

Corso di aggiornamento

## Elementi strutturali e collegamenti in acciaio

2 - Problematiche generali; analisi strutturale;  
stati limite di esercizio

Villa Redenta, Spoleto

2-4 marzo 2017

Aurelio Ghersi

# Problematiche generali delle strutture in acciaio

# Problematiche generali

Differenze tra strutture in acciaio e in c.a.

- Modalità costruttive

## Cemento armato

realizzazione monolitica;

in genere strutture fortemente iperstatiche

## Acciaio

assemblaggio di elementi;

possibilità di definire il vincolo fornito dal collegamento;

in genere strutture isostatiche o poco iperstatiche

# Problematiche generali

Differenze tra strutture in acciaio e in c.a.

- Modalità costruttive
- Differenza di resistenza acciaio-calcestruzzo
  - Problemi di deformabilità

## Cemento armato

strutture progettate essenzialmente per la resistenza;  
verifica di deformazione facilmente soddisfatta

## Acciaio

la scelta della sezione è spesso condizionata più dai limiti di deformabilità che dai limiti di resistenza

# Problematiche generali

Differenze tra strutture in acciaio e in c.a.

- Modalità costruttive
- Differenza di resistenza acciaio-calcestruzzo
  - Problemi di deformabilità
  - Problemi di instabilità

## Acciaio

l'instabilità è fortemente condizionante

- instabilità globale, dell'intera struttura
- instabilità dell'asta
- instabilità locale, delle parti compresse della sezione

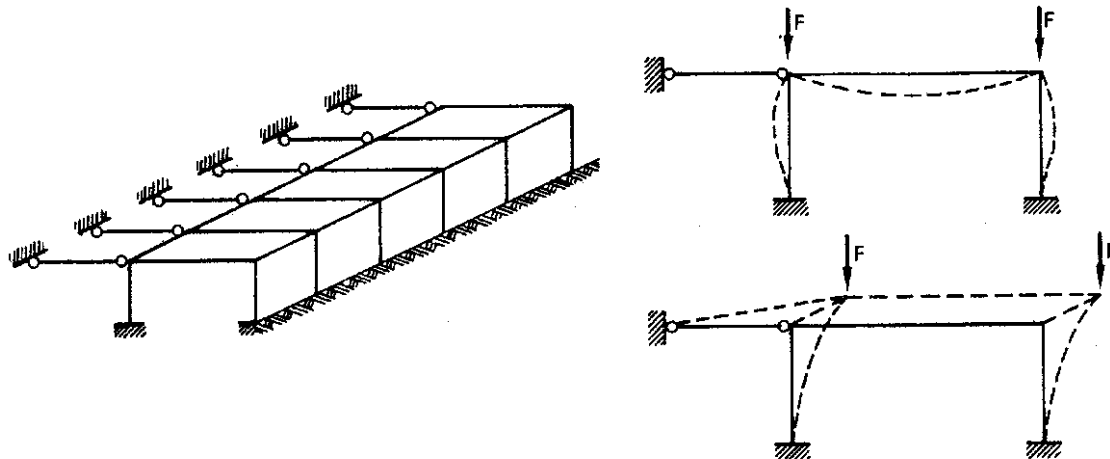
# Problematiche generali

## Differenze tra strutture in acciaio e in c.a.

- Modalità costruttive
- Differenza di resistenza acciaio-calcestruzzo
  - Problemi di deformabilità
  - Problemi di instabilità

### Acciaio

l'instabilità è fortemente condizionante  
attenzione alla spazialità del fenomeno



# Problematiche generali

Differenze tra strutture in acciaio e in c.a.

- Modalità costruttive
- Differenza di resistenza acciaio-calcestruzzo
  - Problemi di deformabilità
  - Problemi di instabilità

## Acciaio

l'instabilità è fortemente condizionante

attenzione alla spazialità del fenomeno

attenzione alle fasi transitorie, durante la costruzione,  
perché i bulloni non perfettamente serrati riducono il  
grado di vincolo e facilitano l'instabilità

# Problematiche generali

Differenze tra strutture in acciaio e in c.a.

- Modalità costruttive
- Differenza di resistenza acciaio-calcestruzzo
  - Problemi di deformabilità
  - Problemi di instabilità
  - Diversa influenza del peso proprio

## Acciaio

peso proprio della struttura quasi trascurabile;  
vantaggi in zona sismica e per grandi luci;  
rischio di inversione del carico per depressione da vento



# Problematiche generali

Differenze tra strutture in acciaio e in c.a.

- Modalità costruttive
- Differenza di resistenza acciaio-calcestruzzo
  - Problemi di deformabilità
  - Problemi di instabilità
  - Diversa influenza del peso proprio
  - Diverso comportamento a trazione e compressione

Cemento armato

lavora meglio a compressione

Acciaio

lavora meno bene a compressione, per problemi di instabilità

# Analisi strutturale per le strutture in acciaio

# Analisi strutturale

Nell'analisi strutturale occorre tener conto di:

- Non linearità meccanica
- Non linearità geometrica

# Analisi strutturale non linearità meccanica

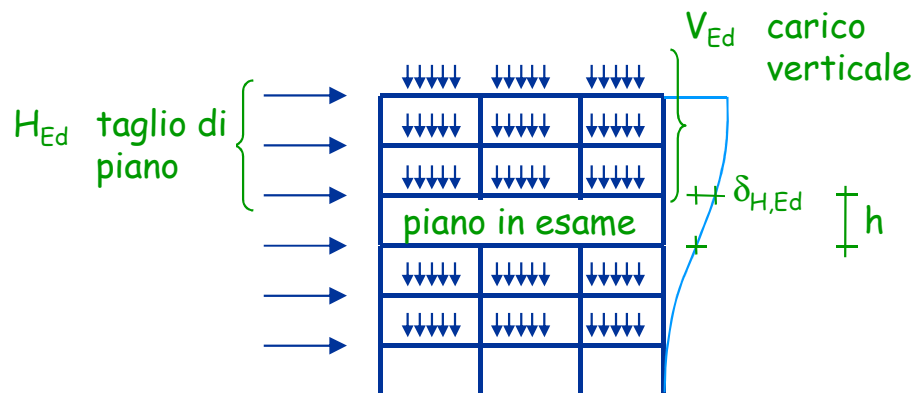
- **Analisi elastica lineare**  
è quella comunemente adottata
- **Analisi non lineare (plastica)**  
tiene conto della **non linearità meccanica** mediante l'introduzione di cerniere plastiche  
  
un modo approssimato per effettuare una analisi plastica è l'**analisi elastica con redistribuzione**, nella quale si parte da una analisi elastica e si ridistribuisce l'aliquota di momento eccedente la resistenza plastica, nel rispetto dell'equilibrio

# Analisi strutturale non linearità meccanica

- **Analisi elastica lineare**  
è quella comunemente adottata
- **Analisi non lineare (plastica)**  
tiene conto della **non linearità meccanica** mediante l'introduzione di cerniere plastiche
- **Analisi non lineare (elasto-plastica)**  
tiene conto del legame momento-curvatura non lineare di tutte le sezioni
- **Modelli rigido-plastici**  
citati solo dall'Eurocodice 3

# Analisi strutturale non linearità geometrica

- **Analisi del primo ordine**  
è quella comunemente adottata - trascura queste non linearità
- **Analisi del secondo ordine**  
tiene conto della **non linearità geometrica**
- **Approccio semplificato**  
per telai: valutare il moltiplicatore critico dei carichi verticali  
saggiando la deformabilità del telaio mediante forze orizzontali



$$\alpha_{cr} = \frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \frac{h}{\delta_{H,Ed}}$$

# Analisi strutturale non linearità geometrica

- **Analisi del primo ordine**  
è quella comunemente adottata - trascura queste non linearità
- **Analisi del secondo ordine**  
tiene conto della non linearità geometrica
- **Approccio semplificato**  
per telai: valutare il moltiplicatore critico dei carichi verticali  
saggiando la deformabilità del telaio mediante forze orizzontali;
  - se  $\alpha_{cr} > 10$  eseguire l'analisi del primo ordine
  - altrimenti incrementare gli effetti delle azioni ottenuti  
dall'analisi lineare mediante il coefficiente

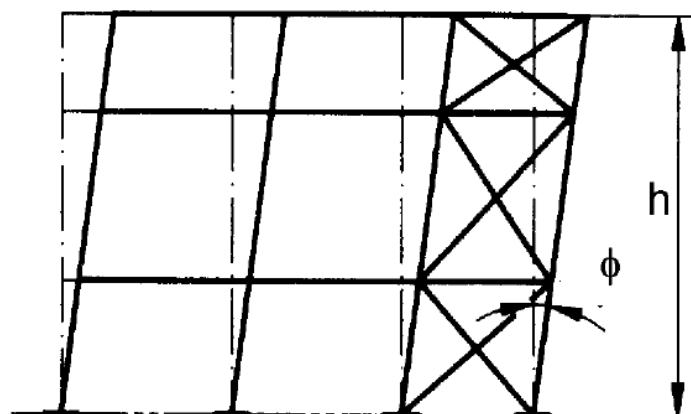
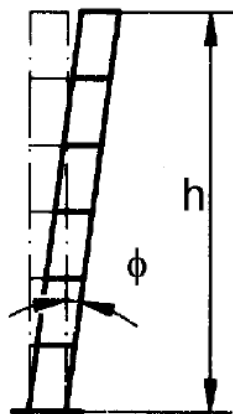
Si veda anche NTC08, punto 7.3.1  
(per zona sismica)

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}}$$

# Analisi strutturale

## imperfezioni di montaggio

- Per telai: considerare imperfezioni per non perfetta ortogonalità delle aste



$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m$$

$$\phi_0 = 1/200$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}$$

$$\frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left( 1 + \frac{1}{m} \right)}$$

$m$  = colonne di piano con  $N_{Ed} > 0.5 N_{Ed,med}$

EC3-1-1, punto 5.3; Circolare, punto C4.2.3.5



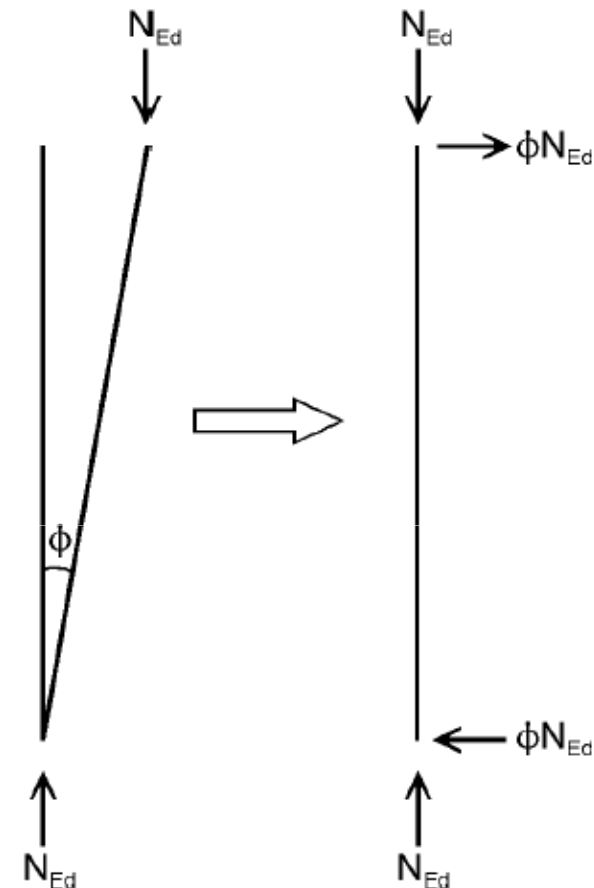
# Analisi strutturale

## imperfezioni di montaggio

- Per telai: considerare imperfezioni per non perfetta ortogonalità delle aste
- Le imperfezioni possono essere sostituite da forze orizzontali equivalenti

Le forze così valutate sono importanti se non ve ne sono altre; sono in genere modeste rispetto alle azioni di vento o sisma

Analoghe indicazioni sono fornite per travature reticolari ed altri schemi strutturali



Stati limite di esercizio

# Stati limite di esercizio

Problema: evitare

deformazioni o spostamenti che compromettono l'aspetto esteriore o l'uso efficiente della struttura;

vibrazioni e oscillazioni che creano fastidio agli occupanti degli edifici o danno ai suoi contenuti;

danni alle finiture o agli elementi non strutturali dovuti a deformazioni, spostamenti o oscillazioni.

Come evitare il raggiungimento di uno stato limite di esercizio?

Verifica degli spostamenti

# Verifica degli spostamenti

## Calcolo degli spostamenti verticali

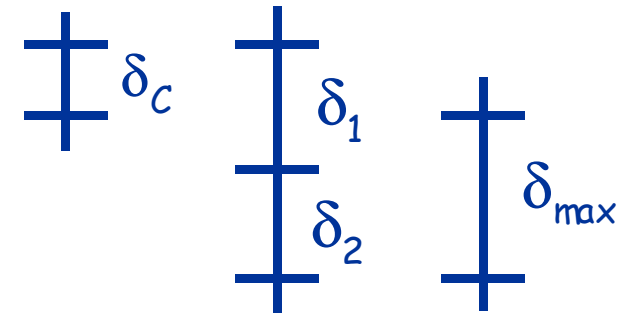
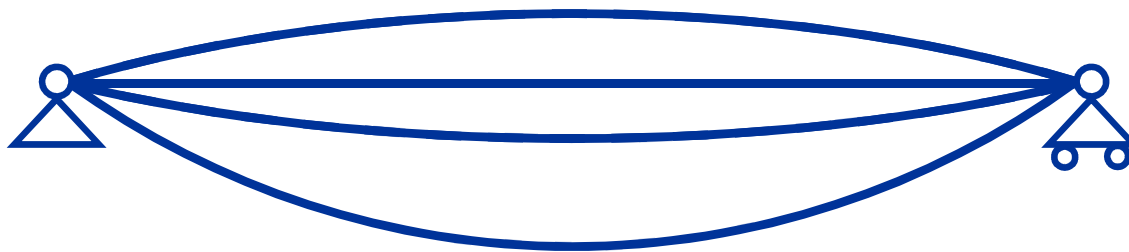
Carico variabile



Carico permanente



Carichi da combinazione  
di carico rara



$\delta_c$  Contromonta

$\delta_1$  Effetto dei carichi permanenti

$\delta_2$  Effetto dei carichi variabili

$\delta_{\max}$  Spostamento complessivo ( $\delta_1 + \delta_2 - \delta_0$ )

# Verifica degli spostamenti

## Valori massimi di spostamento verticale

| Condizioni   | $\delta_{\max}$ | $\delta_2$ |
|--|-----------------|------------|
| Coperture in generale  | L/200           | L/250      |
| Coperture praticate frequentemente da personale diverso da quello della manutenzione       | L/250           | L/300      |
| Solai in generale  | L/250           | L/300      |
| Solai che reggono intonaco o altro materiale di finitura fragile o tramezzi non flessibili | L/250           | L/350      |
| Solai che supportano colonne   | L/400           | L/500      |
| Dove $\delta_{\max}$ può compromettere l'aspetto dell'edificio                             | L/250           |            |

# Progetto - stato limite di esercizio

Il progetto è in molti casi condizionato dallo stato limite di esercizio

1 - Invertendo le espressioni di verifica si ottengono formule di progetto per la sezione

$$\delta_{\max} \leq (\delta_{\max})_{\text{limite}}$$

$$\delta_2 \leq (\delta_2)_{\text{limite}}$$



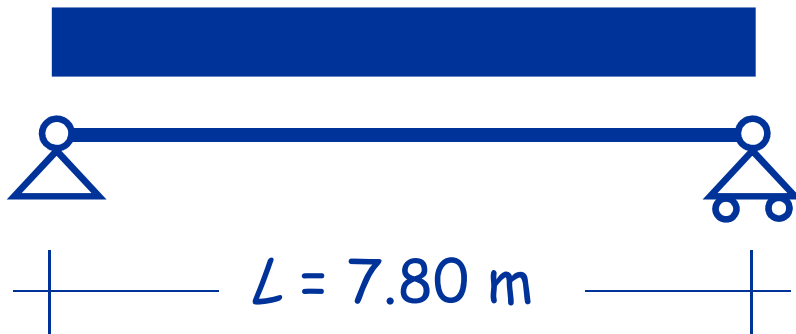
$I$  momento d'inerzia.

2 - Si sceglie il profilato

# Esempio

Dati:

$G_k + Q_k$  oppure  $Q_k$



Trave di copertura che non porta elementi fragili

$$G_k \quad 0.38 \text{ kN/m}$$

$$Q_k \quad 1.54 \text{ kN/m}$$

$$G_k + Q_k \quad 1.92 \text{ kN/m}$$

$$\delta_{\max} = \frac{5}{384} \frac{(G_k + Q_k) L^4}{E I} \leq \frac{L}{200} \Rightarrow$$

$$I \geq \frac{5 \times 200}{384} \frac{(G_k + Q_k) L^3}{E}$$

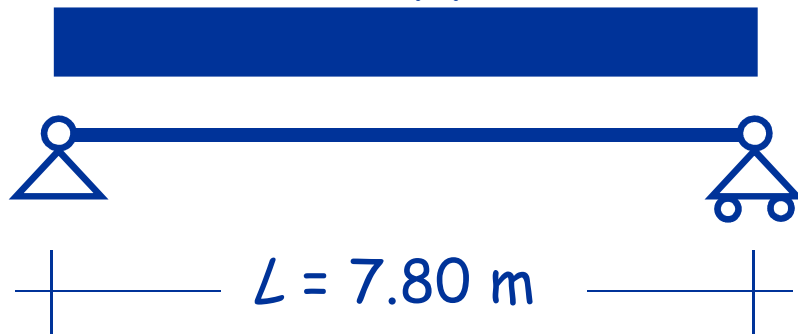
$$\delta_2 = \frac{5}{384} \frac{Q_k L^4}{E I} \leq \frac{L}{250} \Rightarrow$$

$$I \geq \frac{5 \times 250}{384} \frac{Q_k L^3}{E}$$

# Esempio

Dati:

$G_k + Q_k$  oppure  $Q_k$



Trave di copertura che non porta elementi fragili

$G_k$  0.38 kN/m

$Q_k$  1.54 kN/m

$G_k + Q_k$  1.92 kN/m

$$I \geq \frac{5 \times 200}{384} \frac{(G_k + Q_k) L^3}{E} = \frac{1000}{384} \frac{1.92 \times 7800^3}{210000} \times 10^{-4} = 1129 \text{ cm}^4$$

$$I \geq \frac{5 \times 250}{384} \frac{Q_k L^3}{E} = \frac{1250}{384} \frac{1.54 \times 7800^3}{210000} \times 10^{-4} = 1133 \text{ cm}^4$$



# Scelta del profilato

Deve essere  
 $I \geq 1133 \text{ cm}^4$

Si può usare un  
 IPE 180  
 $I=1317 \text{ cm}^4$

Massa: 18.8 kg/m

Peso: 0.188 kN/m



| Désignation<br>Designation<br>Bezeichnung | G<br>kg/m | Valeurs statiques / Section pro                     |                               |                              |             |                             |                          |
|---|-----------|---|-------------------------------|------------------------------|-------------|-----------------------------|--------------------------|
|   |           | axe fort y-y<br>strong axis y-y<br>starke Achse y-y |                               |                              |             |                             |                          |
|   |           | $I_y$<br>cm <sup>4</sup>                            | $W_{el,y}$<br>cm <sup>3</sup> | $W_{ply}$<br>cm <sup>3</sup> | $i_y$<br>cm | $A_{vz}$<br>cm <sup>2</sup> | $I_z$<br>cm <sup>4</sup> |
| IPE A 100                                 | 6.9       | 141.2   | 28.81                         | 32.98                        | 4.01        | 4.44                        | 13.12                    |
| IPE 100                                   | 8.1       | 171.0   | 34.20                         | 39.41                        | 4.07        | 5.08                        | 15.92                    |
| IPE A 120                                 | 8.7       | 257.4   | 43.77                         | 49.87                        | 4.83        | 5.41                        | 22.39                    |
| IPE 120                                   | 10.4      | 317.8   | 52.96                         | 60.73                        | 4.90        | 6.31                        | 27.67                    |
| IPE A 140                                 | 10.5      | 434.9   | 63.30                         | 71.60                        | 5.70        | 6.21                        | 36.42                    |
| IPE 140                                   | 12.9      | 541.2   | 77.32                         | 88.34                        | 5.74        | 7.64                        | 44.92                    |
| IPE A 160                                 | 12.7      | 689.3   | 87.81                         | 99.09                        | 6.53        | 7.80                        | 54.43                    |
| IPE 160                                   | 15.8      | 869.3   | 108.7                         | 123.9                        | 6.58        | 9.66                        | 68.31                    |
| IPE A 180                                 | 15.4      | 1063  | 120.1                         | 135.3                        | 7.37        | 9.20                        | 81.89                    |
| IPE 180                                   | 18.8      | 1317  | 146.3                         | 166.4                        | 7.42        | 11.25                       | 100.9                    |
| IPE O 180                                 | 21.3      | 1505  | 165.4                         | 189.1                        | 7.45        | 12.70                       | 117.3                    |
| IPE A 200                                 | 18.4      | 1591  | 161.6                         | 181.7                        | 8.23        | 11.47                       | 117.2                    |
| IPE 200                                   | 22.4      | 1943  | 194.3                         | 220.6                        | 8.26        | 14.00                       | 142.4                    |
| IPE O 200                                 | 25.1      | 2211  | 218.9                         | 249.4                        | 8.32        | 15.45                       | 168.9                    |

# Scelta del profilato

Deve essere  
 $I \geq 1133 \text{ cm}^4$

Oppure un  
 HE 140 B  
 $I=1509 \text{ cm}^4$

o anche un  
 HE 160 A

$I=1673 \text{ cm}^4$

Massa: 33.7 kg/m  
 Peso: 0.337 kN/m

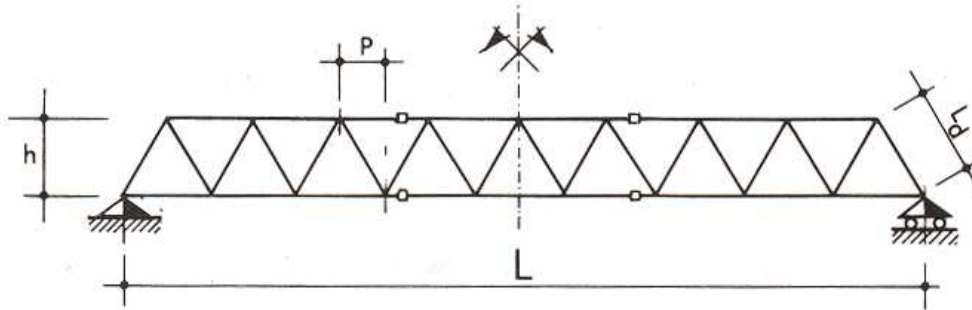
Massa: 30.4 kg/m  
 Peso: 0.304 kN/m

| Désignation<br>Designation<br>Bezeichnung |                          | Valeurs statiques / Section pro                     |  |             |                             |                          |       |
|---|--------------------------|---|--|-------------|-----------------------------|--------------------------|-------|
|   |                          | axe fort y-y<br>strong axis y-y<br>starke Achse y-y |  |             |                             |                          |       |
| G<br>kg/m                                 | $I_y$<br>cm <sup>4</sup> | $W_{el,y}$<br>cm <sup>3</sup>                       | $W_{ply}^{\blacklozenge}$<br>cm <sup>3</sup> | $i_y$<br>cm | $A_{vz}$<br>cm <sup>2</sup> | $I_z$<br>cm <sup>4</sup> |       |
| HE 100 AA                                 | 12.2                     | 236.5   | 51.98  | 58.36       | 3.89                        | 6.15                     | 92.06 |
| HE 100 A                                  | 16.7                     | 349.2   | 72.76  | 83.01       | 4.06                        | 7.56                     | 133.8 |
| HE 100 B                                  | 20.4                     | 449.5   | 89.91  | 104.2       | 4.16                        | 9.04                     | 167.3 |
| HE 100 M                                  | 41.8                     | 1143  | 190.4  | 235.8       | 4.63                        | 18.04                    | 399.2 |
| HE 120 AA                                 | 14.6                     | 413.4   | 75.85  | 84.12       | 4.72                        | 6.90                     | 158.8 |
| HE 120 A                                  | 19.9                     | 606.2   | 106.3  | 119.5       | 4.89                        | 8.46                     | 230.9 |
| HE 120 B                                  | 26.7                     | 864.4   | 144.1  | 165.2       | 5.04                        | 10.96                    | 317.5 |
| HE 120 M                                  | 52.1                     | 2018  | 288.2  | 350.6       | 5.51                        | 21.15                    | 702.8 |
| HE 140 AA                                 | 18.1                     | 719.5   | 112.4  | 123.8       | 5.59                        | 7.92                     | 274.8 |
| HE 140 A                                  | 24.7                     | 1033  | 155.4  | 173.5       | 5.73                        | 10.12                    | 389.3 |
| HE 140 B                                  | 33.7                     | 1509  | 215.6  | 245.4       | 5.93                        | 13.08                    | 549.7 |
| HE 140 M                                  | 63.2                     | 3291  | 411.4  | 493.8       | 6.39                        | 24.46                    | 1144  |
| HE 160 AA                                 | 23.8                     | 1283  | 173.4  | 190.4       | 6.50                        | 10.38                    | 478.7 |
| HE 160 A                                  | 30.4                     | 1673  | 220.1  | 245.1       | 6.57                        | 13.21                    | 615.6 |
| HE 160 B                                  | 42.6                     | 2492  | 311.5  | 354.0       | 6.78                        | 17.59                    | 889.2 |
| HE 160 M                                  | 76.2                     | 5098  | 566.5  | 674.6       | 7.25                        | 30.81                    | 1759  |

# Verifica degli spostamenti

## Influenza dei giunti

- Nel calcolo degli spostamenti occorre tener conto degli spostamenti relativi che si hanno in corrispondenza dei giunti



$$\delta = \delta_{el} + \delta_c + \delta_d$$

$\delta_{el}$  = Spostamento dovuto alla deformazione elastica delle aste

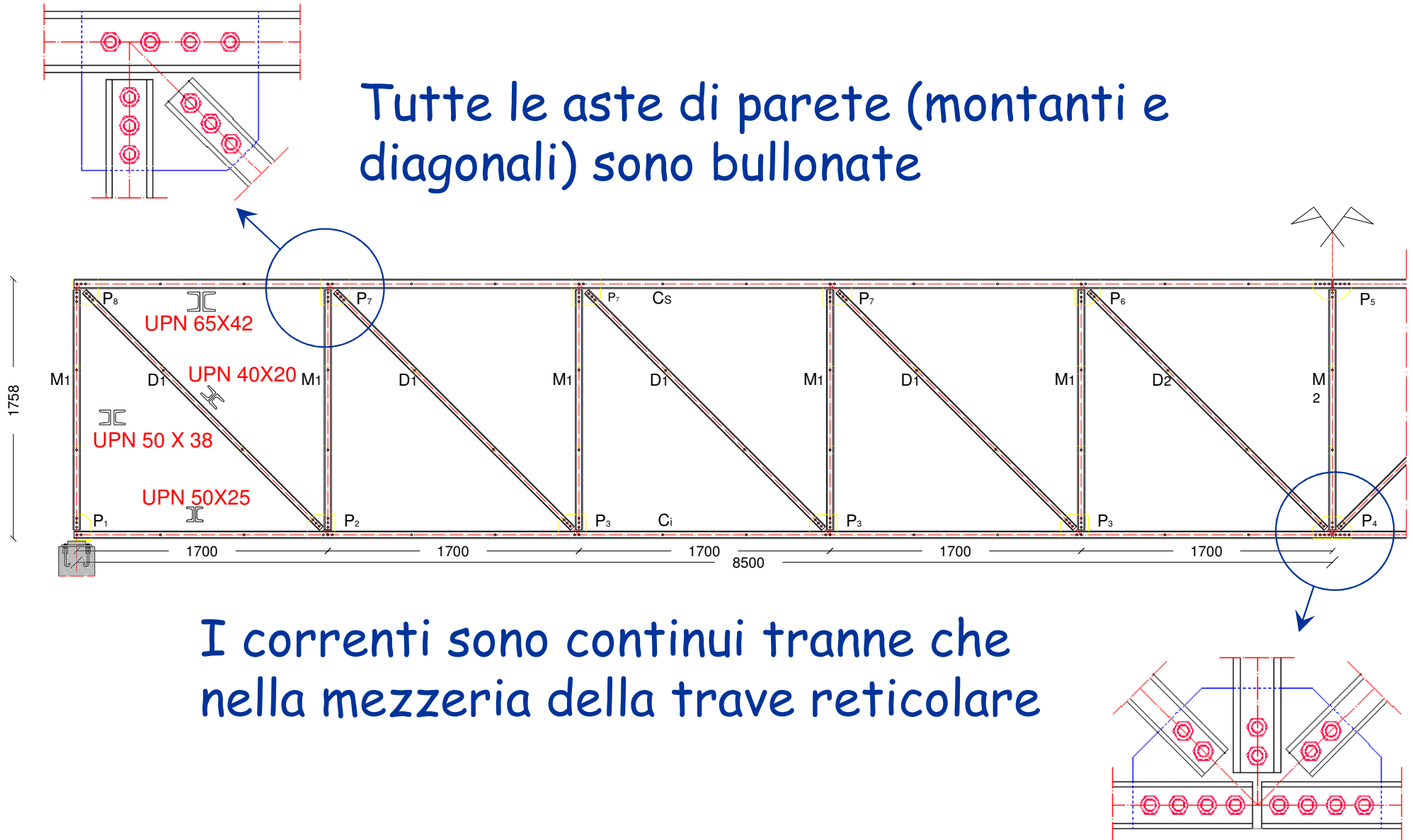
$$\delta_c = \frac{n}{6} \frac{L}{h} (\phi - d)$$

$$\delta_d = \frac{L}{p} \frac{L_d}{h} (\phi - d)$$

$n$  = numero di giunti nei correnti

$\phi - d$  = gioco foro bullone

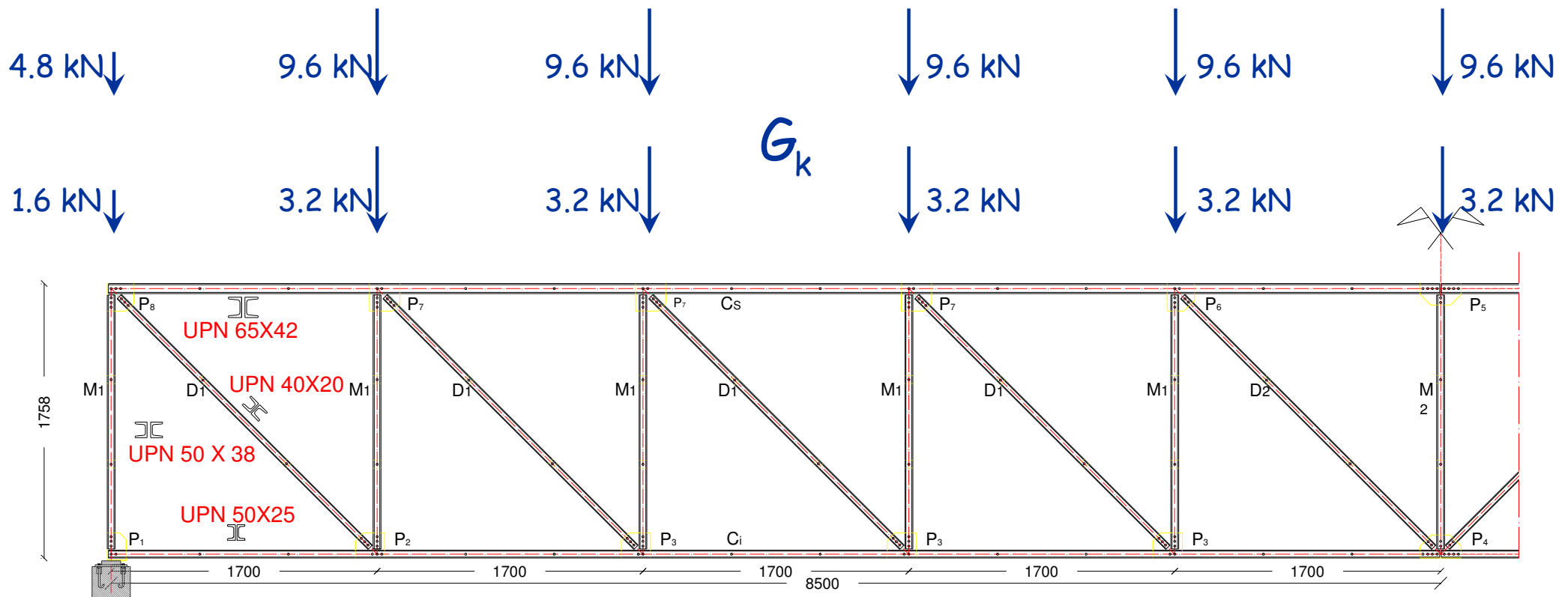
# Esempio



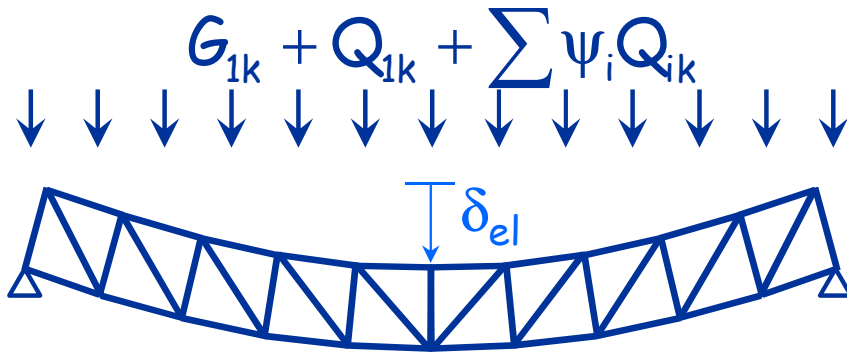
# Esempio

La trave è stata proporzionata nel rispetto delle verifiche allo stato limite ultimo e deve essere verificata per lo stato limite di esercizio

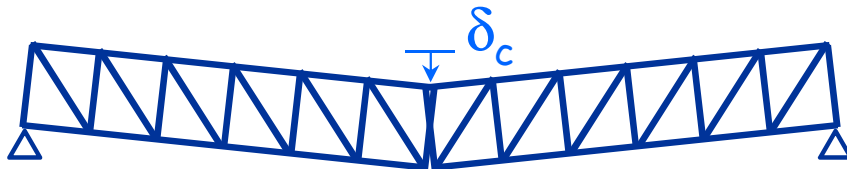
$$Q_{1k} + \sum \psi_i Q_{ik}$$



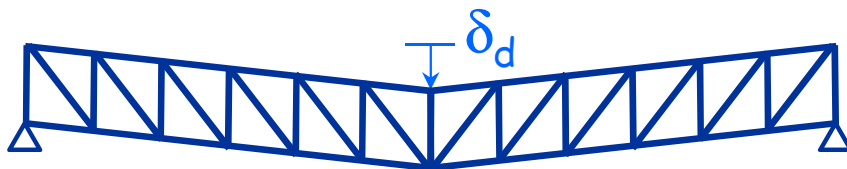
# Esempio



$$\delta_{el} = 24.7 \text{ mm}$$



$$\delta_c = \frac{n}{6} \frac{L}{h} (\phi - d) = \frac{4}{6} \frac{17}{1.76} \times 1 = 6.4 \text{ mm}$$



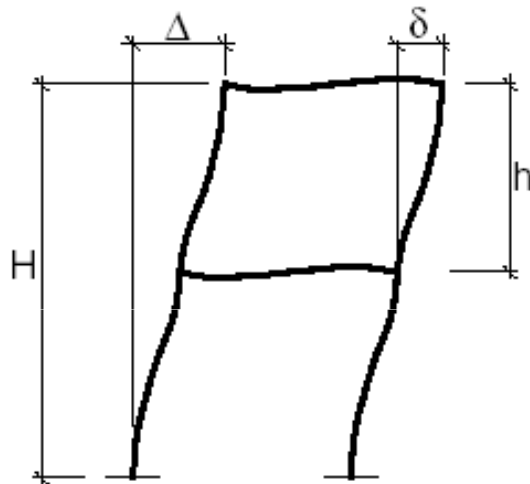
$$\delta_d = \frac{L}{p} \frac{L_d}{h} (\phi - d) = \frac{17}{1.7} \sqrt{2} \times 1 = 14.1 \text{ mm}$$

$$\delta_{\max} = \delta_{el} + \delta_c + \delta_d = 45.2 \text{ mm} \leq \frac{L}{200} = \frac{17000}{200} = 85 \text{ mm}$$

# Verifica degli spostamenti

## Spostamenti orizzontali

- Gli spostamenti laterali provocati dai carichi (combinazione rara) non devono superare i limiti di seguito indicati



| Condizioni                                     | $\delta$ | $\Delta$ |
|--|----------|----------|
| Edifici industriali monopiano senza carroponte | $h/150$  |          |
| Altri edifici monopiano                        | $h/300$  |          |
| Edifici multipiano                             | $h/300$  | $H/500$  |