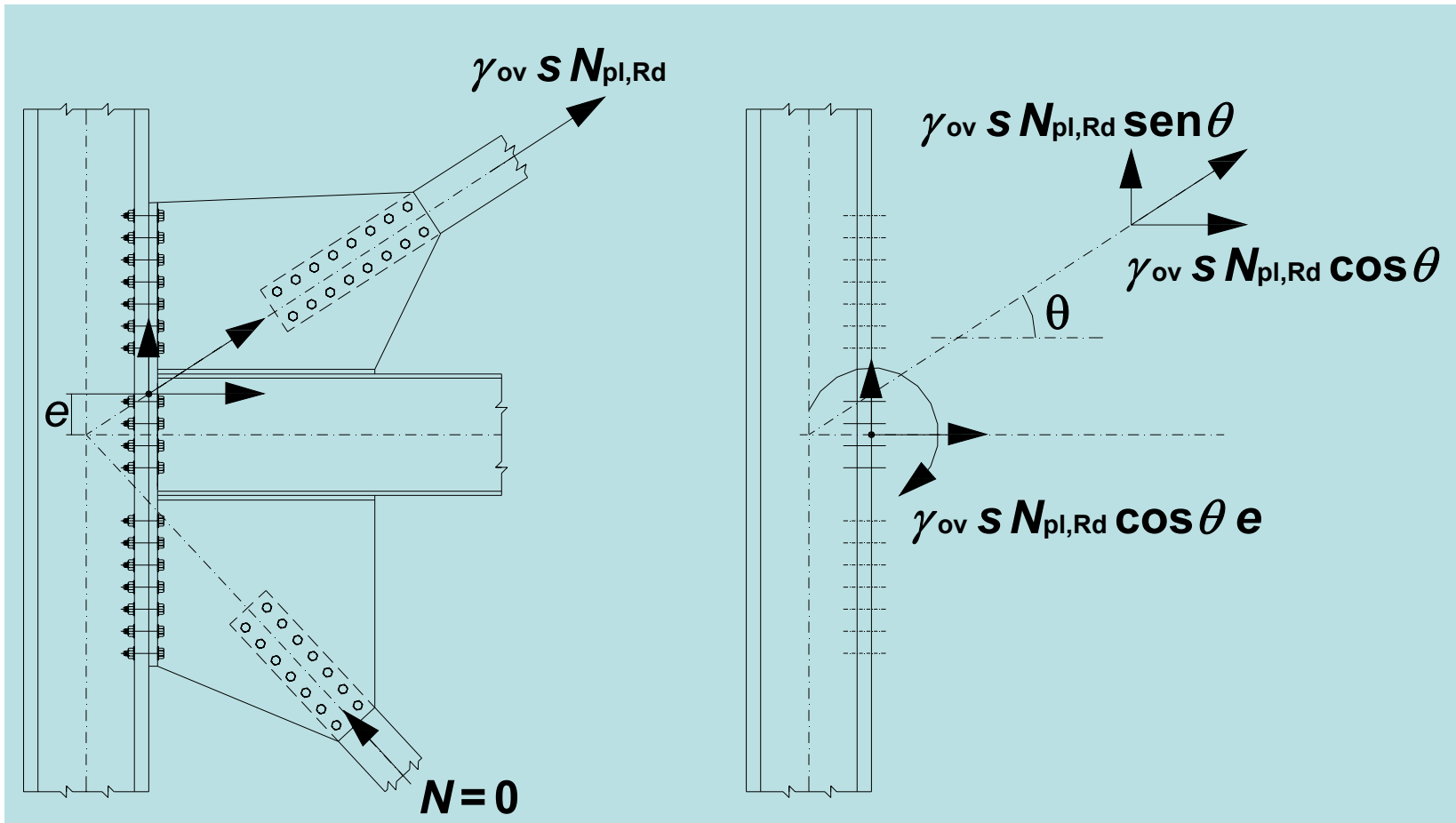
$$F_{Rd} = \frac{f_u}{\gamma_{M2}} A_{nt} + \frac{f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} A_{nv}$$

$A_{nt}$  → area netta soggetta a trazione

$A_{nv}$  → area netta soggetta a taglio

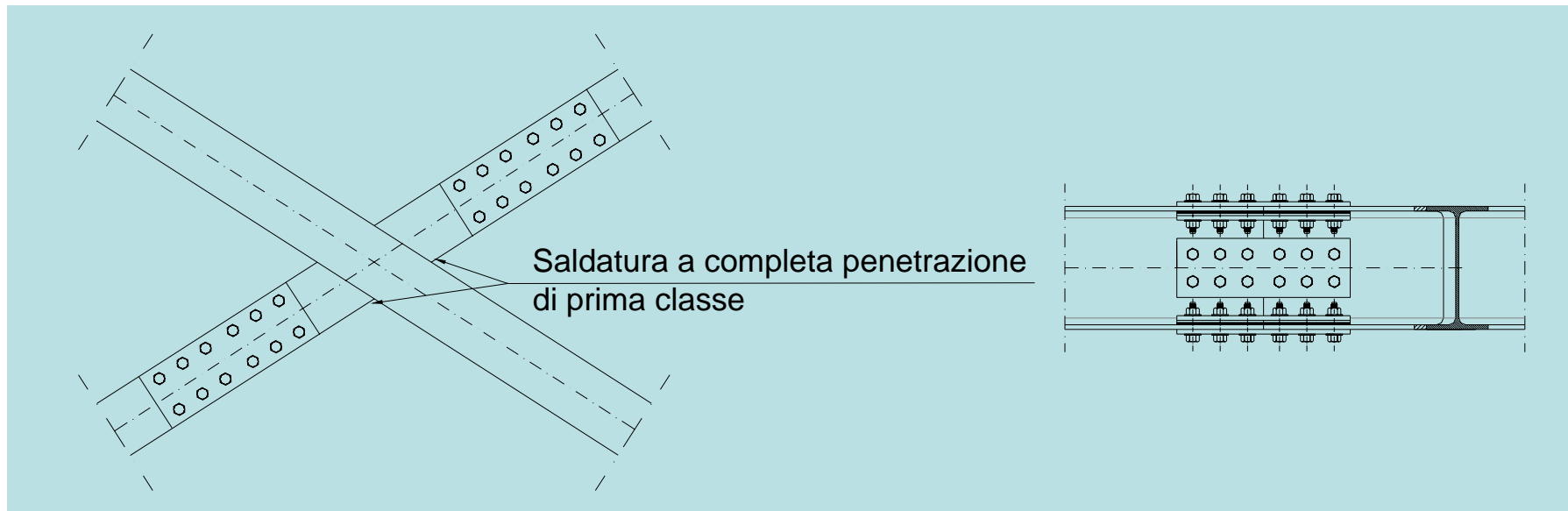
# Collegamenti

## Collegamento flangia – colonna



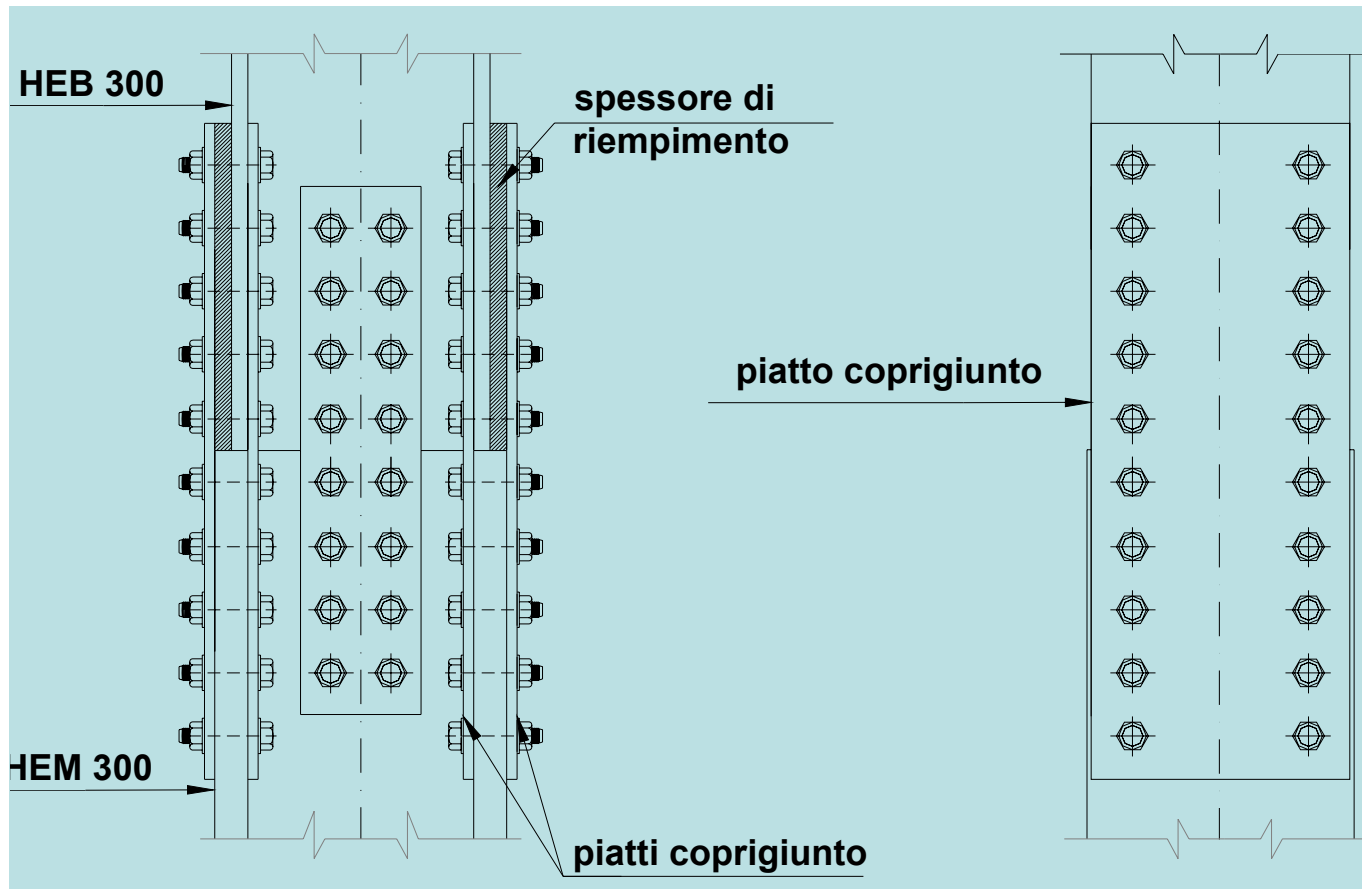
# Collegamenti

## Collegamento diagonale - diagonale



# Collegamenti

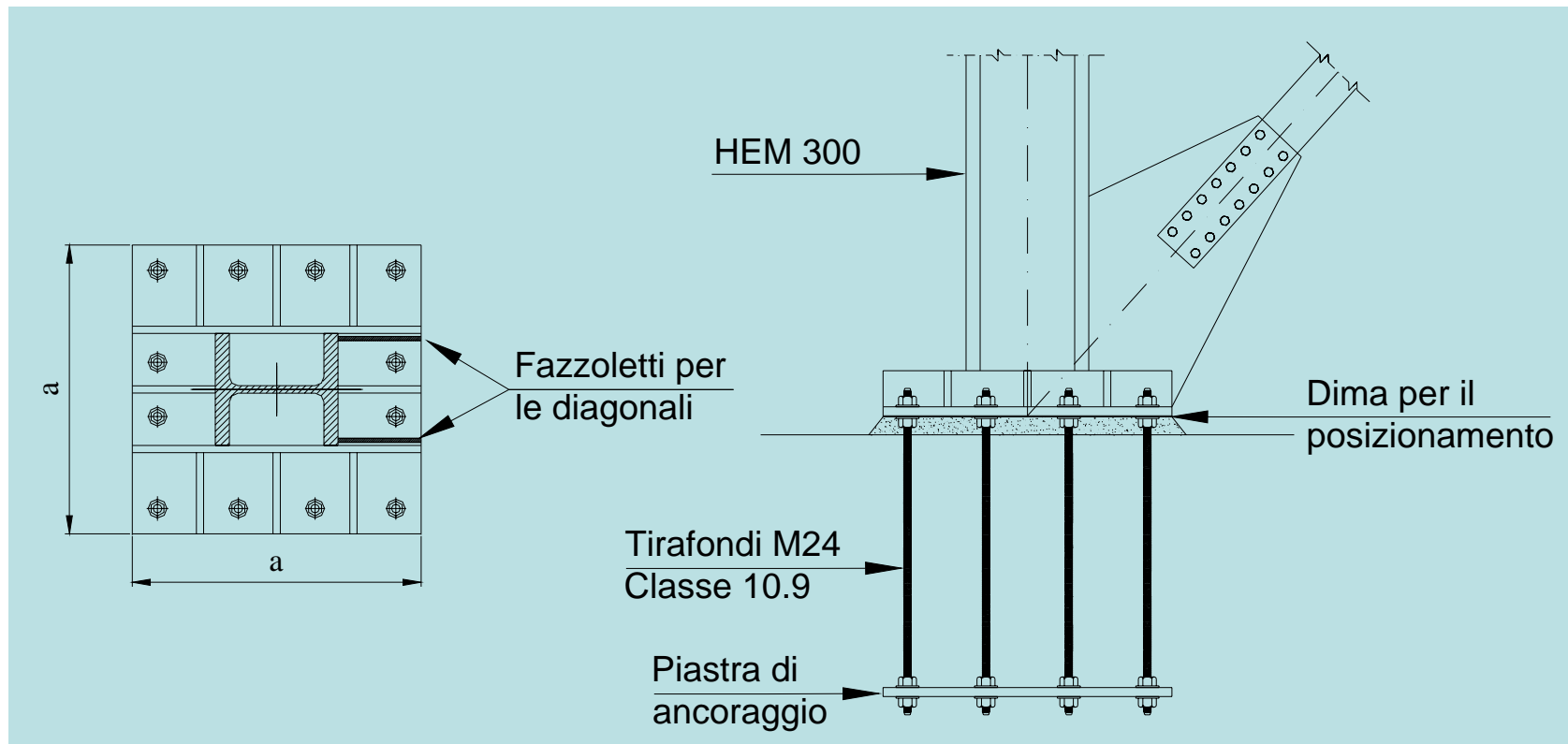
## Collegamento colonna - colonna





# Collegamenti

## Collegamento colonna - fondazione



## Connettori (per forze sismiche)

### Collegamento trave - solaio

Sollecitazione di progetto dei connettori →

$$F_{sd} = \frac{1,3F_{\max}}{n_c}$$

Resistenza a taglio dei connettori  
(tipo pioli Nelson) →

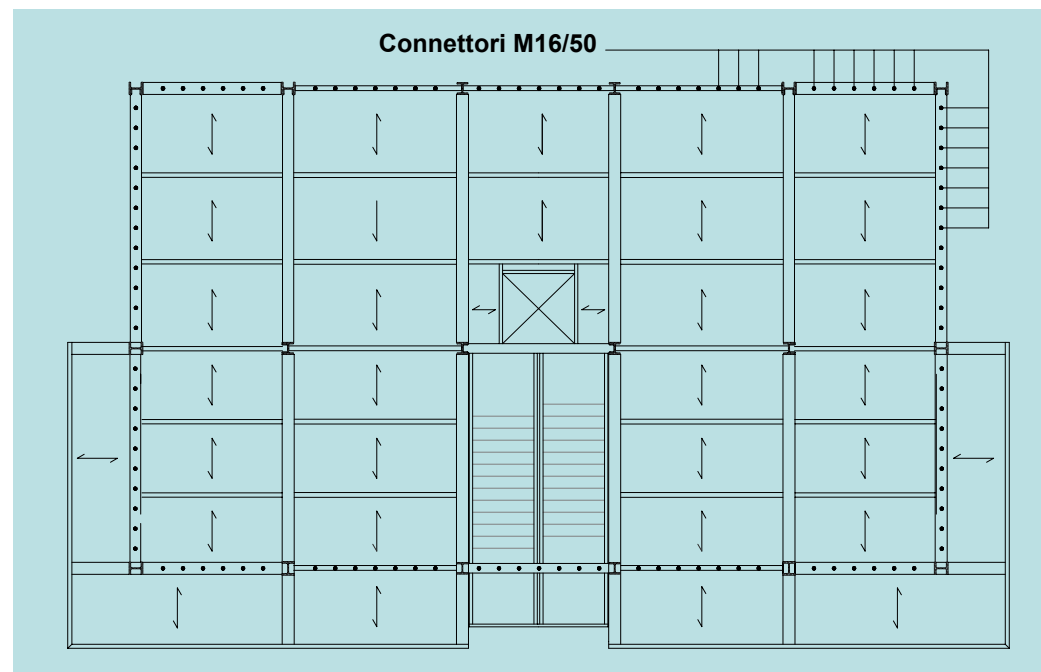
$$P_{Rd,V} = \frac{0,8f_u(\pi d^2 / 4)}{\gamma_v}$$

Resistenza locale del contatto con  
il cls →

$$P_{Rd,cls} = \frac{0,29d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}}}{\gamma_v}$$

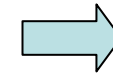
$$n = \frac{F_{sd}}{P_{Rd}} = 2,46 \square 3$$

$$\gamma_v = 1.25$$

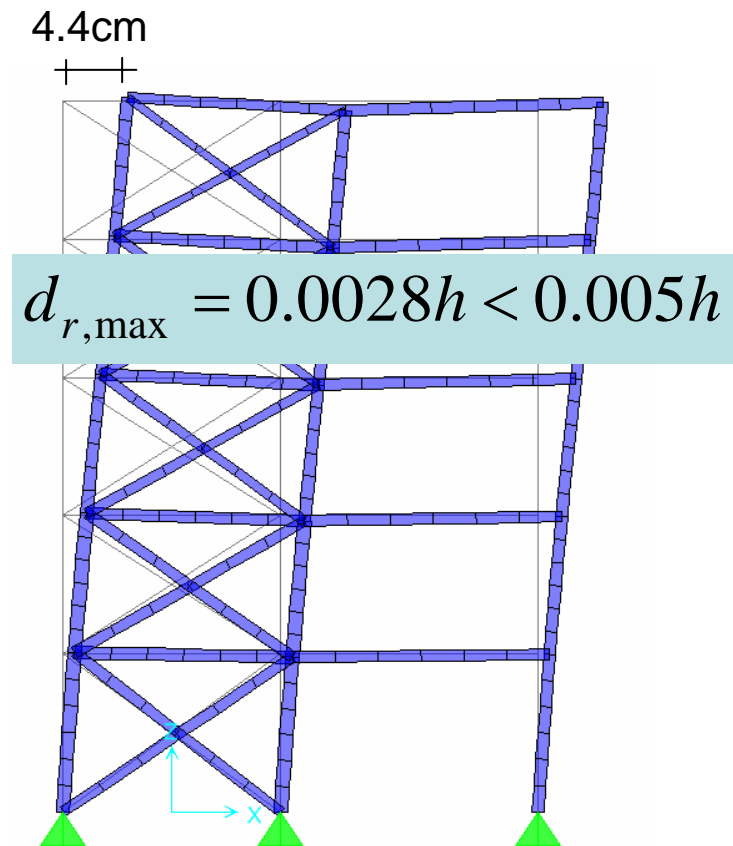
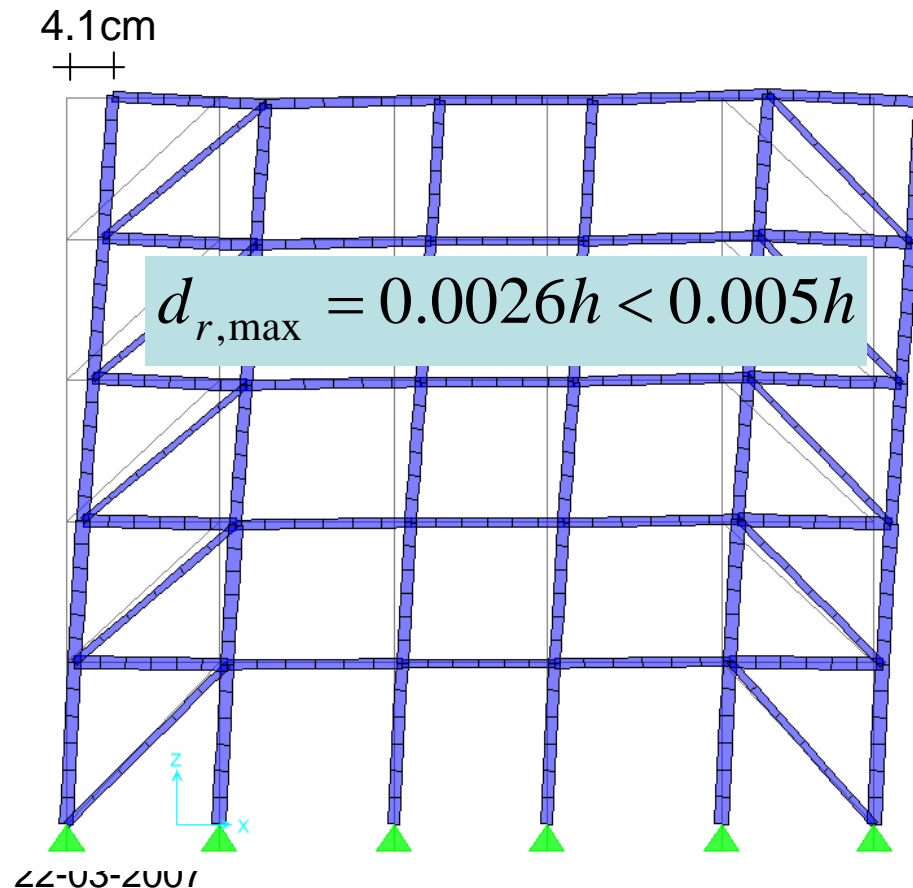


## Stato limite di danno controllato

Tamponature rigidamente collegate alla struttura principale



$$d_r \leq 0.005h$$



## Principali novità della nuova Normativa:

*Prescindendo da considerazioni di carattere generale (migliore zonazione sismica, considerazione esplicita delle tipologie strutturali in acciaio, impostazione moderna e razionale della Norma,...) nel caso specifico...in pratica...*

Gerarchia delle resistenze:

*Per qualunque tipo di struttura*

**I collegamenti (elementi non dissipativi) devono essere dimensionati con sollecitazioni maggiorate rispetto a quelle che derivano da un'analisi elastica con forze di progetto**

*Per strutture dissipative*

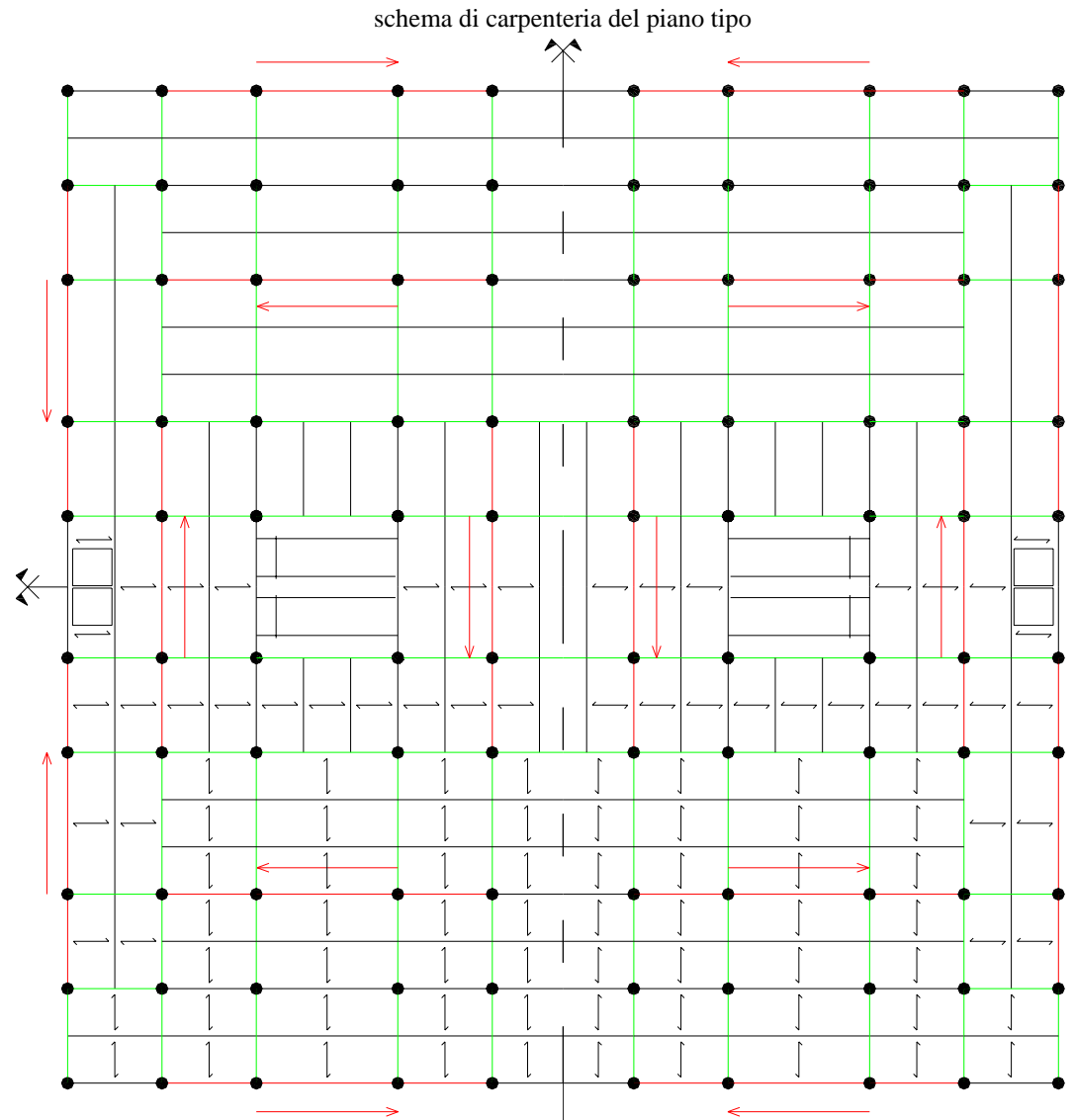
La prescrizione precedente si applica anche a **colonne e travi**

Conseguenze progettuali molto importanti

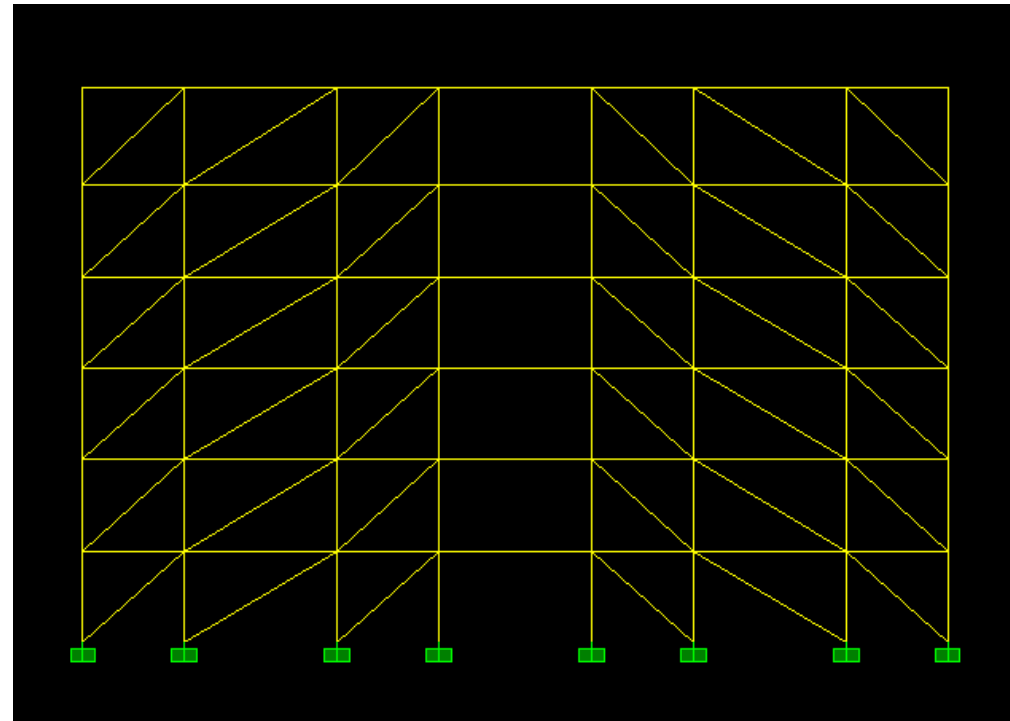
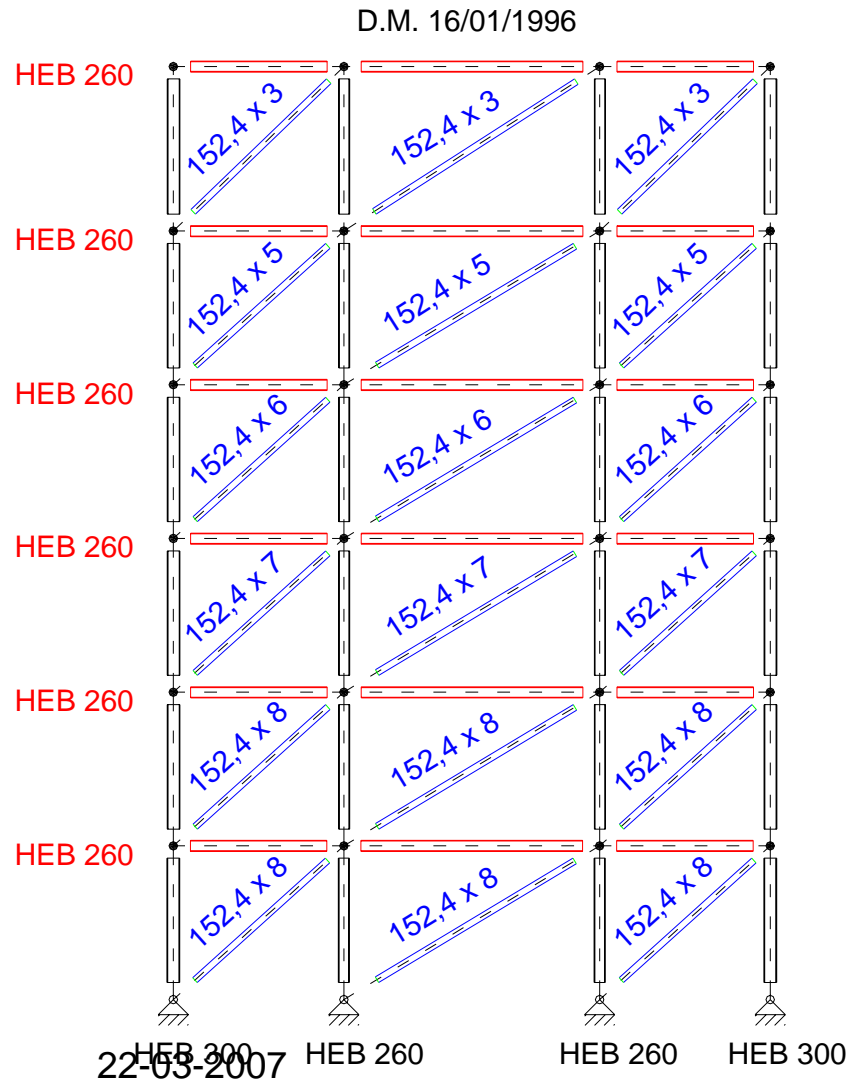
→ dimensioni degli elementi non dissipativi in genere più grandi di quelle che si ottenevano con la pre-esistente Normativa.

*Conviene progettare a bassa duttilità?*

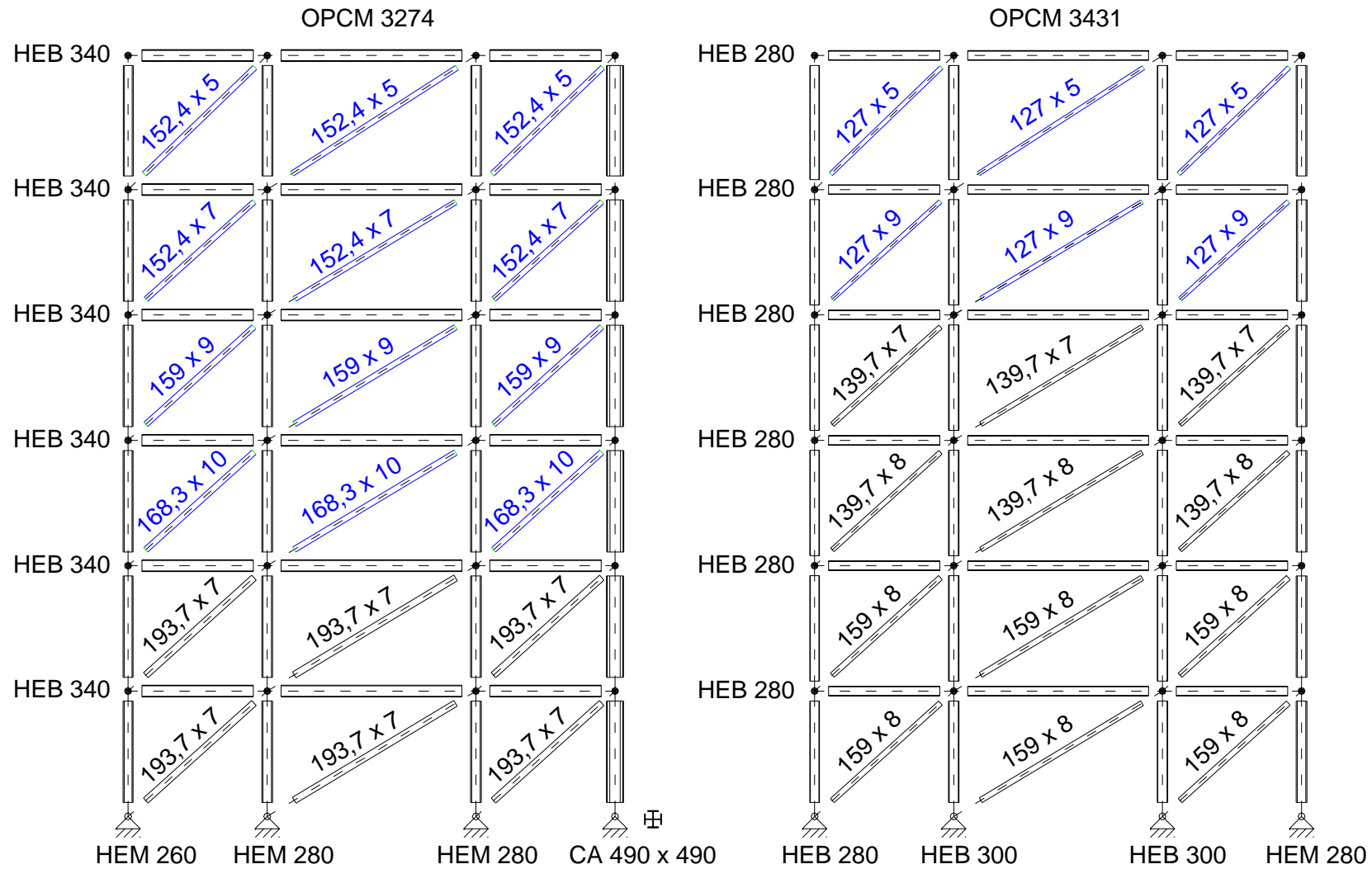
## Confronto tra Normative



## Confronto tra Normative



## Confronto tra Normative



22-03-2007