

Corso di aggiornamento
Progettazione strutturale e
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

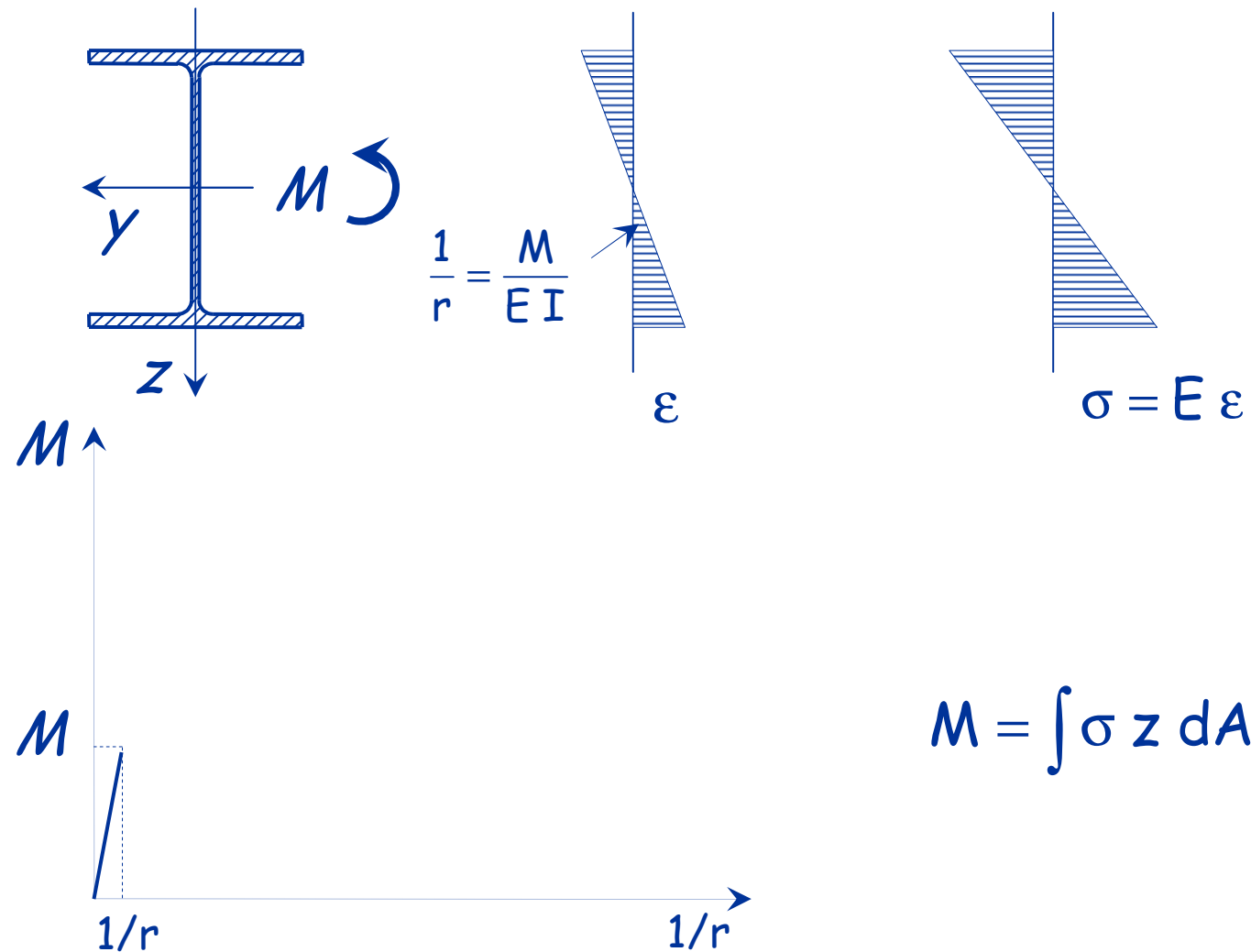
Progetto di aste e collegamenti in acciaio

5 - Flessione e taglio

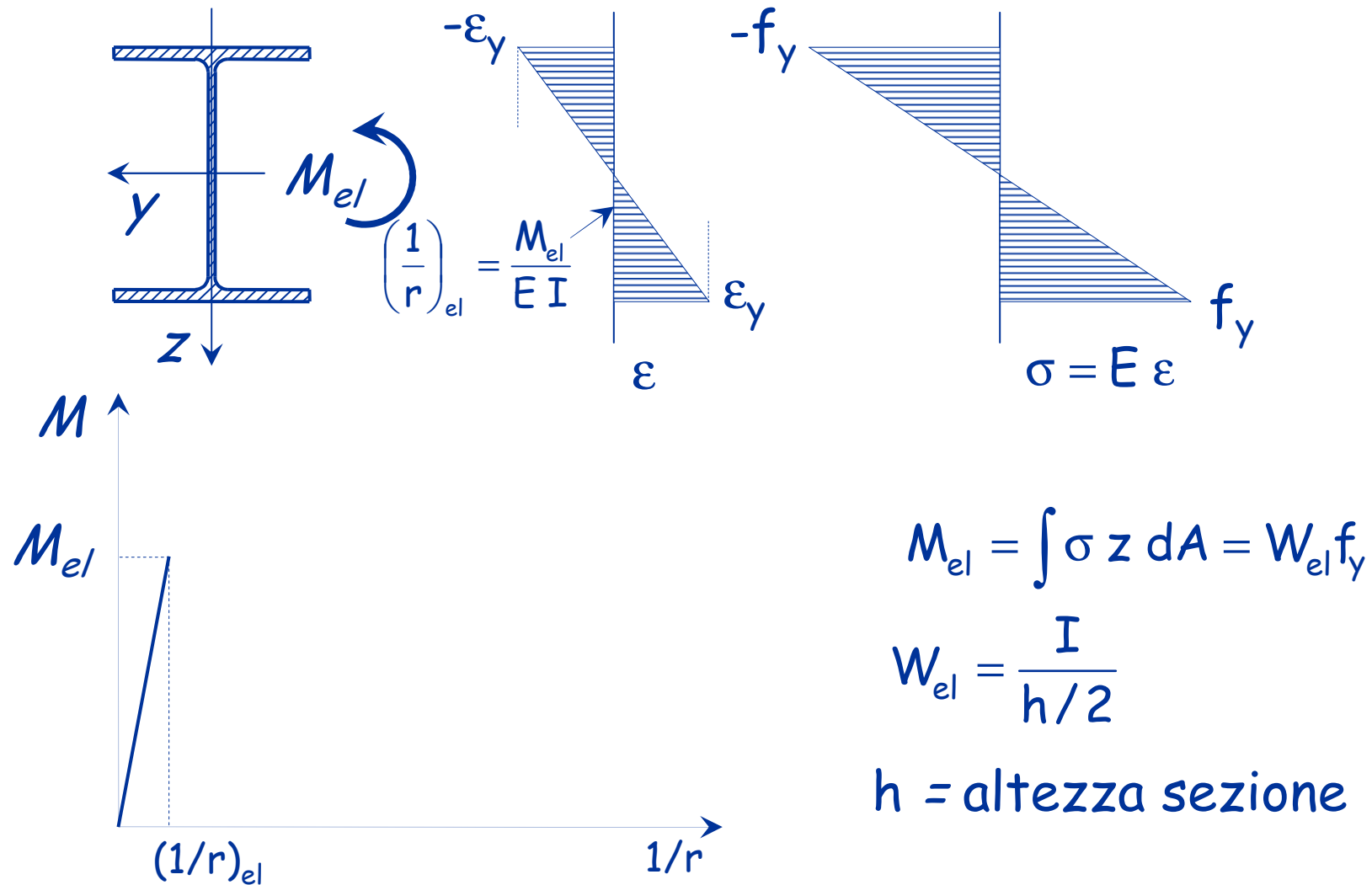
Spoletto
21-23 ottobre 2010
Aurelio Gheresi

Flessione

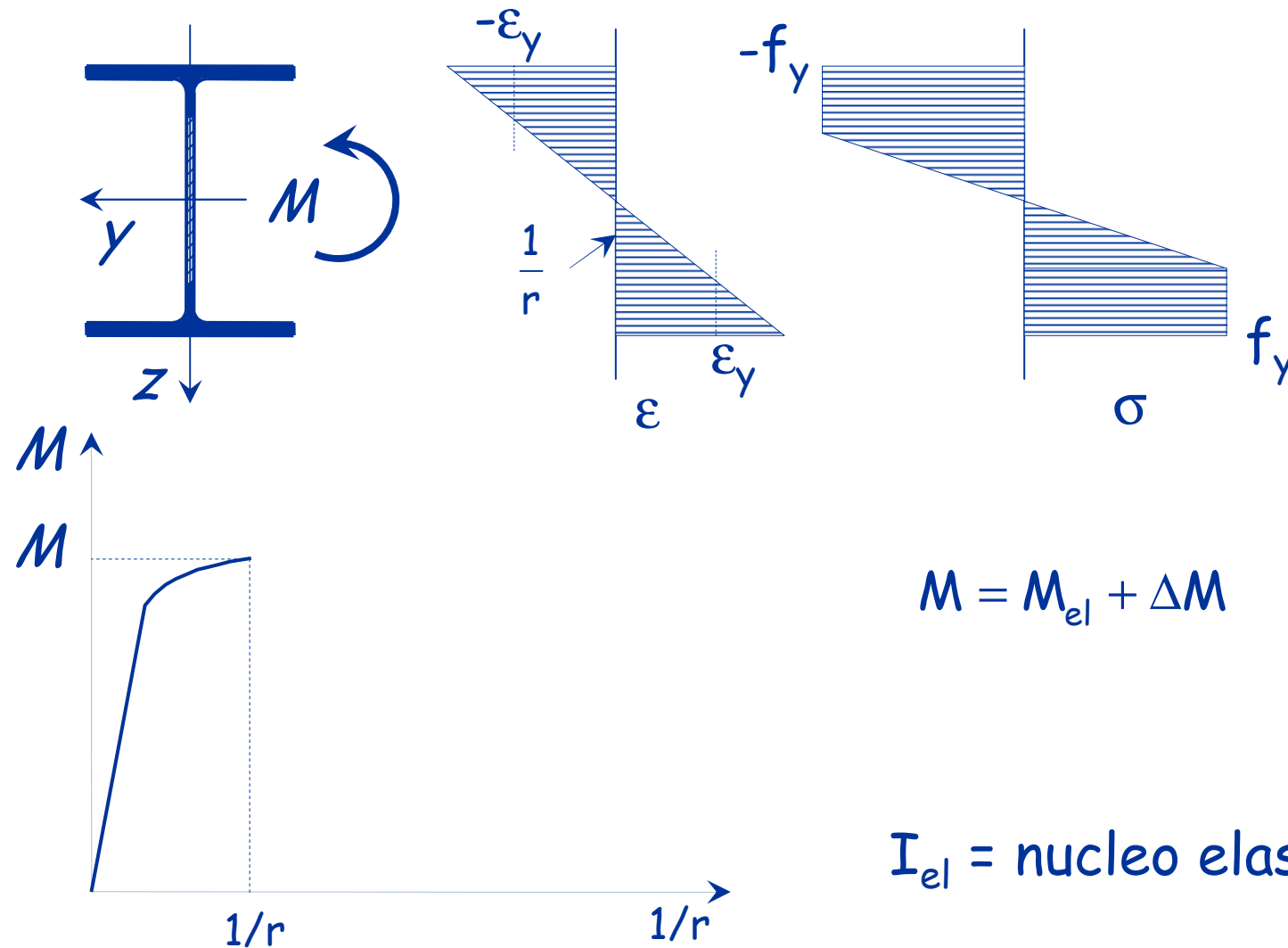
Comportamento ultimo



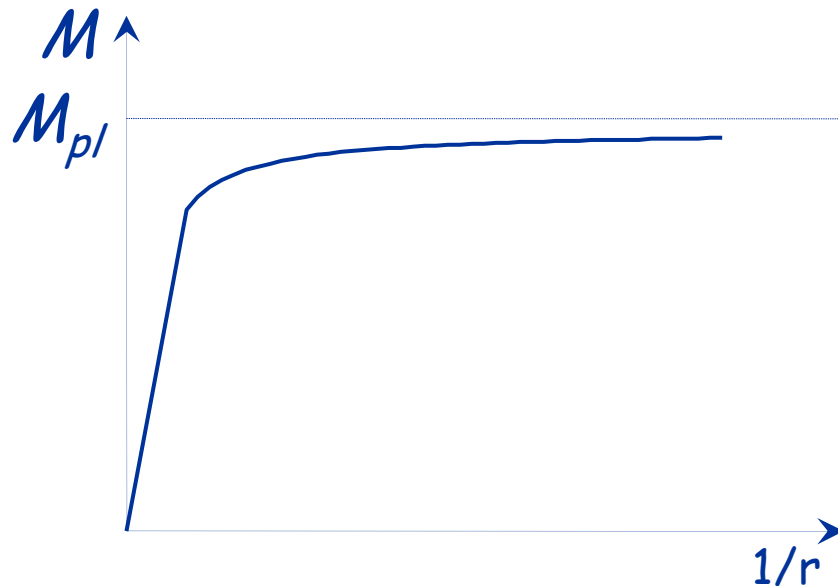
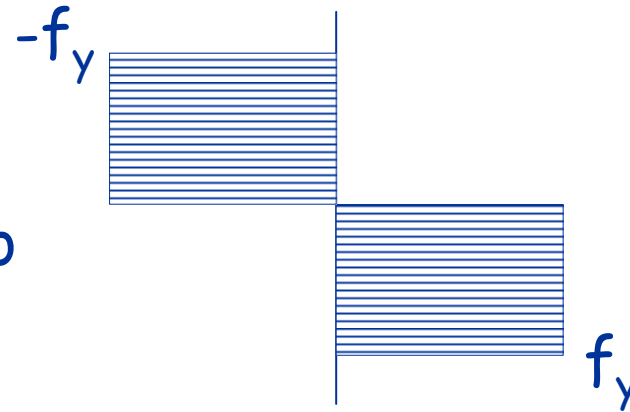
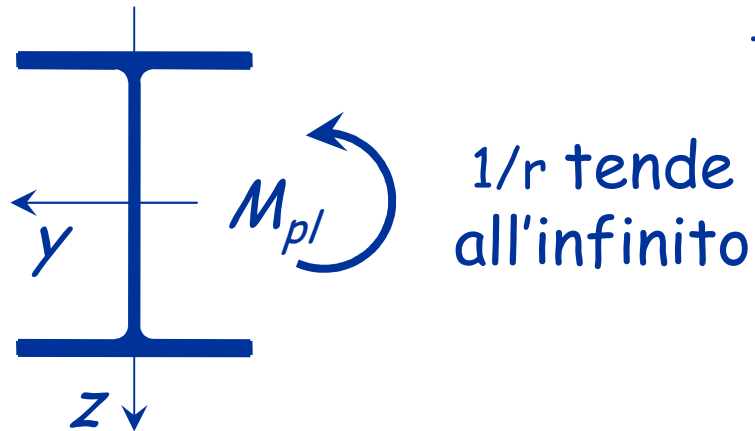
Comportamento ultimo



Comportamento ultimo



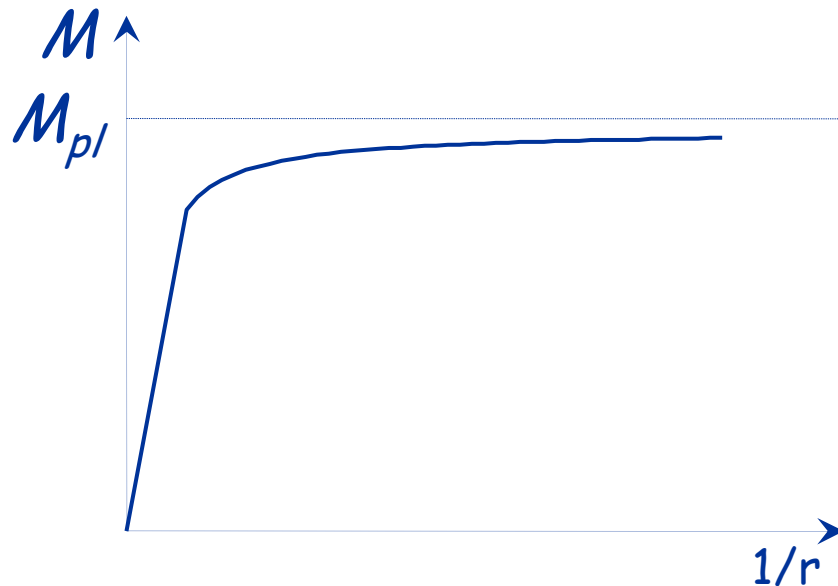
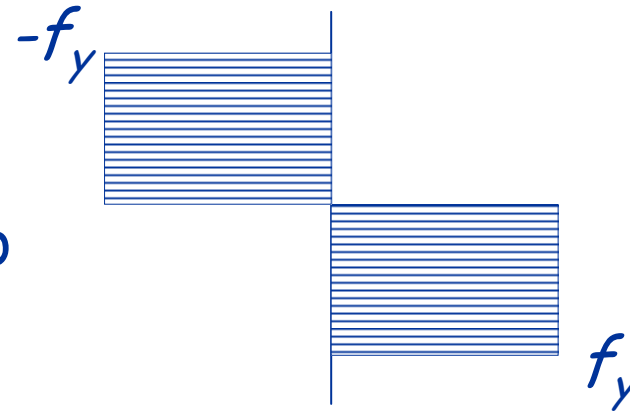
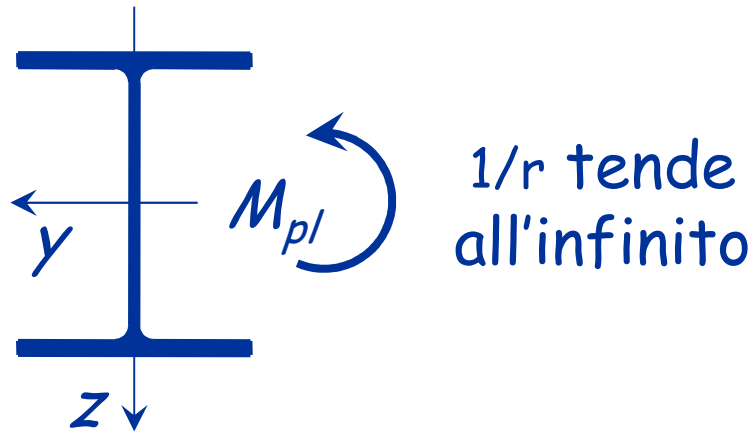
Comportamento ultimo



$$M_{pl} = \int \sigma z dA = (2 S_y) f_y$$

$S_y =$ momento statico di mezza sezione

Comportamento ultimo

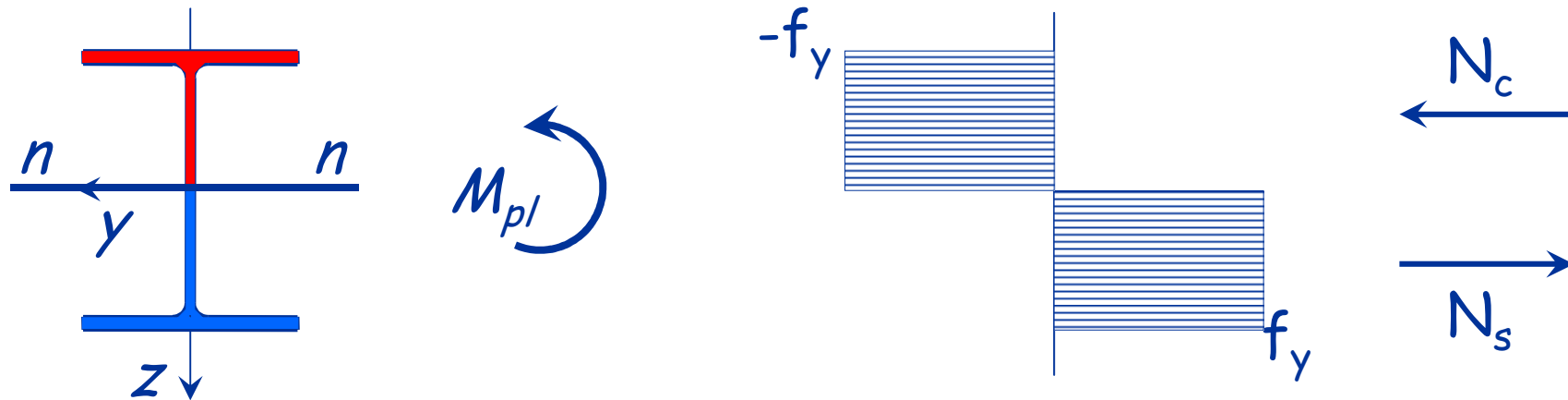


$$M_{pl} = \int \sigma z dA = W_{pl} f_y$$

$S_y =$ momento statico di mezza sezione

$$W_{pl} = 2 S_y$$

Comportamento ultimo



Per trovare l'asse neutro:

$$N_c + N_t = 0$$

(equilibrio alla traslazione) \Rightarrow

$$N_c = -f_y A_c$$

$$N_t = f_y A_t$$

$$A_c = A_t$$

L'asse neutro divide la sezione in due parti di area uguale

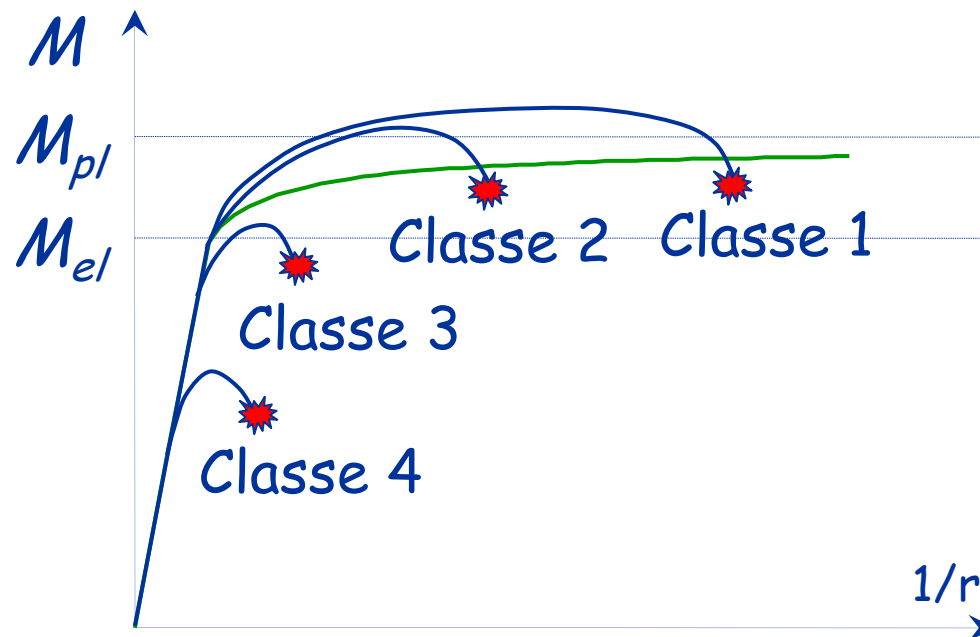
Comportamento di aste reali

Classe 1 - M supera M_{pl} e la sezione è molto duttile

Classe 2 - M supera M_{pl} ma la sezione è meno duttile

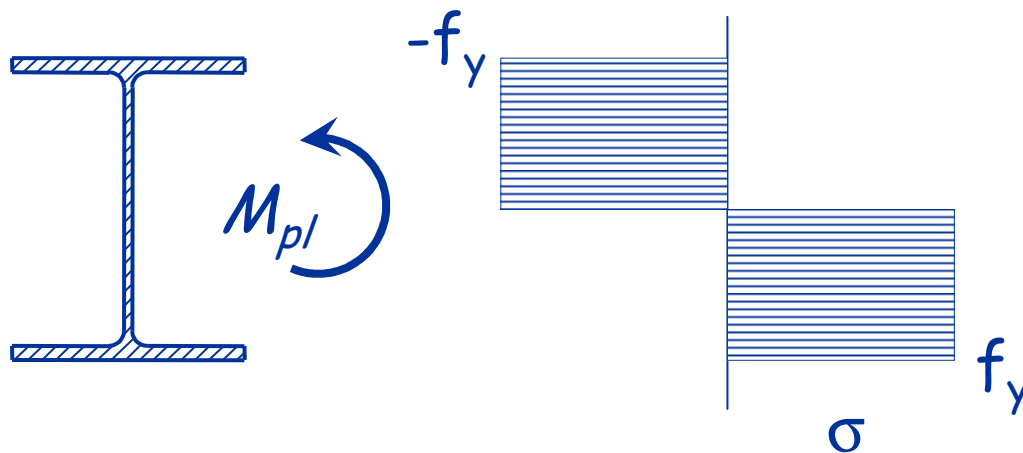
Classe 3 - La rottura avviene per $M \approx M_{el}$

Classe 4 - La rottura avviene per $M < M_{el}$



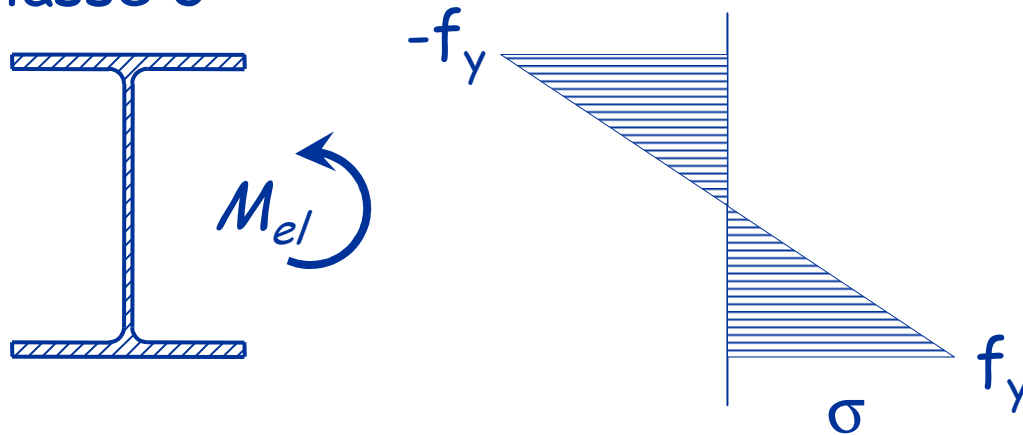
Verifica - stato limite ultimo

Classe 1 e 2



$$M_{pl} = W_{pl} f_y$$

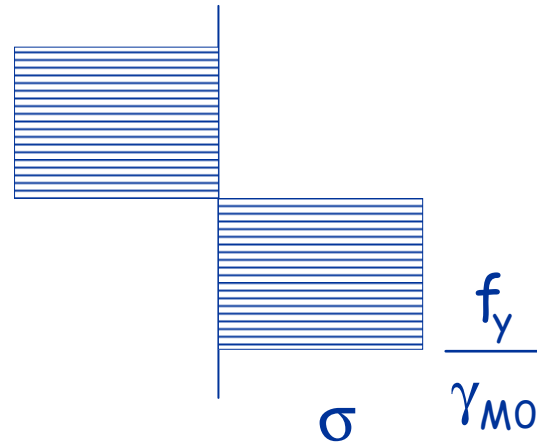
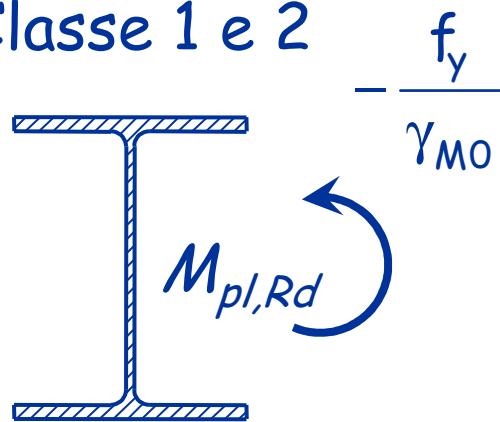
Classe 3



$$M_{el} = W_{el} f_y$$

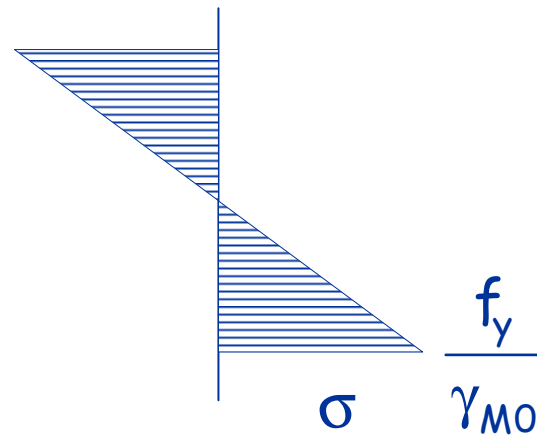
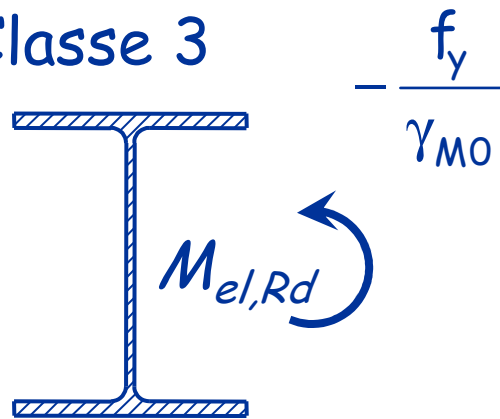
Verifica - stato limite ultimo

Classe 1 e 2



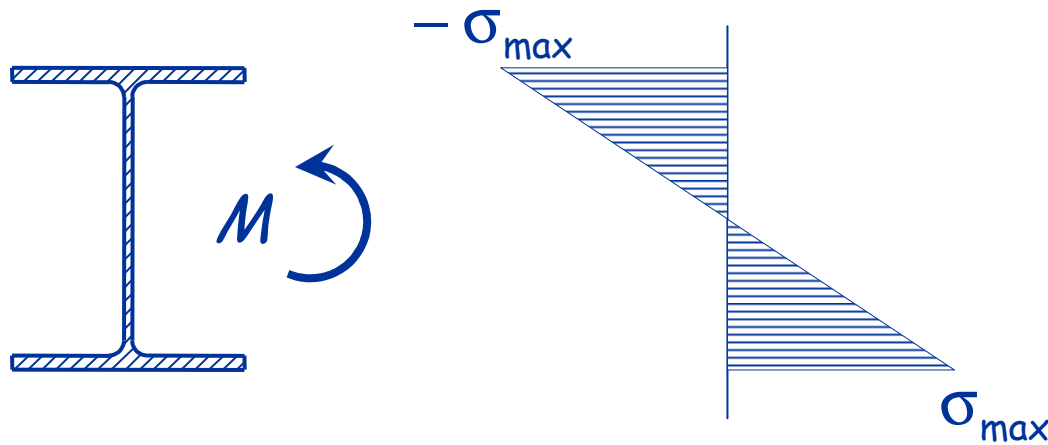
$$M_{Ed} \leq M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$$

Classe 3



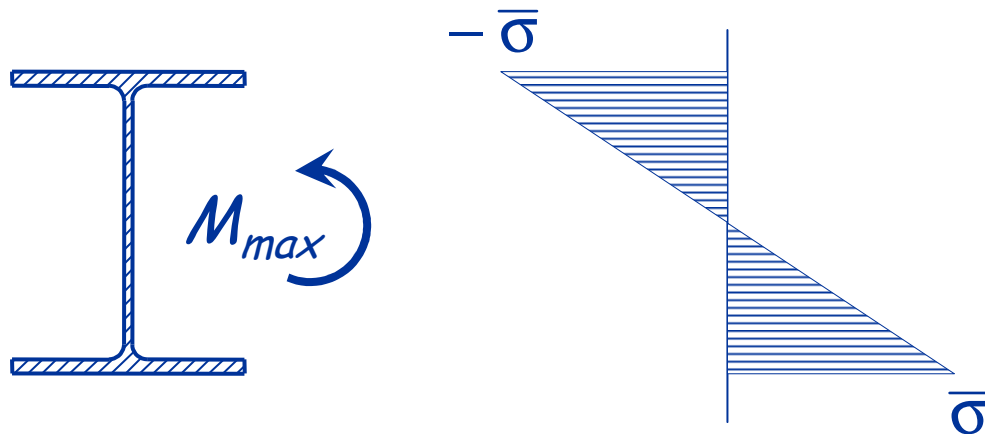
$$M_{Ed} \leq M_{el,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}}$$

Verifica - tensioni ammissibili



$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_{el}} \leq \bar{\sigma}$$

oppure



$$M_{\max} = \bar{\sigma} W_{el} \geq M$$

Verifica - confronto

Classe 1 e 2

TA

$$M_{\max} = \bar{\sigma} W_{el}$$

Per sezioni a doppi T

$$W_{pl} \approx 1.15 W_{el}$$

SLU

$$M_{pl,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} W_{pl}$$

Classe 3

$$M_{\max} = \bar{\sigma} W_{el}$$

$$160$$

$$160 \times 1.4 = 224$$

$$M_{el,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} W_{el}$$

$$235 / 1.05 = 224$$

Acciaio Fe 360

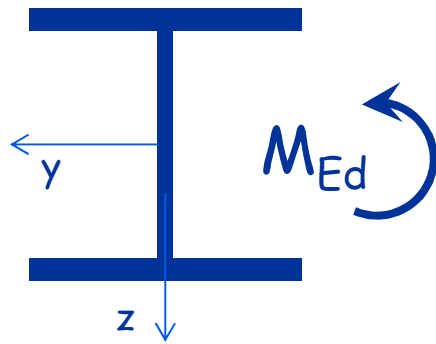
Verifica - commento

Tenendo conto delle differenze tra i carichi agenti, la resistenza a flessione valutata allo stato limite ultimo è:

- Circa il 15% maggiore per sezioni di classe 1 e 2;
- Sostanzialmente simile per sezioni di classe 3.

Esempio

Dati:



HE 240 A

$M_{Ed} = 125 \text{ kNm}$

Acciaio S235

Il profilo è di classe 2

Dal sagomario: $W_{pl,y} = 744.6 \text{ cm}^3$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{744.6 \times 235}{1.05 \times 10^3} = 166.6 \text{ kNm}$$

Sezione verificata

Progetto - stato limite ultimo

1 - Si assume la classe della sezione (1, 2 o 3).

2 - Invertendo l'espressione di verifica si ottiene la formula di progetto della sezione.

Classe 1 e 2: $M_{Ed} \leq M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \Rightarrow W_{pl} = \frac{M_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}$

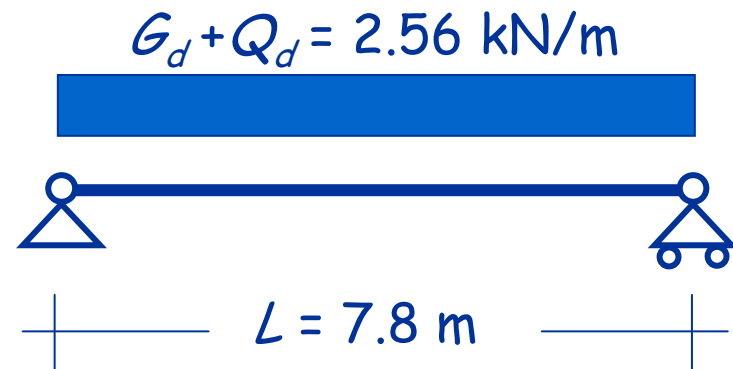
Classe 3: $M_{Ed} \leq M_{el,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} \Rightarrow W_{el} = \frac{M_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}$

3 - Si sceglie il profilato.

4 - Si verifica la classe del profilato.

Esempio

Dati:



Acciaio

Fe360

Sezione

serie HEA

M_{sd}

19.5 kNm

1 - Classe della sezione.

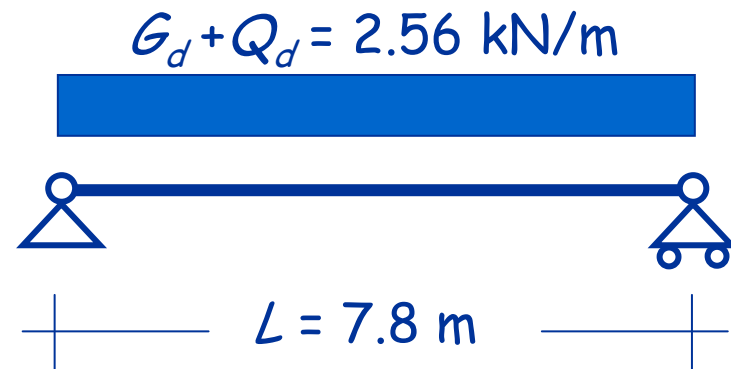
Suppongo che la sezione appartenga alla classe 1 o 2.

2 - Determinazione del modulo plastico.

$$W_{pl} = \frac{M_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} = \frac{19.5 \times 10^3}{235 / 1.05} = 87.1 \text{ cm}^3$$

Esempio

Dati:



Acciaio

Sezione

M_{Sd}

W_{pl}

Fe360

serie HEA

19.5 kNm

$\geq 87.1 \text{ cm}^3$

3 - Scelta della sezione.

Si potrebbe usare un **HE 120 A**

$$S_y = 59.7 \text{ cm}^3$$

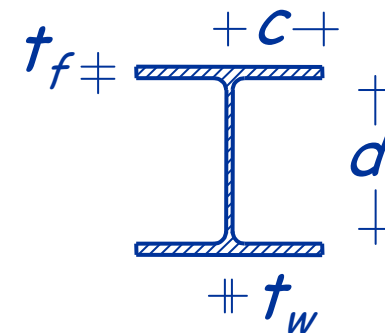
$$d = 74 \text{ mm}$$

$$c = 60 \text{ mm}$$

$$W_{pl} = 119.4 \text{ cm}^3$$

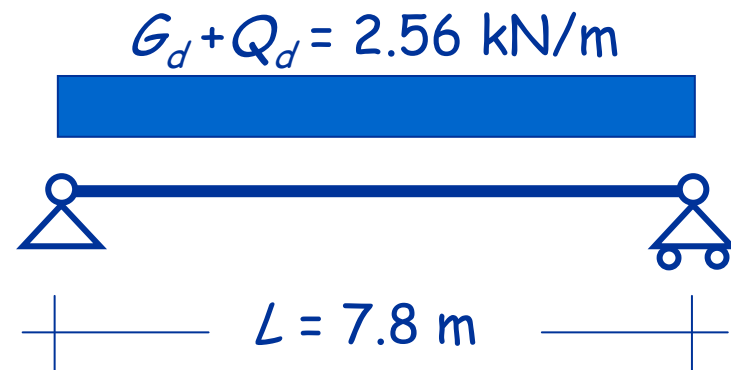
$$t_w = 5 \text{ mm}$$

$$t_f = 8 \text{ mm}$$



Esempio

Dati:



Acciaio

Fe360

Sezione

serie HEA

M_{sd}

19.5 kNm

W_{pl}

$\geq 87.1 \text{ cm}^3$

4 - Determinazione della classe della sezione.

Anima: $\frac{c}{t_w} = \frac{74}{5} = 14.8 \leq 72 \quad \varepsilon = 72 \quad (\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 1)$

Flangia: $\frac{c}{t_f} = \frac{40.5}{8} = 5.1 \leq 9 \quad \varepsilon = 9$

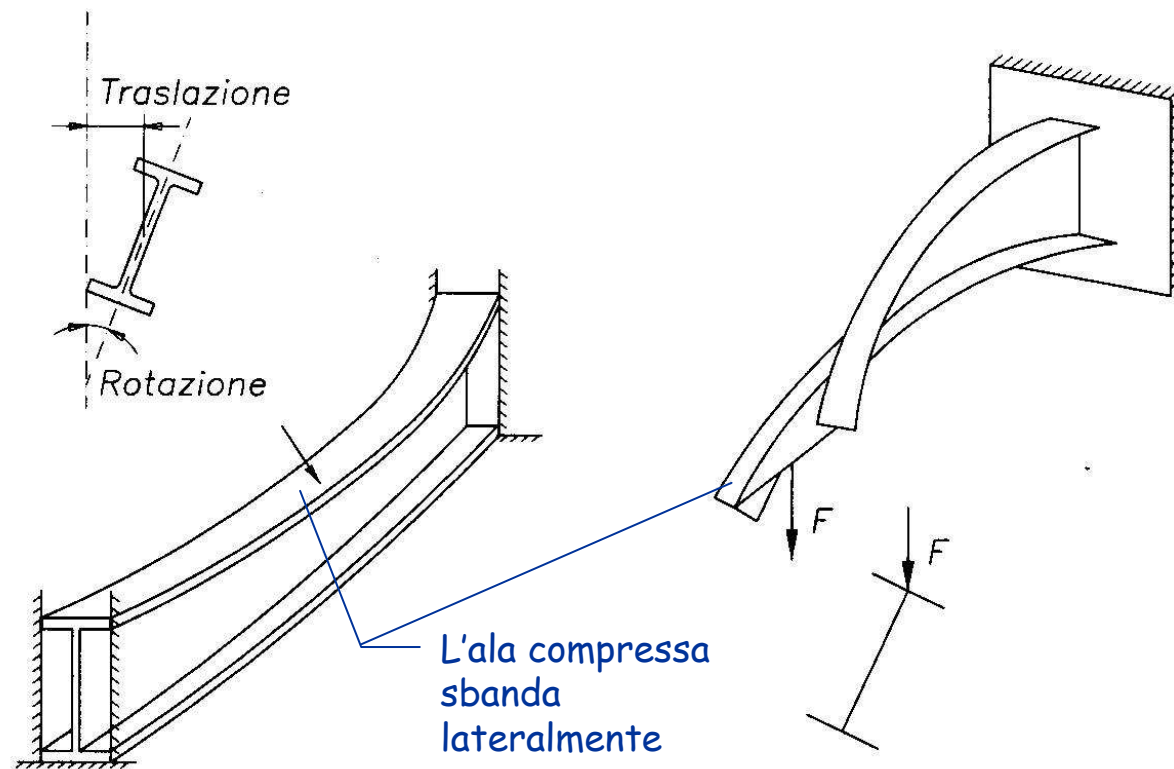
La sezione è realmente di classe 1

Esempio

- Si deve però verificare anche lo stato limite di esercizio
- Il calcolo è stato fatto in un esempio precedente (SLE)
- Si è visto che è necessaria una sezione parecchio più grande (HE 160 A, HE 140 B, IPE 180)
- Si consiglia di procedere sempre effettuando contemporaneamente le due verifiche (o meglio usando le due condizioni per il progetto)

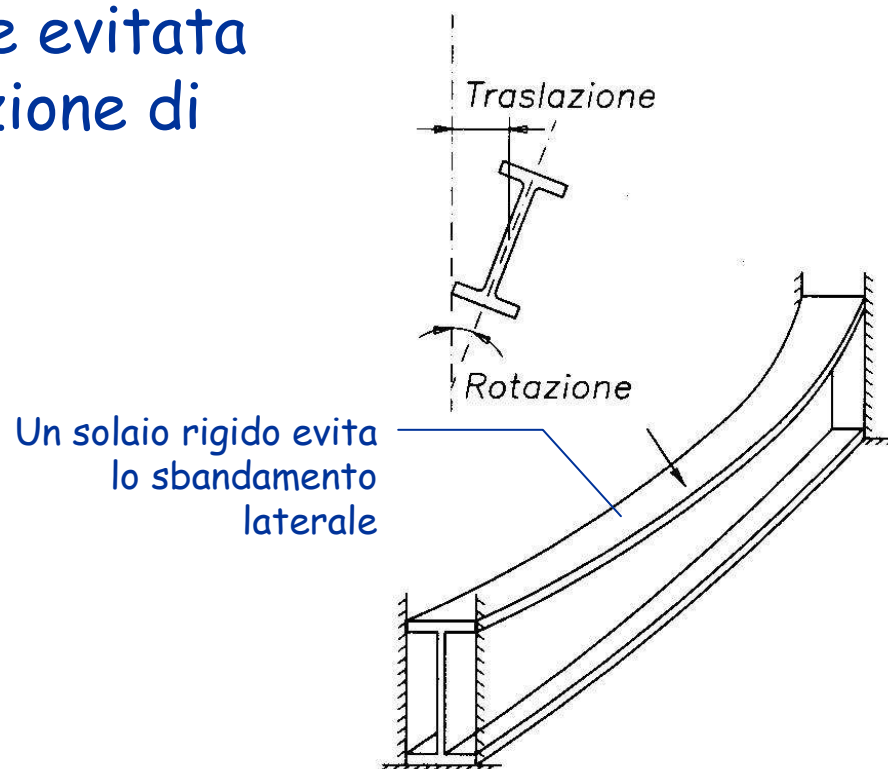
Instabilità flessio-torsionale

- Le travi inflesse possono sbandare trasversalmente, con rotazione intorno al loro asse (torsionale)



Instabilità flessio-torsionale

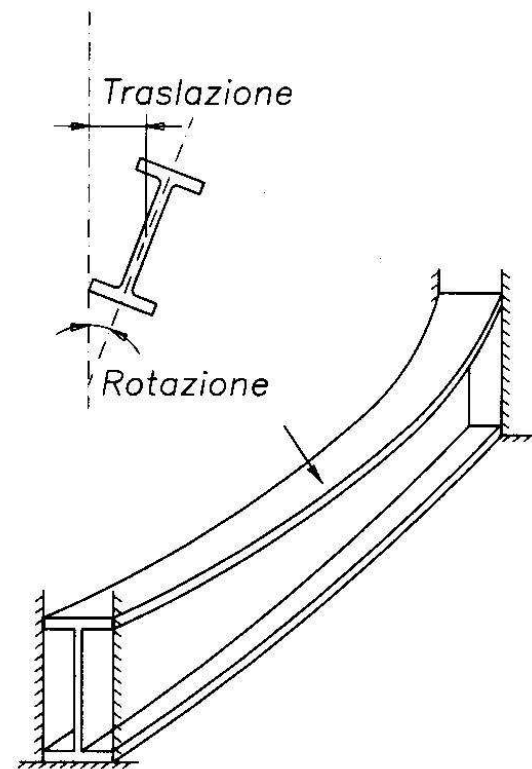
- Le travi inflesse possono sbandare trasversalmente, con rotazione intorno al loro asse (torsionale)
- L'instabilità può essere evitata con opportuna disposizione di elementi strutturali



Instabilità flessio-torsionale

- Le travi inflesse possono sbandare trasversalmente, con rotazione intorno al loro asse (torsionale)
- L'instabilità può essere evitata con opportuna disposizione di elementi strutturali
- Se non può essere evitata, bisogna ridurre il momento resistente

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M1}}$$



Instabilità flessione-torsionale

- Le travi inflesse possono sbandare trasversalmente, con rotazione intorno al loro asse (torsionale)
- L'instabilità può essere evitata con opportuna disposizione di elementi strutturali

Espressioni simili a quelle dell'instabilità Euleriana

- Se non può essere evitata, bisogna ridurre il momento resistente

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M1}}$$

Ulteriori fattori intervengono per distribuzioni di momento non uniforme e per sezioni non compatte

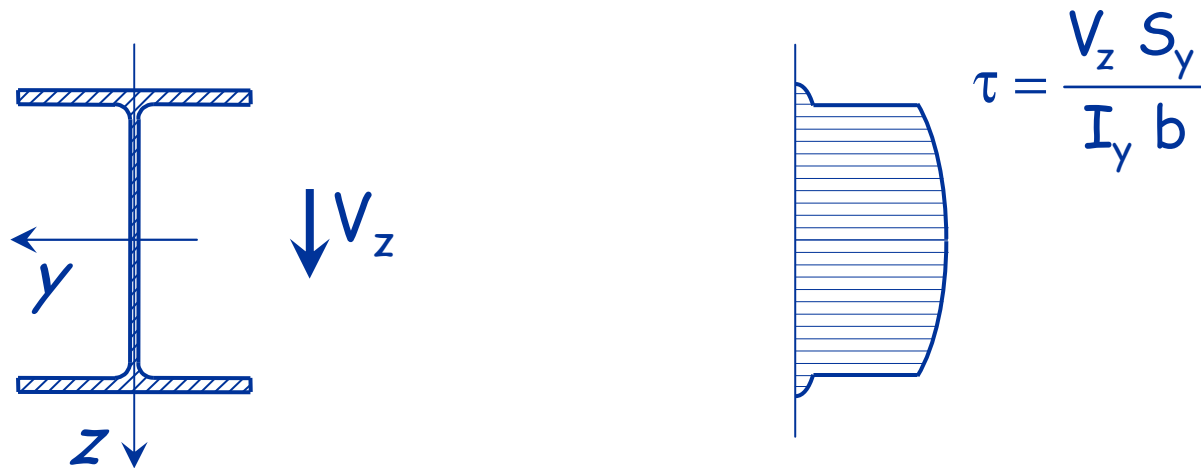
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

Taglio

Comportamento ultimo



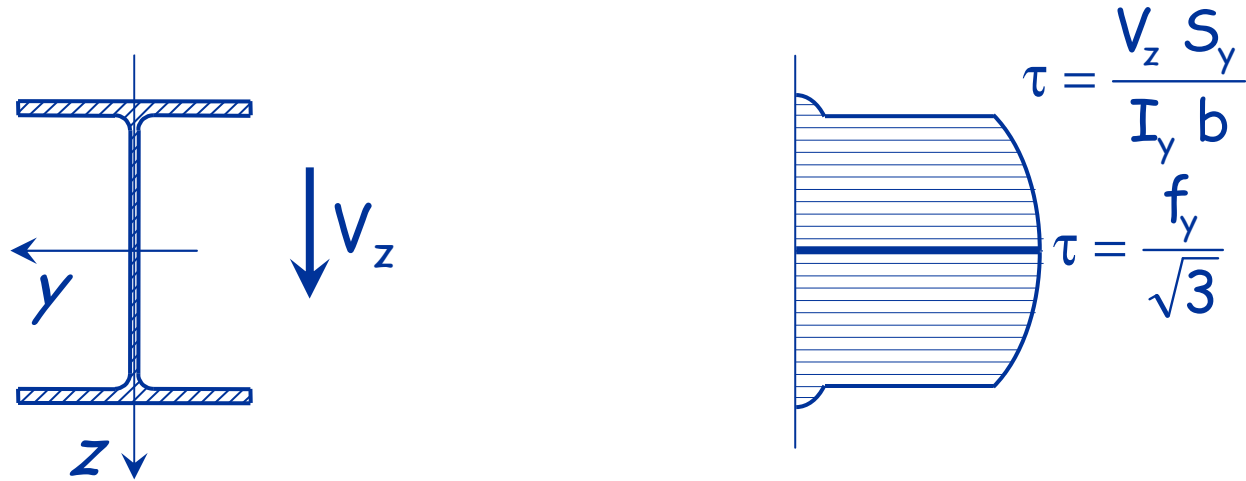
In campo lineare le tensioni si valutano con la formula di Jouraski:

S_y momento statico della sezione al di sopra (o al di sotto) della corda rispetto all'asse baricentrico;

I_y momento d'inerzia della sezione rispetto all'asse baricentrico;

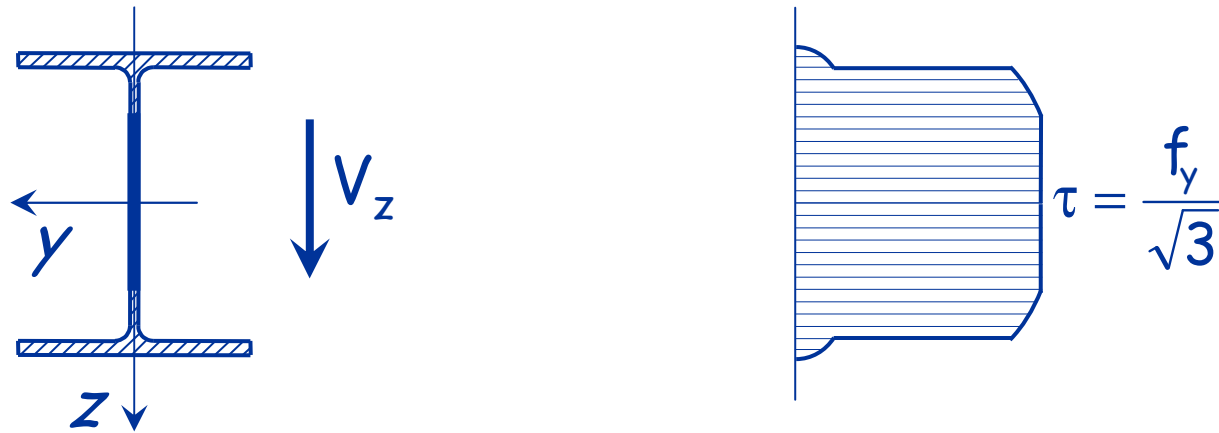
b ampiezza della corda.

Comportamento ultimo



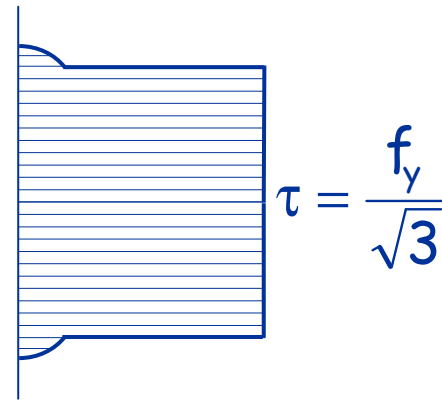
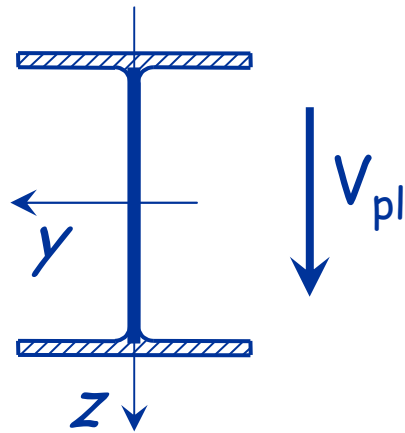
Facendo crescere il taglio, la fibra che sta sull'asse baricentrico (la più sollecitata) si plasticizza.

Comportamento ultimo



La plasticizzazione si propaga fino a che ...

Comportamento ultimo



... si plasticizza tutta l'anima.

$$V_{pl} = A_{anima} \frac{f_y}{\sqrt{3}}$$

$$V_{pl} = A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}}$$

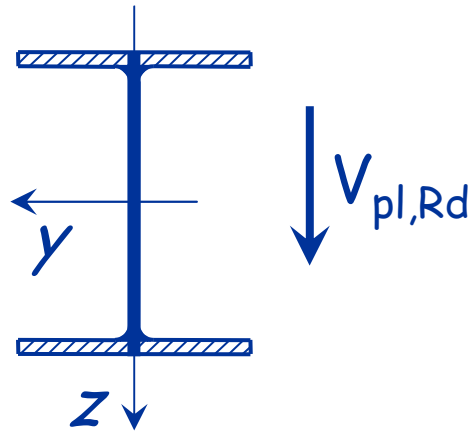
A_v

per sezioni a doppio T

in generale

area resistente a taglio

Verifica - stato limite ultimo



Per profili a doppio T

Si plasticizza tutta l'anima ed i raccordi circolari

Taglio resistente secondo l'Eurocodice 3

$$V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}}$$

A_v area resistente a taglio

Area resistente a taglio

- Precedenti versioni suggerivano di valutare l'area resistente a taglio in maniera approssimata

$$A_v = 1.04 h t_w$$

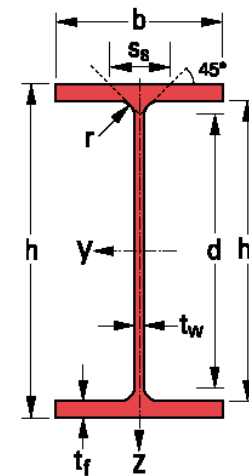
- Ora sono suggerite formule più dettagliate:
per travi a doppio T, caricate nel piano dell'anima

$$A_v = A - 2 b t_f + (t_w + 2 r) t_f$$

Area resistente a taglio

- Profilo IPE 240, soggetto a flessione e taglio

$$\begin{array}{ll} b = 120 \text{ mm} & t_f = 9.8 \text{ mm} \\ h = 240 \text{ mm} & t_w = 6.2 \text{ mm} \\ r = 15 \text{ mm} & A = 3912 \text{ mm}^2 \end{array}$$



Formula "vecchia"

$$A_v = 1.04 \times 240 \times 6.2 = 1548 \text{ cm}^2$$

Formula "nuova"

$$A_v = 3912 - 2 \times 120 \times 9.8 + (6.2 + 2 \times 15) \times 9.8 = 1915 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{1915 \times 235 / \sqrt{3}}{1.05} \times 10^{-3} = 247.4 \text{ kN}$$

Taglio - considerazioni

- In genere i profilati sono tali da avere una resistenza a taglio più che sufficiente
- Procedimento usuale:
progettare a flessione - verificare a taglio
- Finché il taglio sollecitante è piccolo rispetto a quello resistente (meno della metà) non c'è problema di interazione flessione-taglio
- Se il taglio è più grande occorre ridurre la resistenza a flessione

Flessione e taglio

- Quando $V_{Ed} > 0.5 V_{pl,Rd}$

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left(W_{pl} - \frac{\rho A_w^2}{4 t_w} \right) f_y}{\gamma_{M0}}$$

Questo è il W_{pl} dell'anima

con

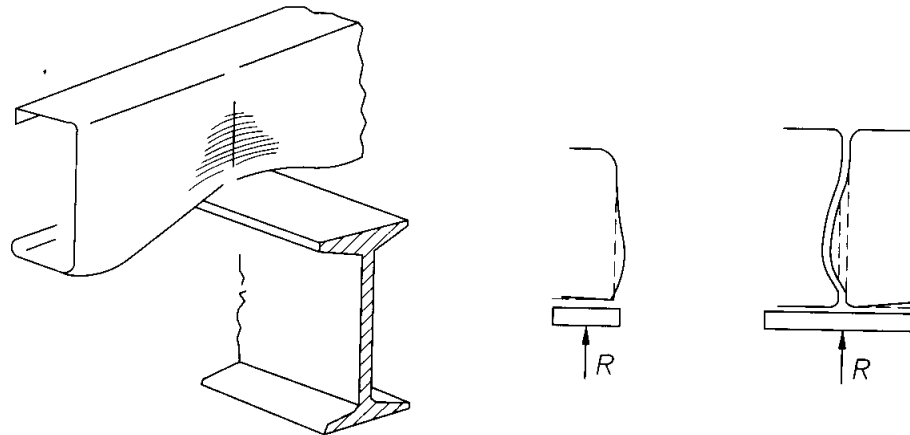
$$\rho = \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad A_w = h t_w$$

Taglio

Resistenza dell'anima ad azioni locali

In presenza di azioni concentrate o di taglio molto elevato si può avere:

- Schiacciamento dell'anima in prossimità della piattabanda caricata
- Imbozzamento dell'anima sotto forma di instabilità localizzata e schiacciamento dell'anima in prossimità della piattabanda caricata
- Instabilità dell'anima estesa a gran parte dell'altezza della membratura



Taglio

Resistenza dell'anima ad azioni locali

In presenza di azioni concentrate o di taglio molto elevato si può avere:

- Schiacciamento dell'anima in prossimità della piattabanda caricata
- Imbozzamento dell'anima sotto forma di instabilità localizzata e schiacciamento dell'anima in prossimità della piattabanda caricata
- Instabilità dell'anima estesa a gran parte dell'altezza della membratura

Il problema si può risolvere disponendo costole di irrigidimento in corrispondenza dell'applicazione del carico o degli appoggi

La necessità cresce all'aumentare del taglio e della snellezza dell'anima

In alternativa, occorre verificare la trave nei confronti dei fenomeni innanzi citati (vedere Eurocodice 3, parte 1-5)