

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

Progetto di aste e collegamenti in acciaio

3 - Sforzo normale centrato: trazione; compressione

Spoletto
21-23 ottobre 2010
Aurelio Gherzi

Verifica e progetto di sezioni allo SLU

Criteri generali

Tensione di snervamento f_y o tensione ultima f_u ?

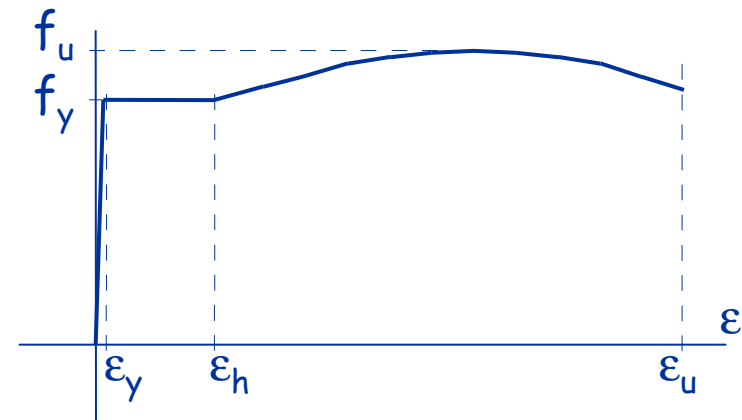
La tensione ultima f_u si raggiunge con deformazioni plastiche molto elevate

Se la zona plasticizzata è molto piccola, queste hanno scarso effetto globale:

si può accettare di raggiungere f_u

Se la zona plasticizzata è estesa, le deformazioni plastiche non sono accettabili:

ci si deve fermare a f_y



zone in corrispondenza di fori, collegamenti

aste, in generale

Criteri generali

Coefficienti parziali di sicurezza per il materiale

Vengono usati valori diversi, a seconda del problema

- resistenza di sezioni $\gamma_{M0} = 1.05$
- resistenza di aste all'instabilità $\gamma_{M1} = 1.05$
- resistenza ultima di sezioni $\gamma_{M2} = 1.25$
resistenza di bulloni, saldature
- resistenza di collegamenti a scorrimento
per SLU $\gamma_{M3} = 1.25$
per SLE $\gamma_{M3,ser} = 1.10$

Criteri generali

Classificazione delle sezioni

Le parti compresse di una sezione sono soggette al rischio di instabilità (instabilità locale)

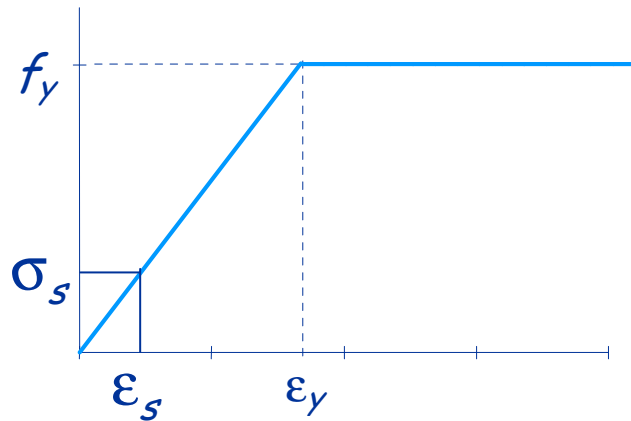
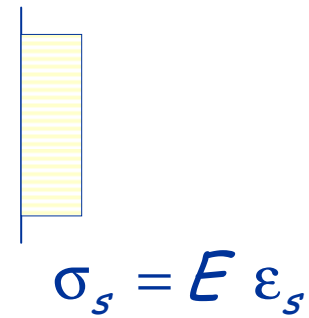
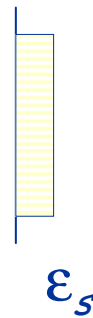
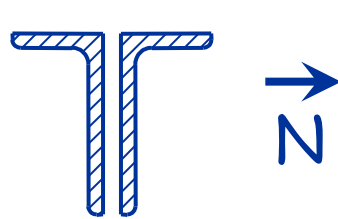
Le sezioni sono divise in 4 classi, in base a come l'instabilità locale ne condiziona il comportamento

- classe 1 - massima resistenza, massima duttilità
- classe 2 - massima resistenza, limitata duttilità
- classe 3 - resistenza limitata al raggiungimento della prima plasticizzazione
- classe 4 - instabilità precoce che avviene prima dello snervamento

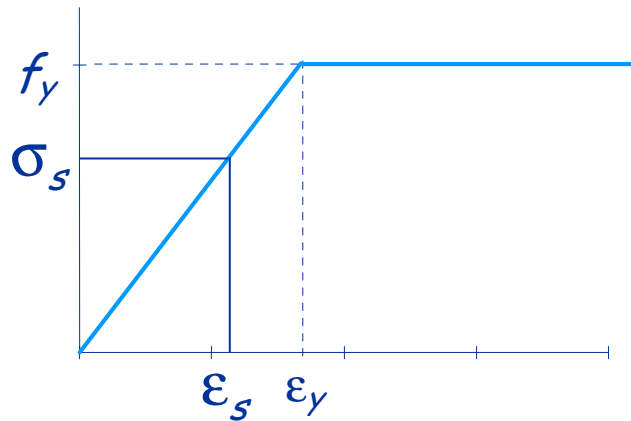
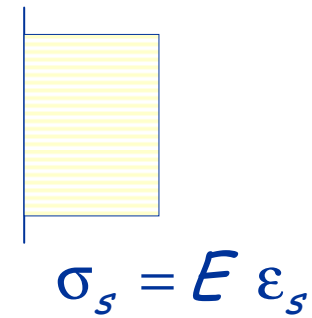
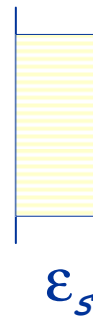
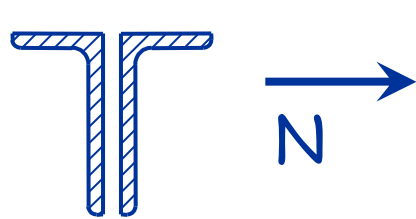
Verranno presentate in seguito

Sforzo normale
Trazione

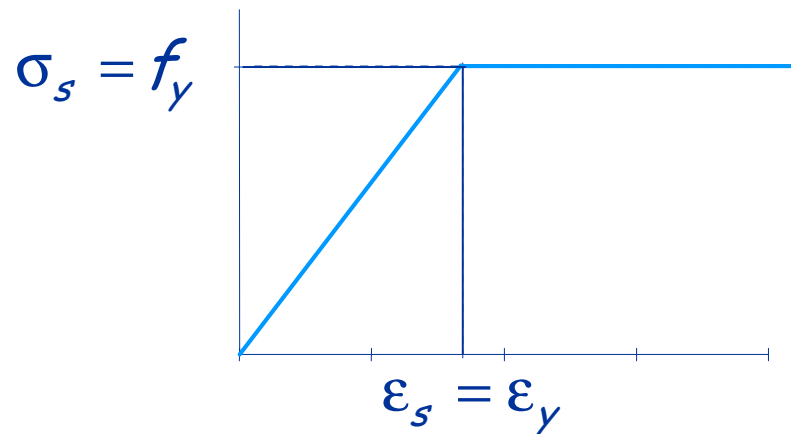
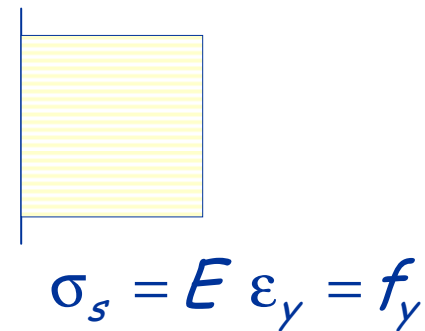
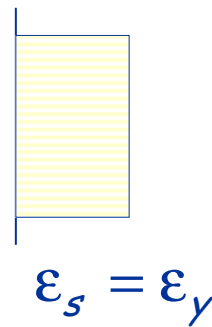
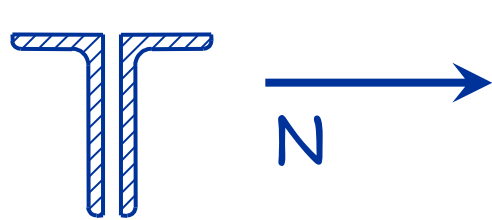
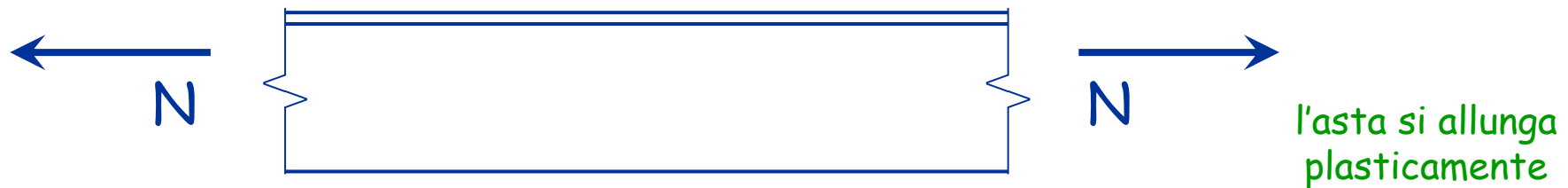
Comportamento al crescere delle deformazioni



Comportamento al crescere delle deformazioni

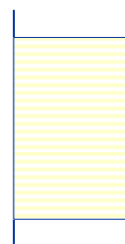
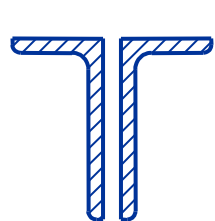


Comportamento al crescere delle deformazioni

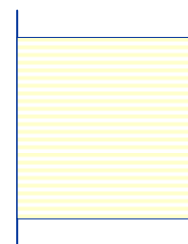


$$N_{pl} = A f_y$$

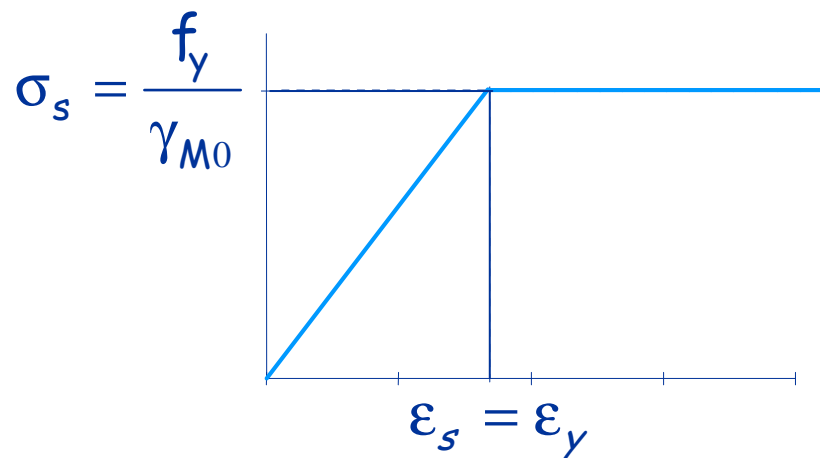
Comportamento ultimo resistenza plastica della sezione



$$\varepsilon_s = \varepsilon_y$$

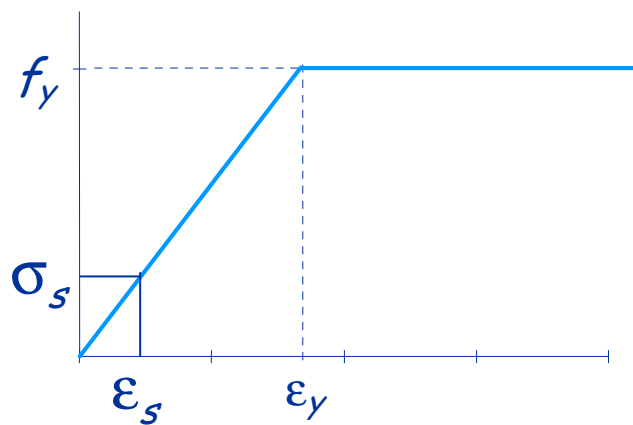
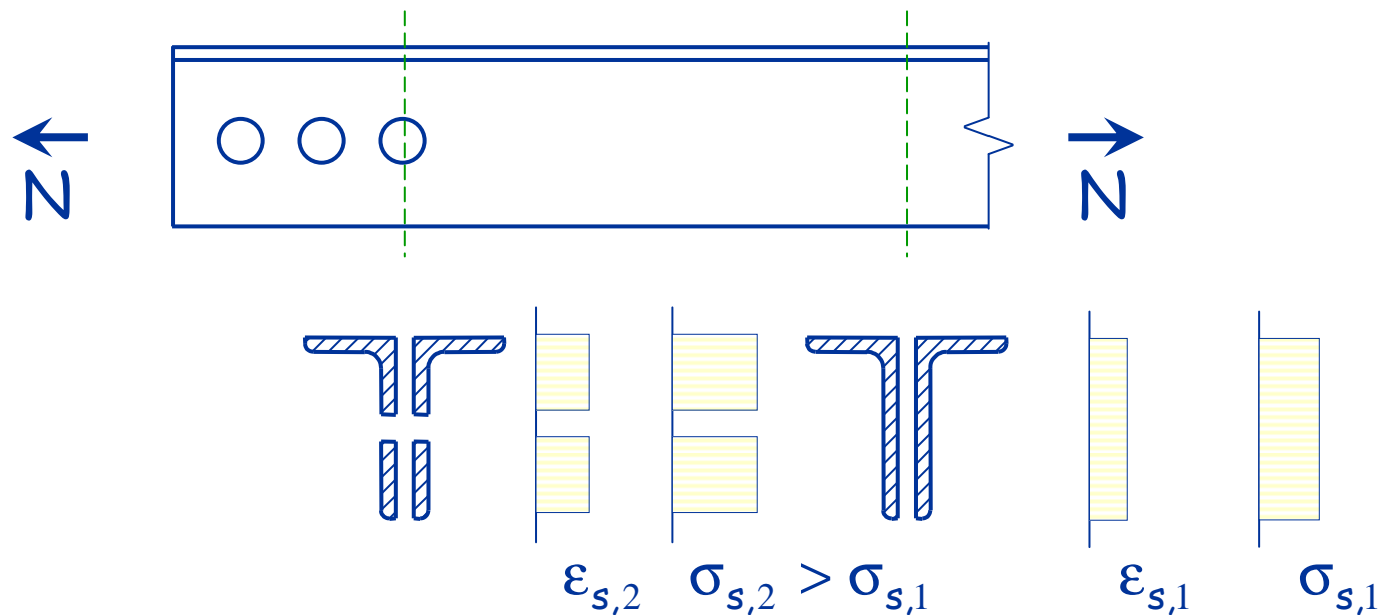


$$\sigma_s = f_y / \gamma_{M0}$$

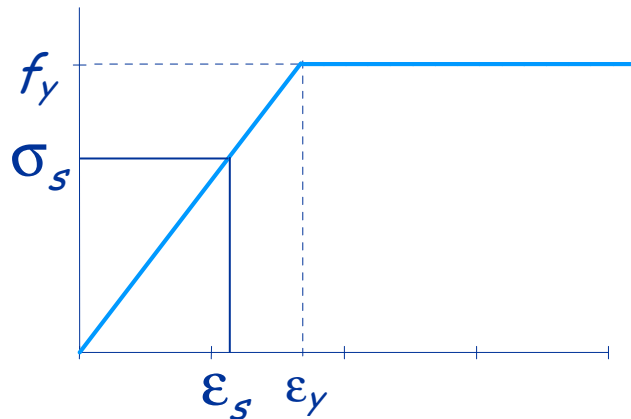
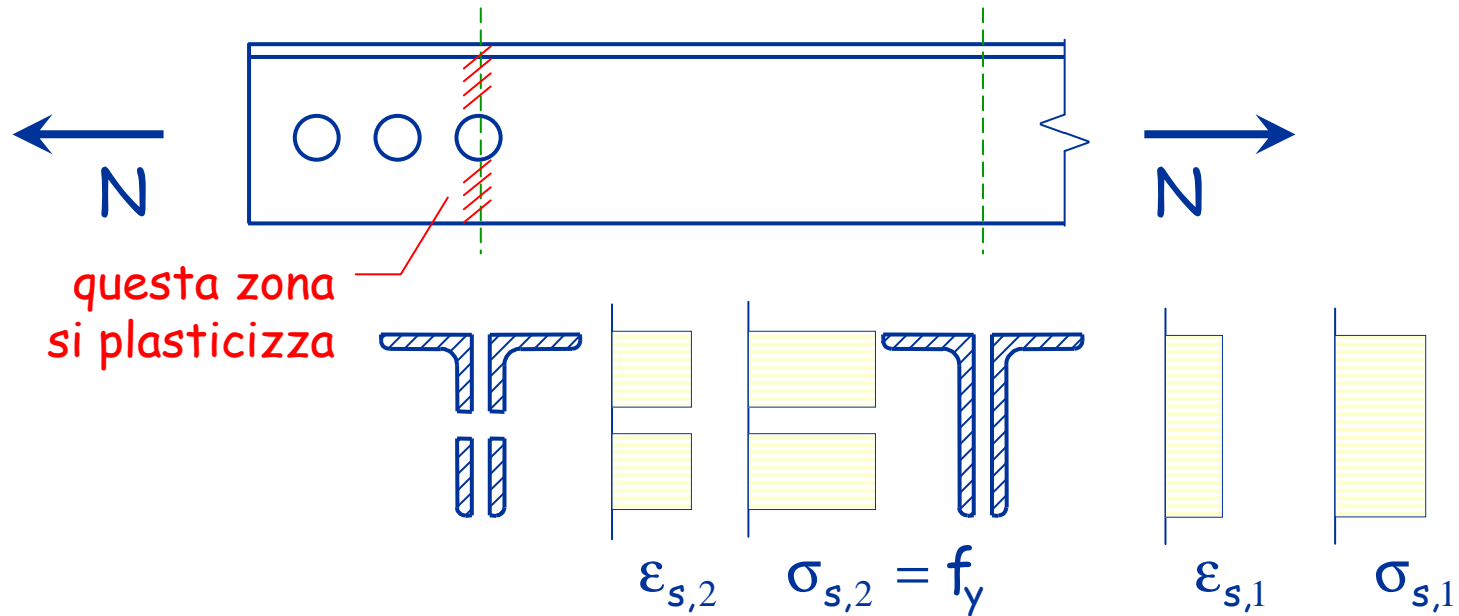


$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

Comportamento quando nell'asta vi sono dei fori



Comportamento quando nell'asta vi sono dei fori



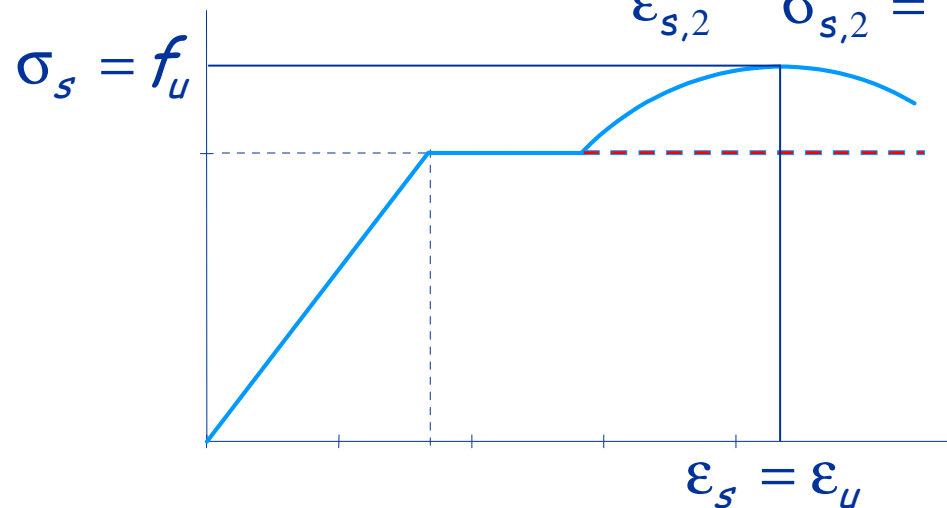
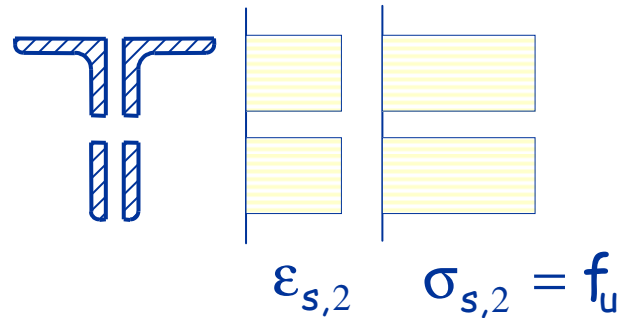
l'asta si allunga pochissimo perché la zona plasticizzata è molto piccola

incrementando la forza si ha incrudimento in prossimità del foro

Comportamento ultimo resistenza ultima della sezione forata



questa zona
arriva a
rottura



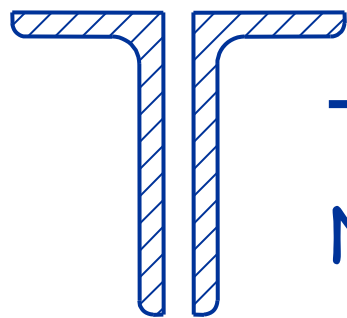
$$N_{u,Rd} = \frac{0.9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$$

Verifica - stato limite ultimo

La resistenza a trazione di un'asta è pari al minore tra i valori della resistenza plastica della sezione piena e della resistenza ultima della sezione indebolita.

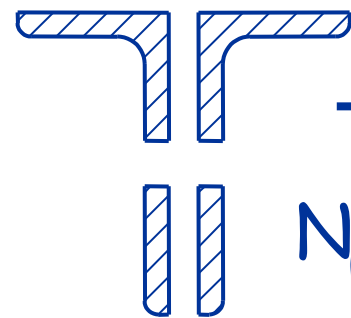
$$N_{Ed} \leq N_{t,Rd}$$

$$N_{t,Rd} = \min(N_{pl,Rd} , N_{u,Rd})$$



A diagram of a solid I-beam cross-section, represented by two vertical rectangles with diagonal hatching. An arrow points from the section to the formula for plastic resistance.

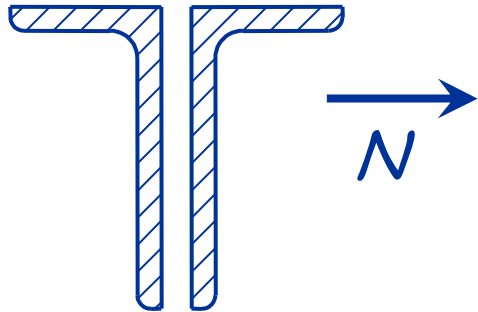
$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$



A diagram of a reduced I-beam cross-section, represented by two vertical rectangles with diagonal hatching. An arrow points from the section to the formula for ultimate resistance.

$$N_{u,Rd} = \frac{0.9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$$

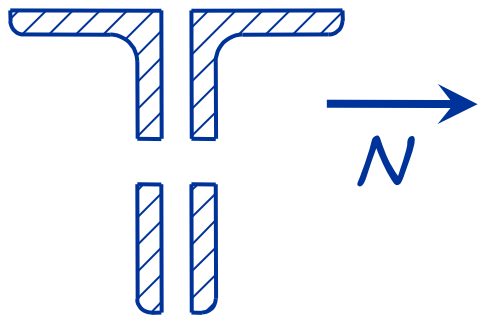
Verifica - tensioni ammissibili



$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \bar{\sigma}$$

$$N_{\max} = \bar{\sigma} A \geq N$$

Inoltre, se l'asta presenta sezioni indebolite



$$\sigma = \frac{N}{A_{net}} \leq \bar{\sigma}$$

$$N_{\max} = \bar{\sigma} A_{net} \geq N$$

Verifica - confronto

Sezione piena

TA $N_{\max} = \bar{\sigma}_s A$

$$160$$

ma i carichi
per SLU sono
1.4 volte tanto

$$160 \times 1.4 = 224$$

SLU $N_{pl,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} A$

$$235 / 1.05 = 224$$

Sezione indebolita

$$N_{\max} = \bar{\sigma}_s A_{net}$$

$$160 \times 1.4 = 224$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0.9 f_u}{\gamma_{M2}} A_{net}$$

$$0.9 \times 360 / 1.2 = 270$$

Acciaio Fe 360

Verifica - confronto

Sezione piena

Sezione indebolita

TA

$$N_{\max} = \bar{\sigma}_s A$$

$$240$$

$$240 \times 1.4 = 336$$

$$N_{\max} = \bar{\sigma}_s A_{\text{net}}$$

$$240 \times 1.4 = 336$$

SLU

$$N_{pl,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} A$$

$$355 / 1.05 = 338$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0.9 f_u}{\gamma_{M2}} A_{\text{net}}$$

$$0.9 \times 510 / 1.2 = 383$$

Acciaio Fe 510

Verifica - commento

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

- Sostanzialmente simile a quella valutata alle tensioni ammissibili per la sezione piena;
- Sensibilmente maggiore (tra il 10 ed 15% più grande) a quella valutata alle tensioni ammissibili per la sezione indebolita.

Duttilità

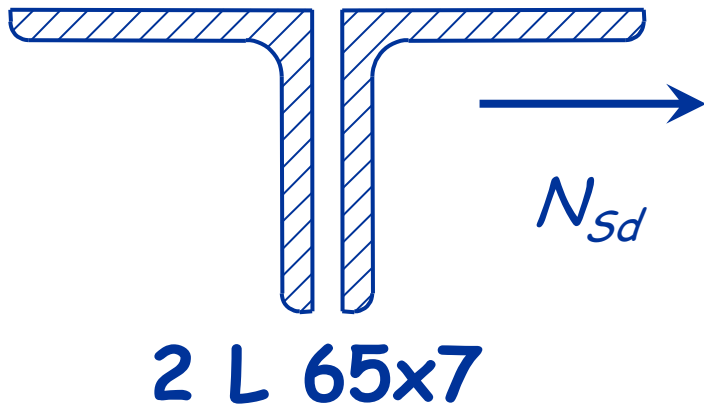
Il comportamento dell'asta (con fori) dipende da chi è più grande tra $N_{pl,Rd}$ e $N_{u,Rd}$

- Se $N_{pl,Rd} > N_{u,Rd}$
si arriva alla rottura della sezione forata prima dello snervamento dell'intera asta
il comportamento complessivo è fragile
- Se $N_{pl,Rd} < N_{u,Rd}$
si arriva allo snervamento dell'intera asta prima della rottura della sezione forata
il comportamento complessivo è duttile

Esempio

Calcolo della resistenza e verifica di duttilità

Dati:



$$N_{Ed} = 339 \text{ kN}$$

Acciaio S235

Bulloni M14

Fori 15 mm

$$A = 2 \times 870 = 1740 \text{ mm}^2$$

$$A_{net} = 1740 - 2 \times 15 \times 7 = 1530 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1740 \times 235}{1.05 \times 10^3} = 389.4 \text{ kN}$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0.9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \times 1530 \times 360}{1.25 \times 10^3} = 396.6 \text{ kN}$$

$$N_{pl,Rd} < N_{u,Rd}$$

L'asta resiste ed è duttile

Per ottenere sezioni duttili ...

- Dovendo essere $N_{pl,Rd} < N_{u,Rd}$

si deve verificare che

$$N_{u,Rd} = \frac{0.9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \geq N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

ovvero

$$\frac{A_{net}}{A} \geq \frac{\gamma_{M2} f_y}{0.9 \gamma_{M0} f_u}$$

acciaio	S235	S275	S355
$A_{net}/A \geq$	0.863	0.846	0.921

Progetto - stato limite ultimo

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

$$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd} = \frac{f_y A}{\gamma_{M0}} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{N_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}$$

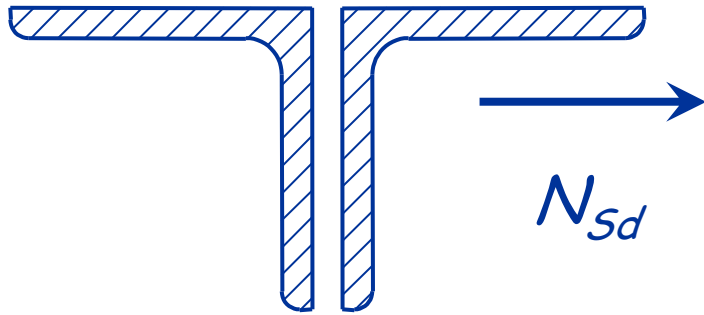
- 2 - Si sceglie il profilato.

- 3 - Se esistono sezioni indebolite (per fori, intagli, ecc.) bisogna verificare anche che:

$$N_{Ed} \leq N_{u,Rd} = \frac{0.9 f_u A_{net}}{\gamma_{M2}}$$

Esempio

Dati:



$$N_{Ed} = 339 \text{ kN}$$

Acciaio S235

Bulloni M14

Fori 15 mm

1 - Determinazione dell'area necessaria.

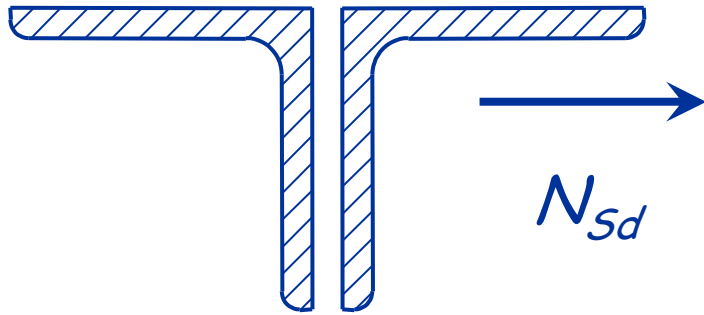
$$A = \frac{\gamma_{M0} N_{Ed}}{f_y} = \frac{339.9 \times 10^3}{235/1.05} = 1518 \text{ mm}^2$$

2 - Scelta della sezione.

Uso 2 L 65x7 $A = 1740 \text{ mm}^2$

Esempio

Dati:



$$N_{Ed} = 339 \text{ kN}$$

Acciaio S235

Bulloni M14

Fori 15 mm

3 - Verifica della sezione indebolita.

$$A_{net} = A - A_{foro} = 1740 - 2 \times 15 \times 7 = 1530 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0.9 f_u A_{net}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \times 360 \times 1530}{1.25 \times 10^3} = 396.6 \text{ kN} > N_{Ed}$$

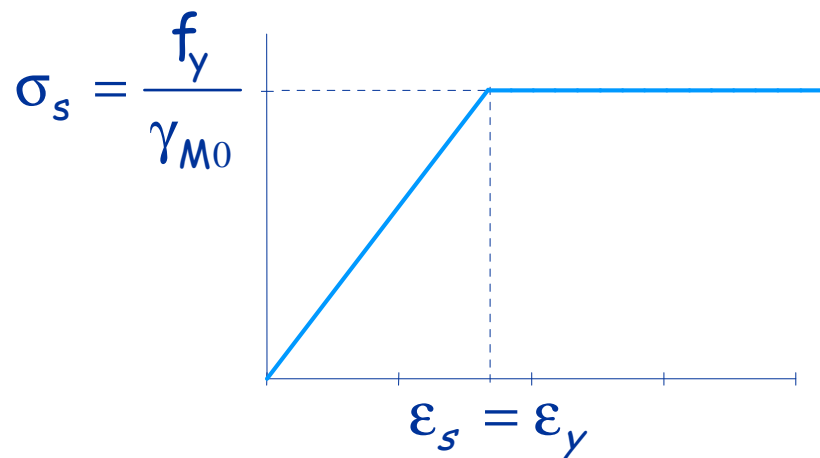
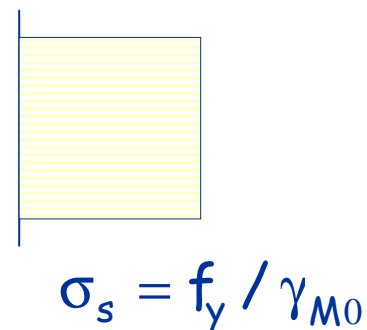
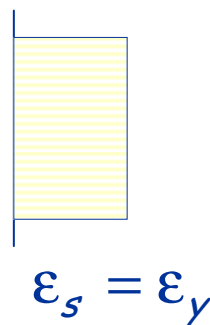
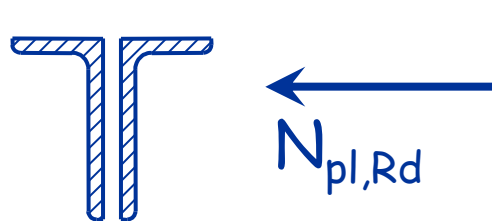
Anche la sezione indebolita è verificata

Sforzo normale
Compressione

Comportamento ultimo resistenza plastica della sezione



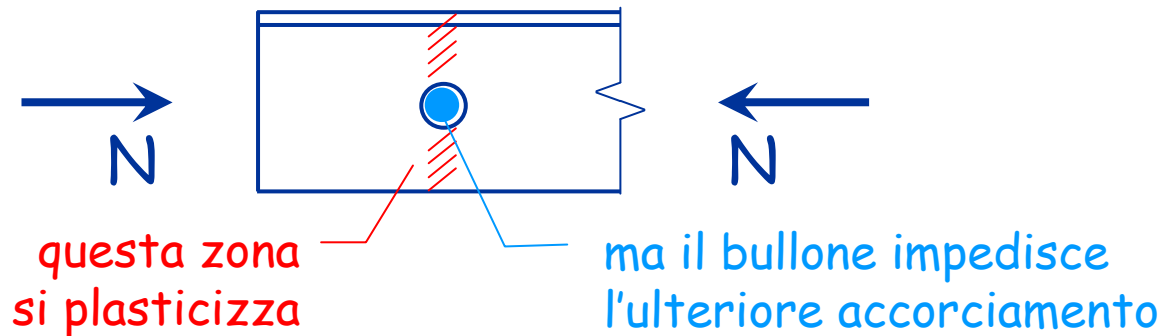
una sezione o un concio di
asta tozzo tende ad
accorciarsi plasticamente



$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

come per trazione

Comportamento quando vi sono dei fori



- Una sezione, o un'asta tozza, compressa hanno la stessa resistenza di una sezione compressa
 - La presenza di fori (che contengono bulloni) non inficia la resistenza
- ... ma questo vale solo per la sezione, o per un elemento tozzo, non per le aste usuali

Modalità di collasso di aste compresse



Modalità di collasso di aste compresse



Plasticizzazione della
sezione trasversale
dell'asta



Modalità di collasso di aste compresse

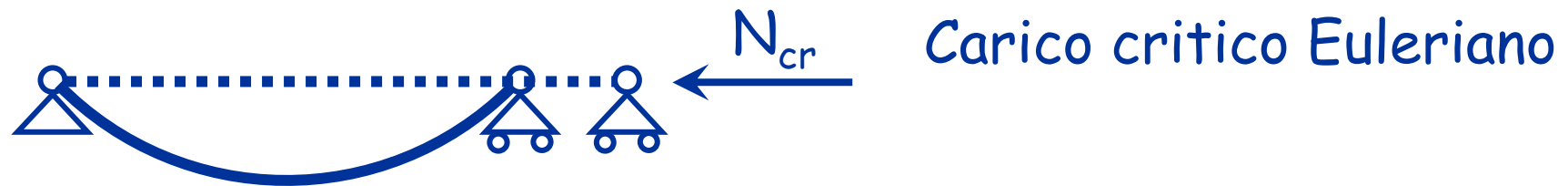


Plasticizzazione della
sezione trasversale
dell'asta



Instabilità laterale
dell'asta

Comportamento ultimo di un'asta ideale



$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{l_0^2}$$

I = momento d'inerzia della sezione

l_0 = lunghezza libera d'inflessione

Dividendo per l'area della sezione si ottiene la tensione critica di un'asta ideale:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

λ = snellezza dell'asta

$$\lambda = \frac{l_0}{i}$$

i = raggio d'inerzia della sezione

Comportamento ultimo di un'asta ideale

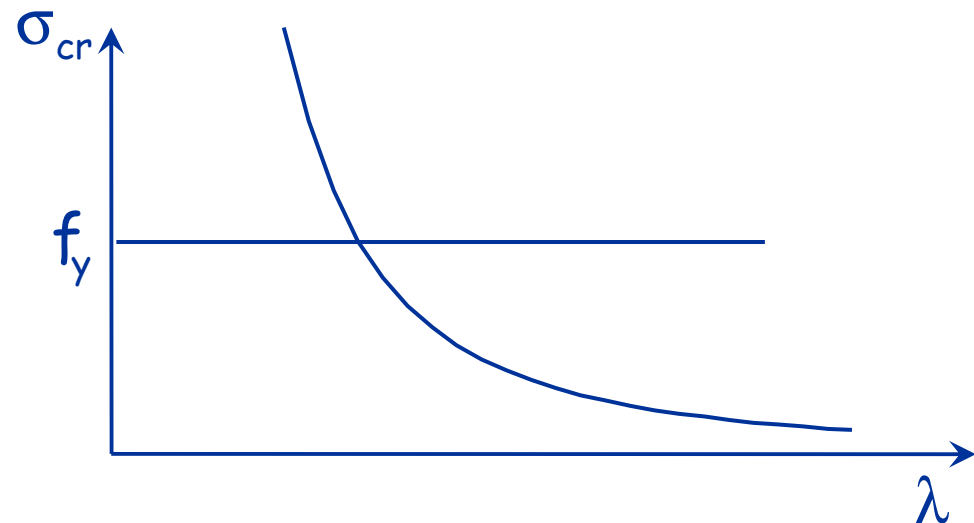
$$\sigma = \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

Instabilità dell'asta

inoltre

$$\sigma = f_y$$

Collasso plastico



Verifica di un'asta ideale

$$\sigma = \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

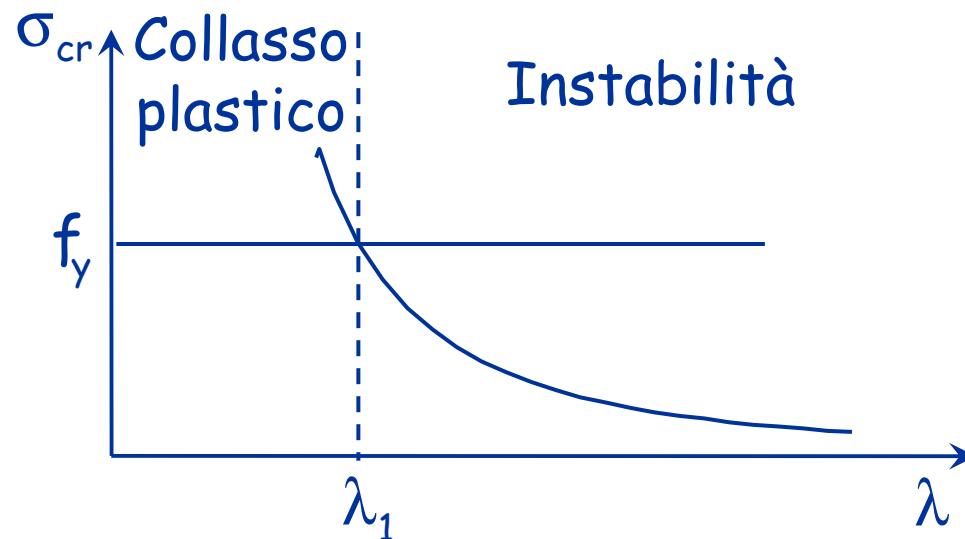
Instabilità dell'asta

inoltre

$$\sigma = f_y$$

Collasso plastico

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$



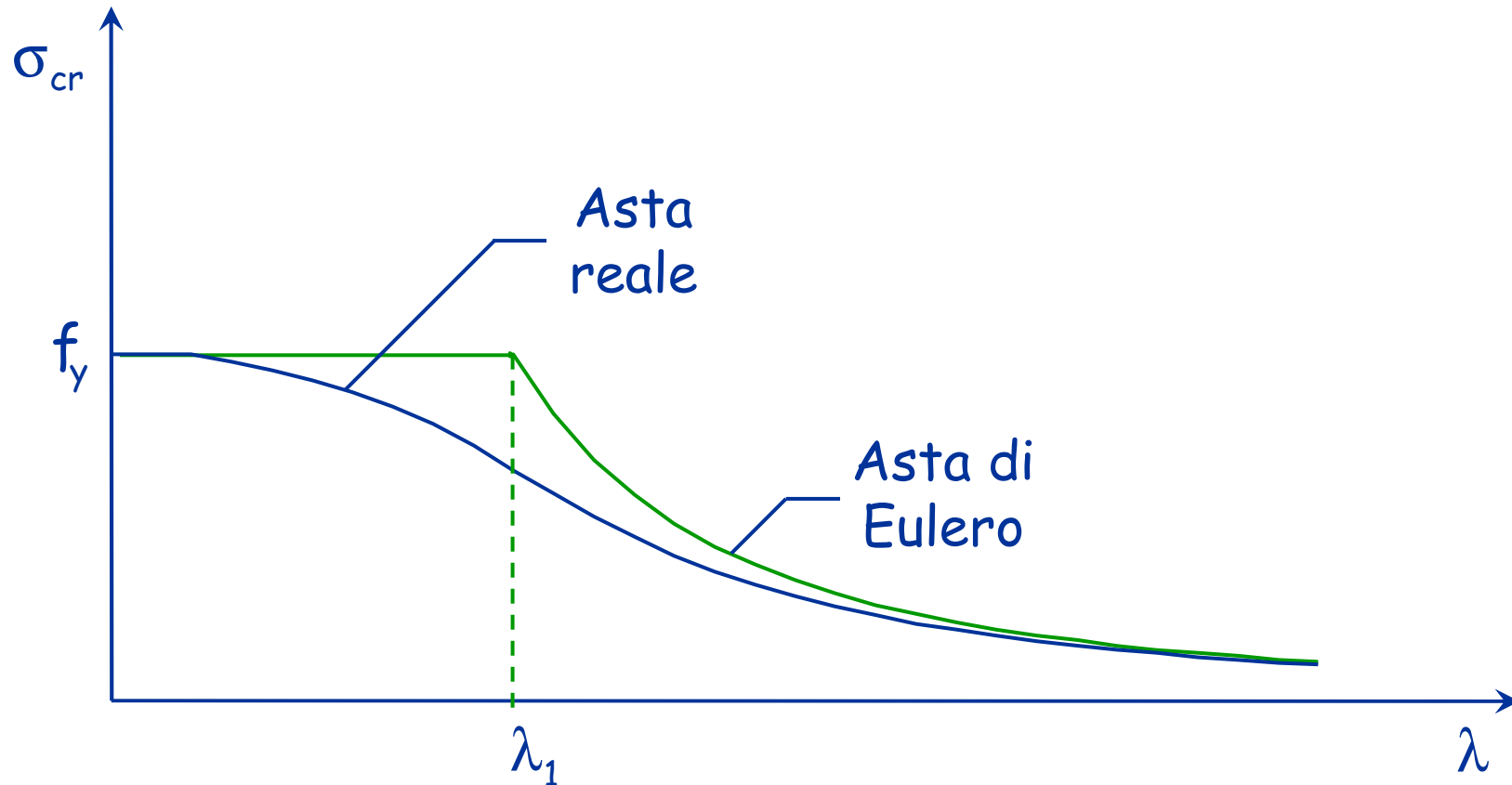
Aste reali

Nelle aste reali sono sempre presenti imperfezioni di tipo geometrico e meccanico:

- L'asse dell'asta non è mai perfettamente rettilineo;
- La sezione trasversale dell'asta è sede di tensioni (residue) ancor prima dell'applicazione dei carichi sulla struttura;
- La tensione di snervamento non è costante sulla sezione.

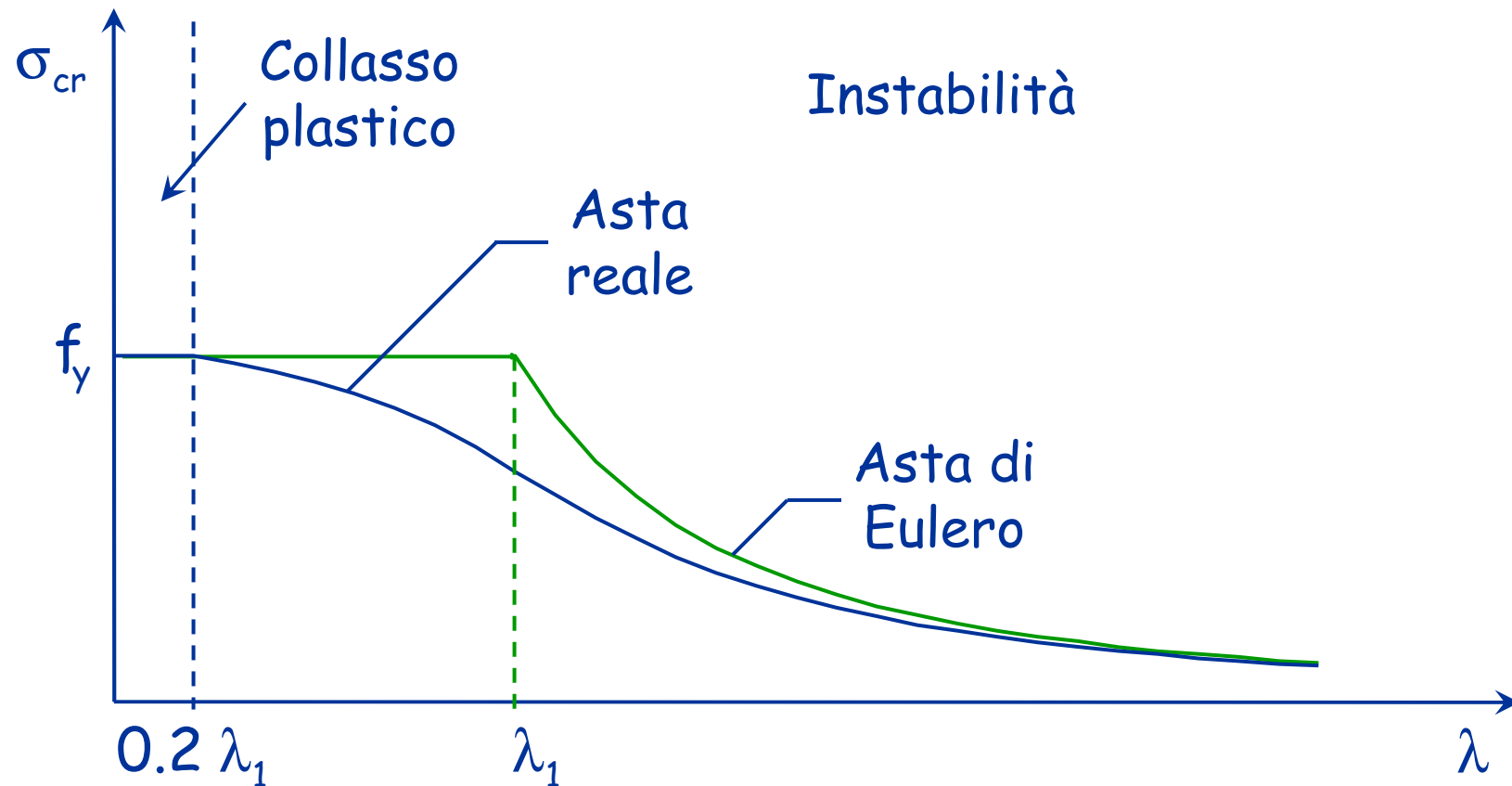
Comportamento delle aste reali

A causa delle imperfezioni la resistenza all'instabilità di un'asta reale è inferiore a quella dell'asta di Eulero.



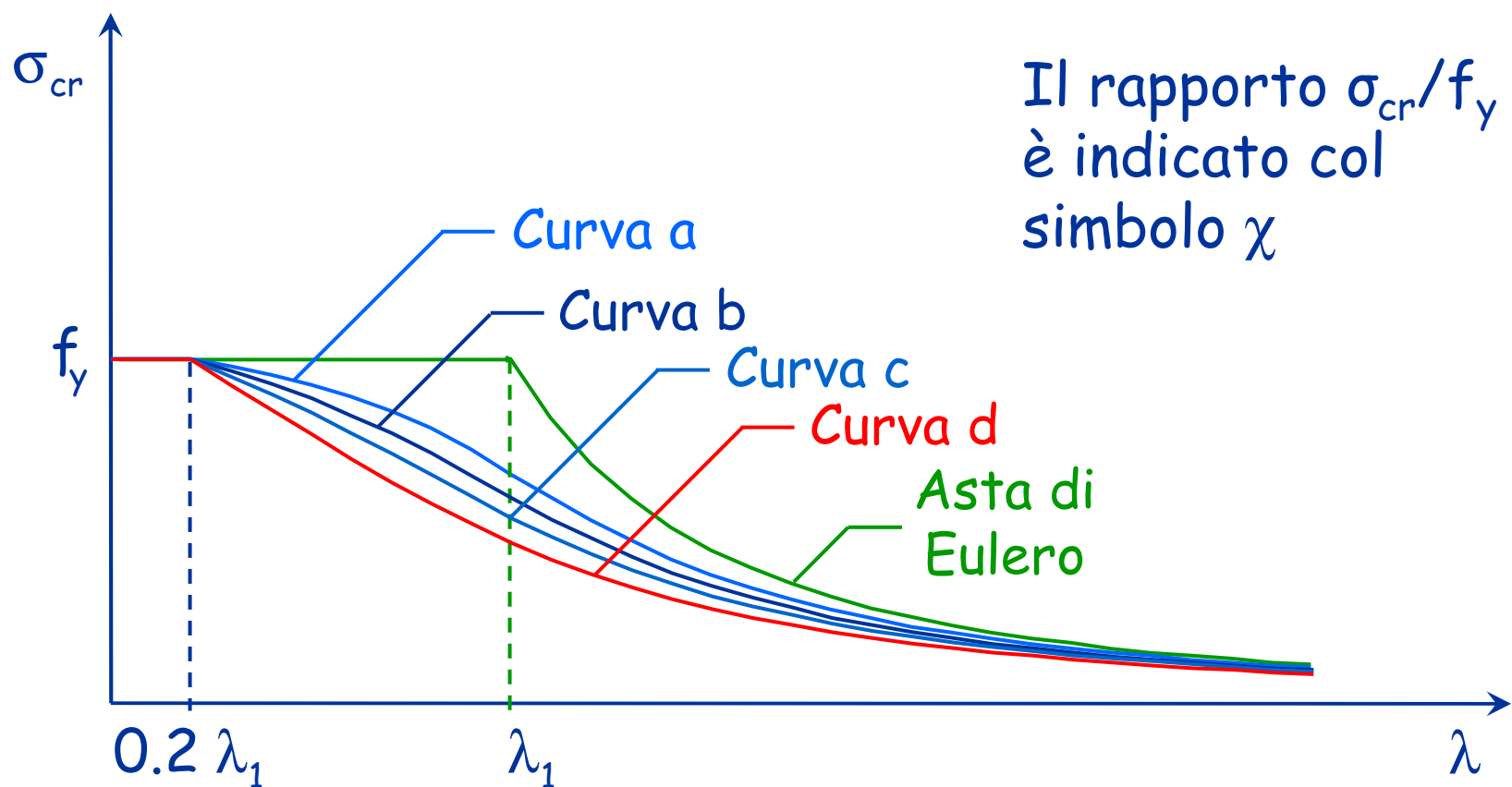
Comportamento delle aste reali

Il collasso plastico avviene solo per valori di snellezza molto bassi $\lambda \leq 0.2 \lambda_1$.



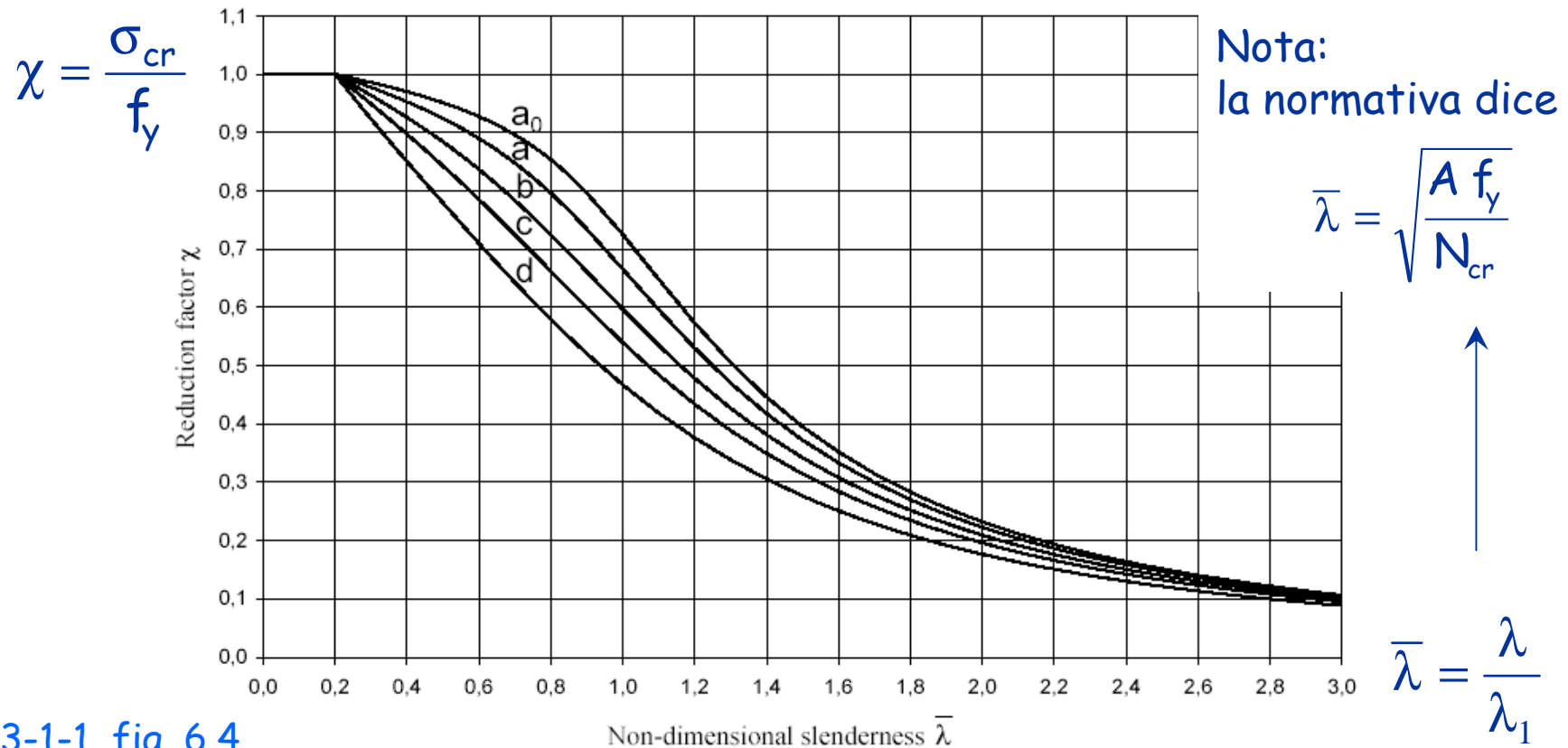
Comportamento delle aste reali

Il comportamento dipende dal tipo di profilato. La normativa (NTC08, EC3) distingue 5 curve di stabilità



Comportamento delle aste reali

Il comportamento dipende dal tipo di profilato. La normativa (NTC08, EC3) distingue 5 curve di stabilità



EC3-1-1, fig. 6.4

Comportamento delle aste reali

Vengono fornite anche formule per calcolare χ

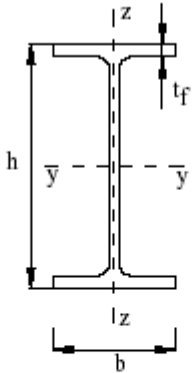
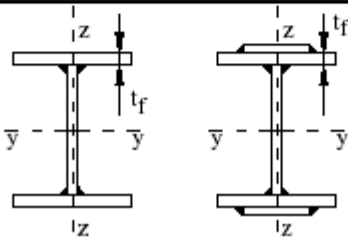
$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0$$

$$\Phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$$

Curva di instabilità	a_0	a	b	c	d
Fattore di imperfezione α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

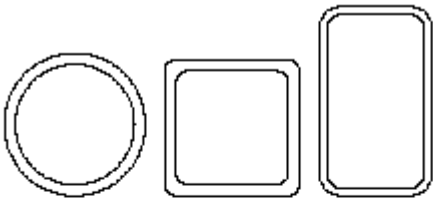
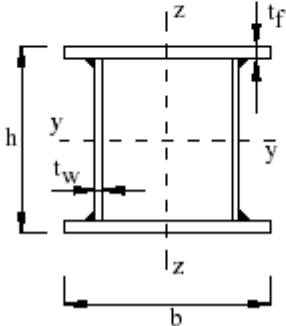
Comportamento delle aste reali

- Le imperfezioni (e quindi la scelta tra le curve) dipende dalla forma del profilo

Sezione trasversale		Limiti		Inflessione intorno all'asse	Curva di instabilità	
					S235, S275, S355, S420	S460
Sezioni laminate		h/b > 1,2	t_f ≤ 40 mm	y-y z-z	a b	a_0 a_0
			40 mm < t_f ≤ 100 mm	y-y z-z	b c	a a
		h/b ≤ 1,2	t_f ≤ 100 mm	y-y z-z	b c	a a
			t_f > 100 mm	y-y z-z	d d	c c
Sezioni ad I saldate		t_f ≤ 40 mm		y-y z-z	b c	b c
		t_f > 40 mm		y-y z-z	c d	c d

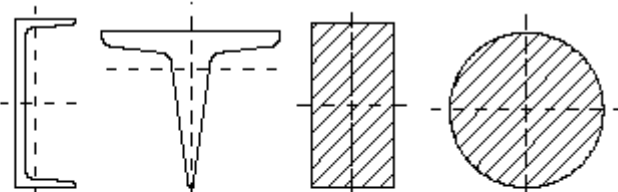
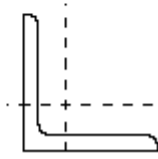
Comportamento delle aste reali

- Le imperfezioni (e quindi la scelta tra le curve) dipende dalla forma del profilo

Sezione trasversale		Limiti	Inflessione intorno all'asse	Curva di instabilità	
				S235, S275, S355, S420	S460
Sezioni cave		Sezione formata "a caldo"	qualunque	a	a ₀
		Sezione formata "a freddo"	qualunque	c	c
Sezioni scatolari saldate		In generale	qualunque	b	b
		saldature "spesse": $a > 0.5t_f$ $b/t_f < 30$; $h/t_w < 30$	qualunque	c	c

Comportamento delle aste reali

- Le imperfezioni (e quindi la scelta tra le curve) dipende dalla forma del profilo

Sezione trasversale	Limiti	Inflessione intorno all'asse	Curva di instabilità	
			S235, S275, S355, S420	S460
Sezioni piene, ad U e T		qualunque	c	c
Sezioni ad L		qualunque	b	b

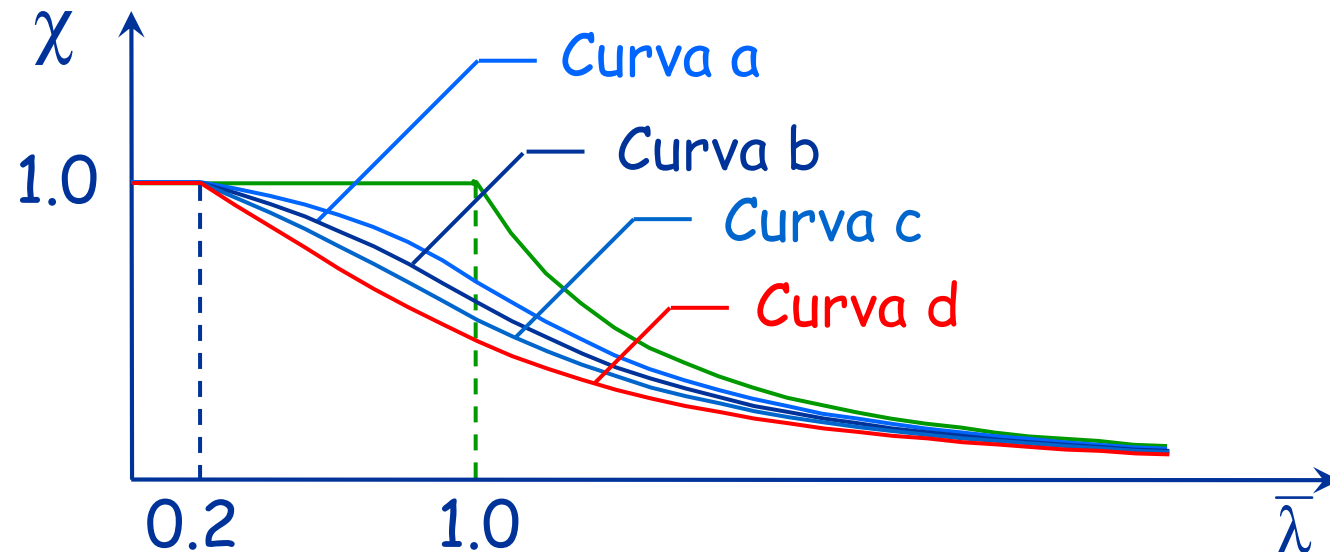
Verifica - stato limite ultimo

$$N_b = A \sigma_{cr} = \frac{\sigma_{cr}}{f_y} f_y A = \chi f_y A$$

$$\chi = \frac{\sigma_{cr}}{f_y} \leq 1$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

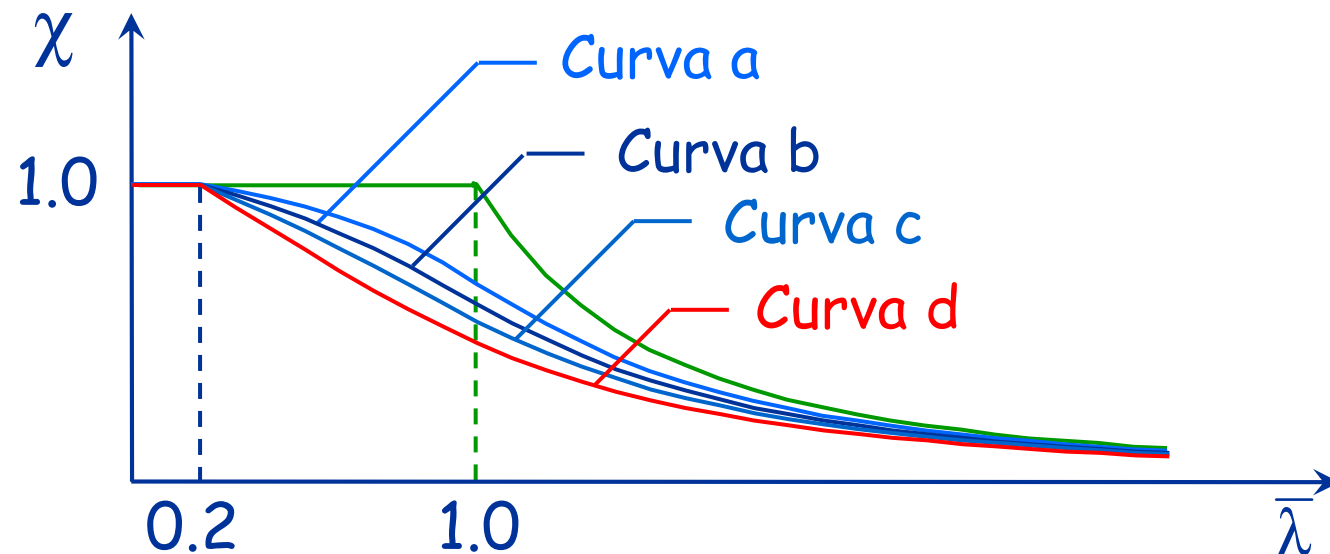


Verifica - stato limite ultimo

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

Resistenza all'instabilità

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$$

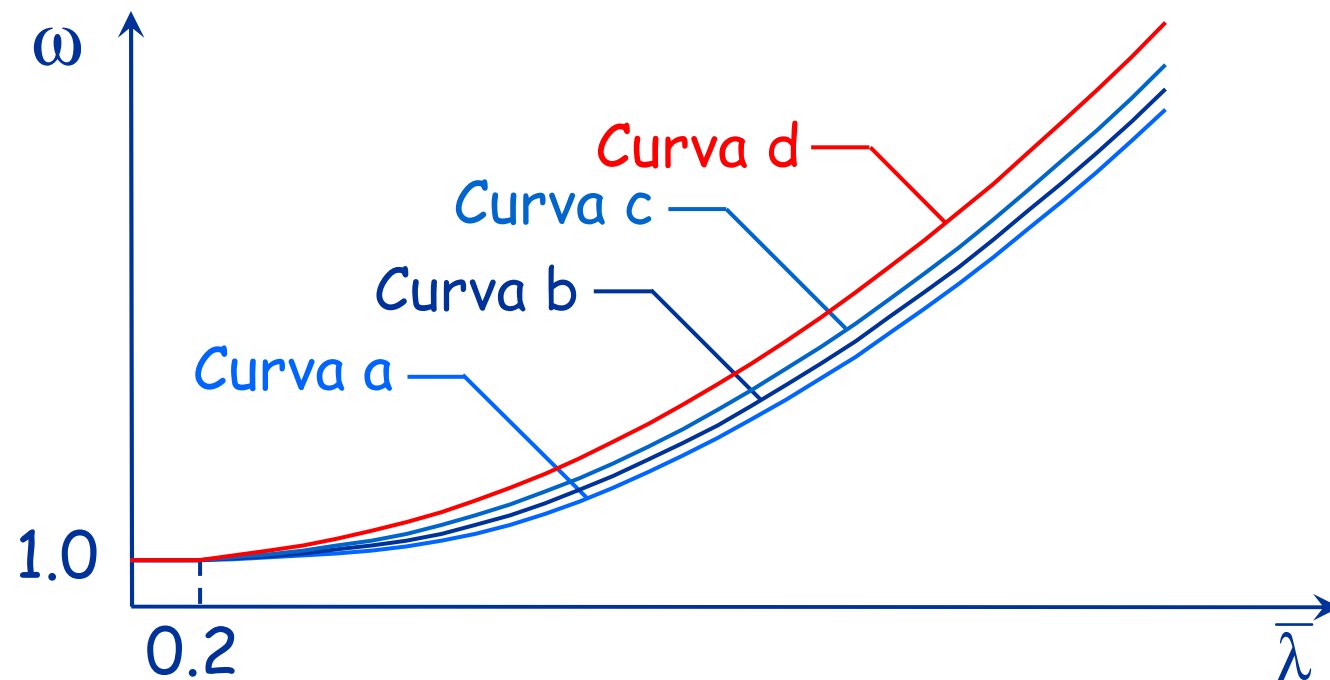


Verifica - tensioni ammissibili

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \sigma_{cr} \leq \frac{\sigma_{cr}}{\bar{\sigma}} \bar{\sigma} \leq \frac{\bar{\sigma}}{\omega}$$

$$\sigma = \omega \frac{N}{A} \leq \bar{\sigma}$$

$$\omega = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{cr}} \geq 1 \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1}$$

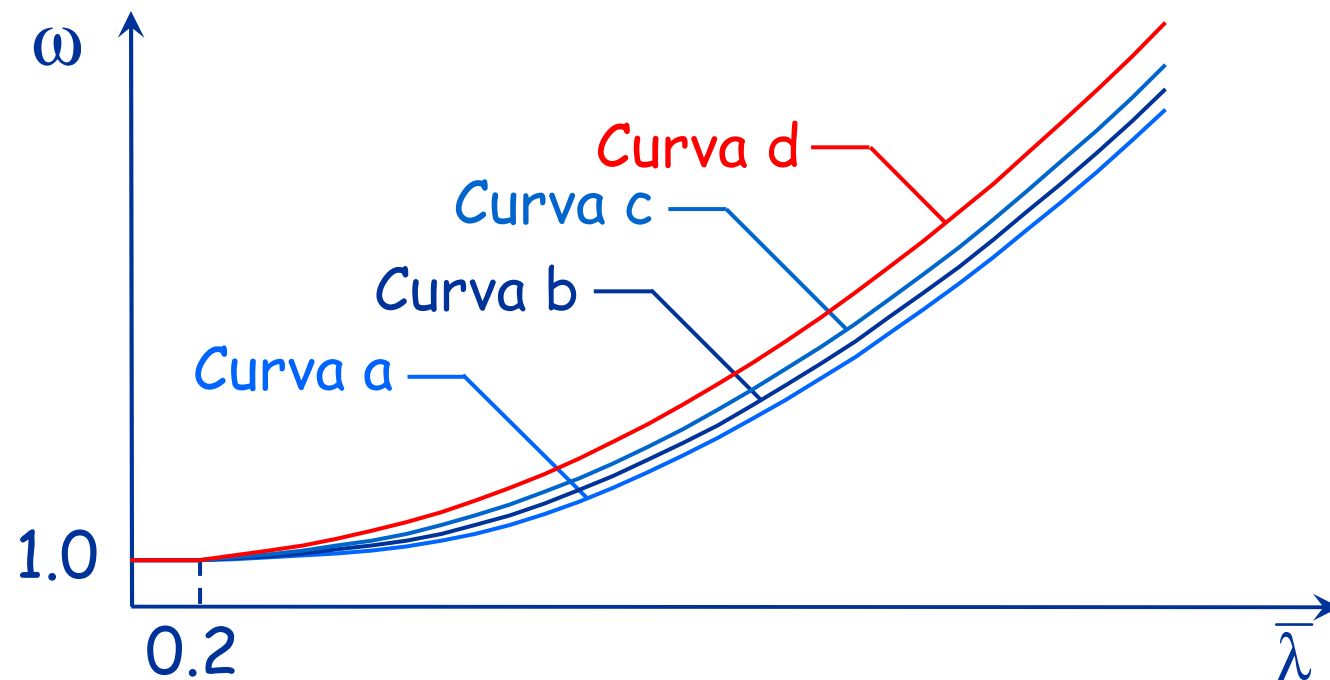


Verifica - tensioni ammissibili

$$N_{\max} = \frac{1}{\omega} \bar{\sigma} A$$

Sforzo normale ammissibile

$$N \leq N_{\max}$$



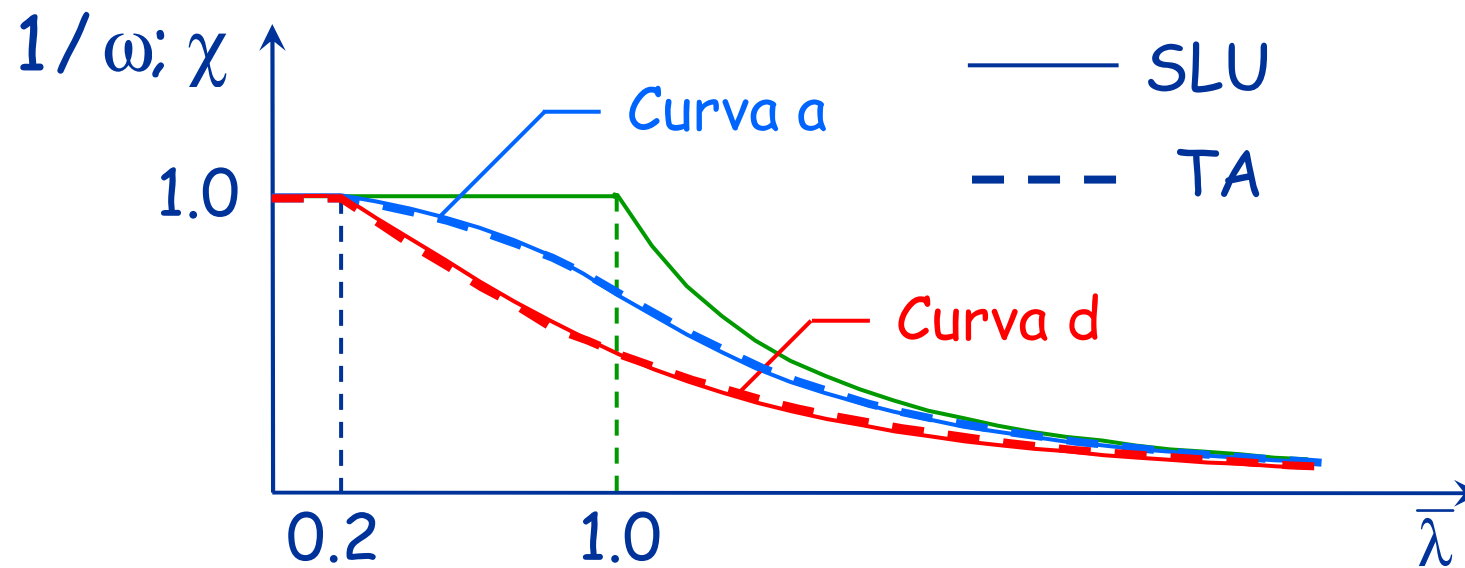
Verifica - confronto

$$N_{\max} = \frac{1}{\omega} \sigma A$$

TA

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi f_y A}{\gamma_{M1}}$$

SLU



Verifica - confronto

TA

$$N_{\max} = \frac{1}{\omega} \bar{\sigma} A$$

160

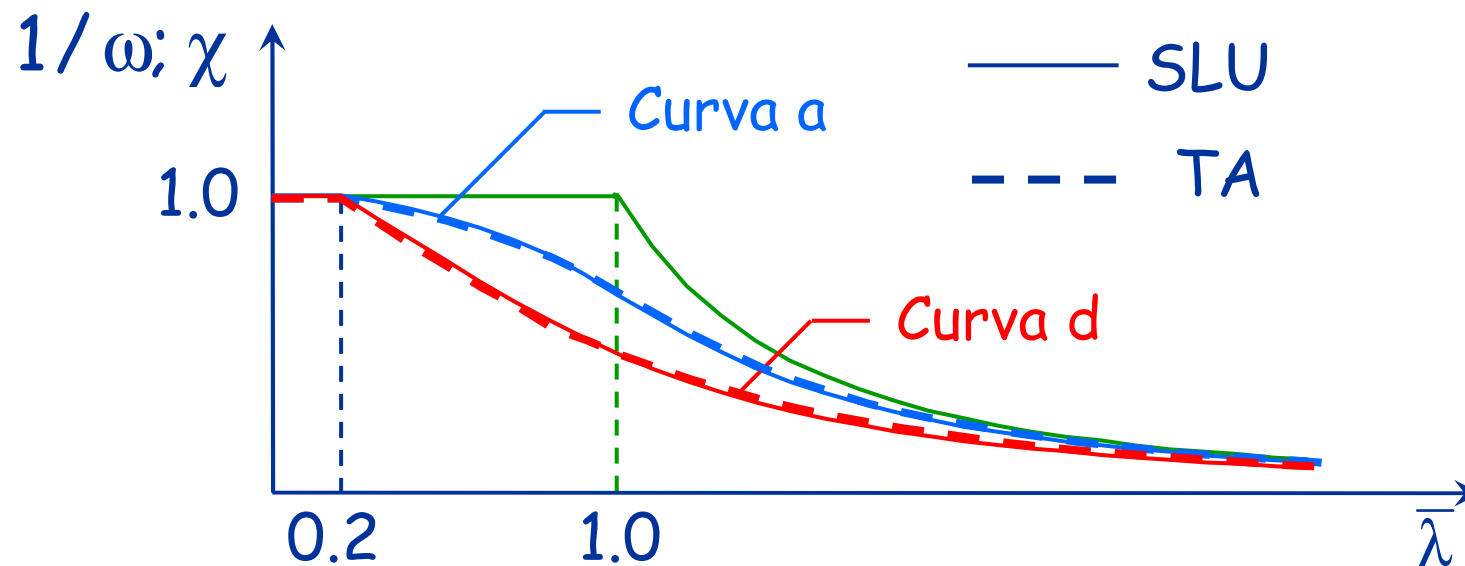
$$160 \times 1.4 = 224$$

SLU

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi f_y A}{\gamma_{M1}}$$

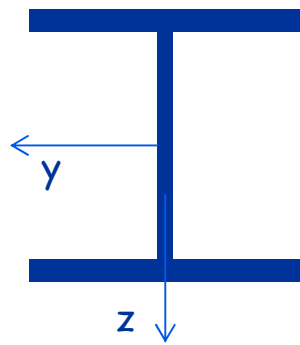
$$235 / 1.05 = 224$$

Acciaio Fe 360



Esempio

Dati:



HE 240 A



$$N_{Ed} = -1250 \text{ kN}$$

Acciaio S235

$$l_0 = 3.50 \text{ m}$$

(uguale nei due piani)

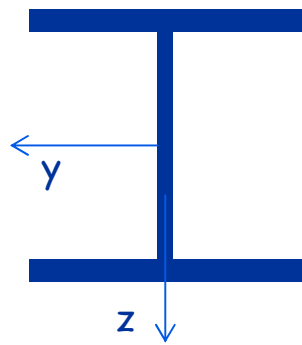
1 - Determinazione della snellezza

Piano di maggiore snellezza: xz

$$i_z = 60.0 \text{ mm}$$
$$\lambda = \frac{l_0}{i_z} = \frac{3500}{60} = 58.33$$
$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{58.33}{93.91} = 0.621$$

Esempio

Dati:



HE 240 A



$$N_{Ed} = -1250 \text{ kN}$$

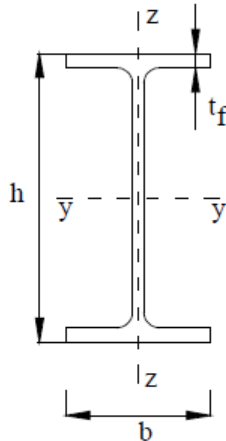
Acciaio S235

$$I_0 = 3.50 \text{ m}$$

(uguale nei due piani)

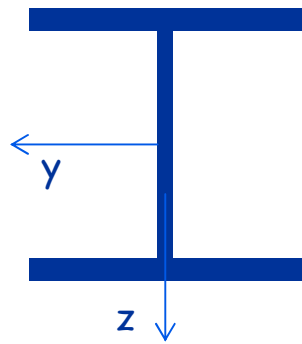
2 - Individuazione della curva di instabilità

Esempio

Sezione trasversale		Limiti	Inflessione intorno all'asse	Curva di instabilità		
				S235, S275, S355, S420	S460	
Sezioni laminate		h/b > 1,2	t_f ≤ 40 mm	y-y z-z	a b	a_0 a_0
			40 mm < t_f ≤ 100 mm	y-y z-z	b c	a a
		h/b ≤ 1,2	t_f ≤ 100 mm	y-y z-z	b c	a a
			t_f > 100 mm	y-y z-z	d d	c c

Esempio

Dati:



HE 240 A



$$N_{Ed} = -1250 \text{ kN}$$

Acciaio S235

$$I_0 = 3.50 \text{ m}$$

(uguale nei due piani)

2 - Individuazione della curva di instabilità

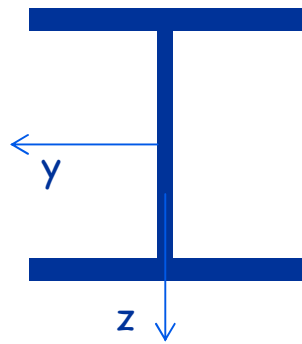
curva c

$$\alpha = 0.49$$

Curva di instabilità	a_0	a	b	c	d
Fattore di imperfezione α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Esempio

Dati:



HE 240 A



$$N_{Ed} = -1250 \text{ kN}$$

Acciaio S235

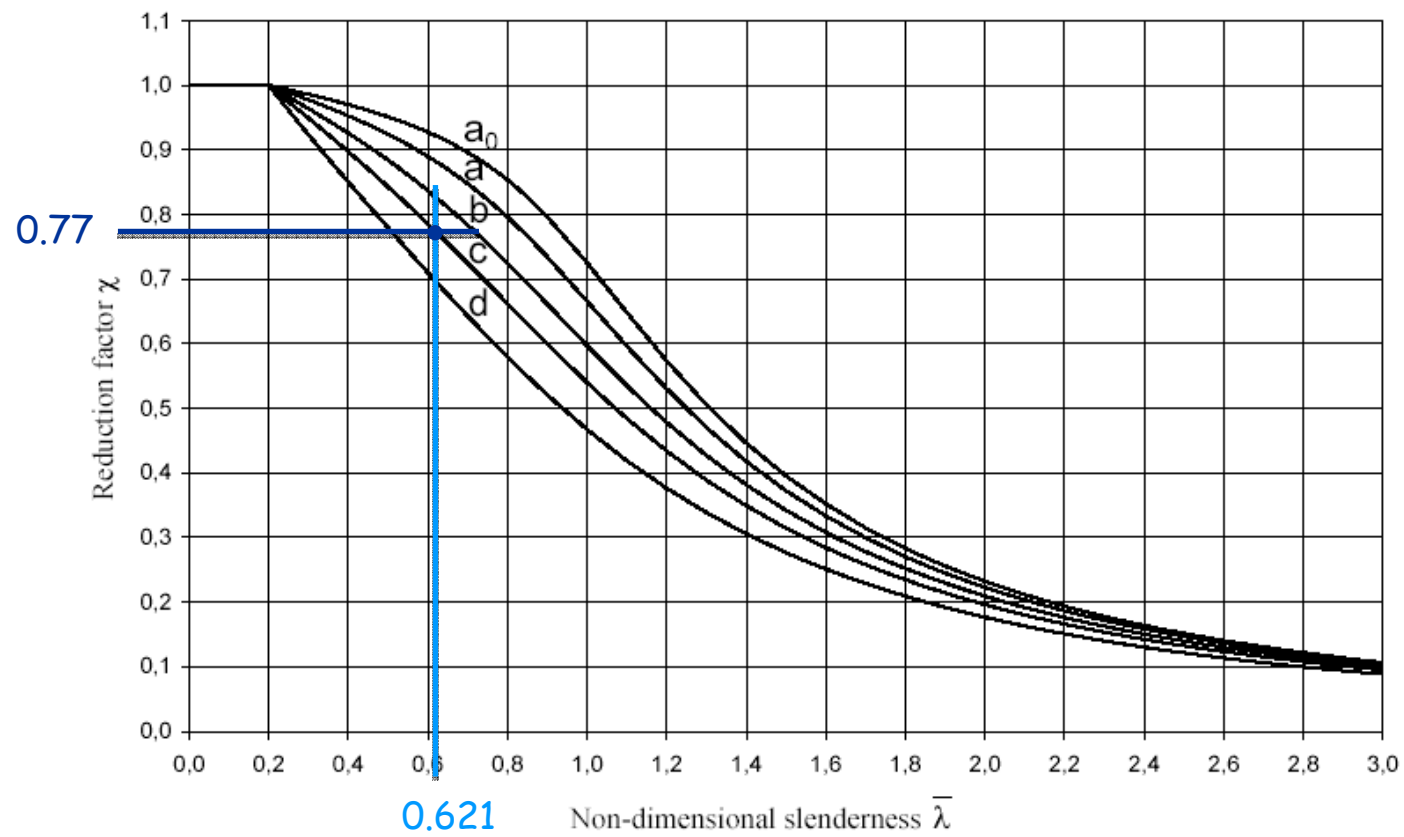
$$I_0 = 3.50 \text{ m}$$

(uguale nei due piani)

3 - Determinazione di χ

Esempio

- Graficamente



Esempio

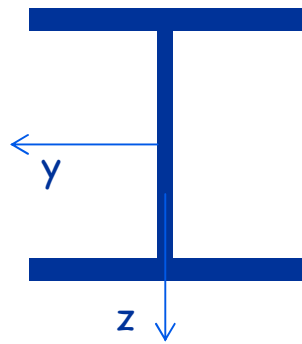
- Analiticamente

$$\Phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] = 0.7961$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0 = 0.7728$$

Esempio

Dati:



HE 240 A



$$N_{Ed} = -1250 \text{ kN}$$

Acciaio S235

$$I_0 = 3.50 \text{ m}$$

(uguale nei due piani)

3 - Determinazione di χ

$$\chi = 0.7728$$

$$|N_{Ed}| < N_{bRd}$$

La sezione è verificata

4 - Calcolo di N_{bRd}

$$N_{bRd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.7728 \times 76.84 \times 235}{1.05} \times 10^{-1} = 1329 \text{ kN}$$

Progetto - stato limite ultimo

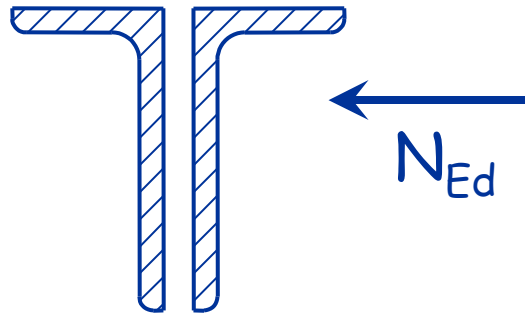
- 1 - Si assegna a χ un valore di tentativo e si ottiene la formula di progetto della sezione invertendo l'espressione di verifica

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{N_{Ed}}{\chi f_y / \gamma_{M1}}$$

- 2 - Si sceglie il profilato
(evitare snellezze $\lambda > 200$ per membrature principali e $\lambda > 250$ per membrature secondarie)
- 3 - Si calcola $N_{b,Rd}$ e si confronta con N_{Ed}
Se $N_{b,Rd} < N_{Ed}$ oppure se $N_{b,Rd}$ è molto più grande di N_{Ed} si itera il procedimento.

Esempio

Dati:



$$N_{Ed} = - 343 \text{ kN}$$

Acciaio S235

$$\lambda_1 = 93.0$$

$$L = l_0 = 1.80 \text{ m}$$

1 - Determinazione dell'area necessaria

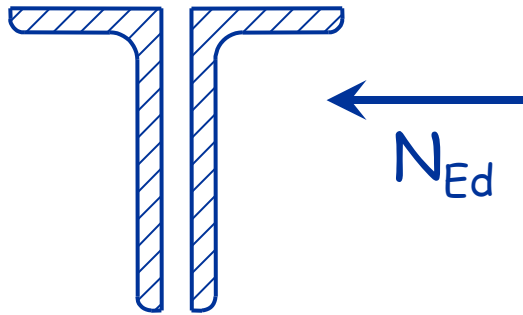
$$\chi = 0.6 \quad \Rightarrow \quad A = \frac{N_{Ed}}{\chi f_y / \gamma_{M1}} = \frac{342.9 \times 10^3}{0.6 \times 235 / 1.05} = 2554 \text{ mm}^2$$

2 - Scelta della sezione

Uso 2 L 60x120x8 $A = 2780 \text{ mm}^2$

Esempio

Dati:



$$N_{Ed} = - 343 \text{ kN}$$

Acciaio S235

$$\lambda_1 = 93.0$$

$$L = l_0 = 1.80 \text{ m}$$

3 - Calcolo di $N_{b,Rd}$

Coppia di profili

$$i_{cp} = 23.9 \text{ mm}$$

$$\lambda_{cp} = \frac{l_0}{i_{cp}} = \frac{1800}{23.9} = 75.3$$

Singolo profilo

$$i_{sp} = 15.9 \text{ mm}$$

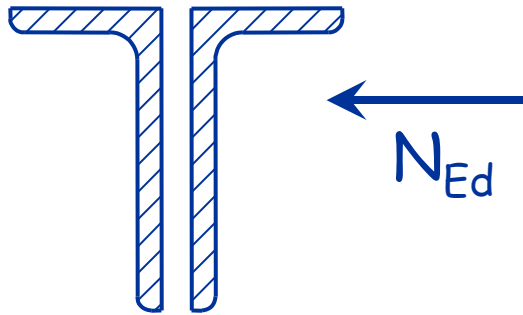
$$\lambda_{sp} = \frac{l_0 / 3}{i_{sp}} = \frac{600}{15.9} = 37.7$$

$$\lambda_{eq} = \sqrt{\lambda_{dp}^2 + \lambda_{sp}^2} = 84.2$$

$$\bar{\lambda}_{eq} = \frac{\bar{\lambda}_{eq}}{\lambda_1} = \frac{84.2}{93.0} = 0.91$$

Esempio

Dati:



$$N_{Ed} = - 343 \text{ kN}$$

Acciaio S235

$$\lambda_1 = 93.0$$

$$L = l_0 = 1.80 \text{ m}$$

3 - Calcolo di $N_{b,Rd}$

$$\bar{\lambda}_{eq} = 0.91$$

Curva b



$$\chi = 0.65$$

per profili a L (un tempo era curva c)

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi f_y A}{\gamma_{M1}} = \frac{0.65 \times 235 \times 2780}{1.05 \times 10^3} = 404.4 \text{ kN} \geq N_{Ed}$$