

### Progetto di aste e collegamenti in acciaio

3 - Sforzo normale centrato: trazione; compressione

Spoletto  
2-4 febbraio 2012  
Aurelio Ghersi

### Verifica e progetto di sezioni allo SLU

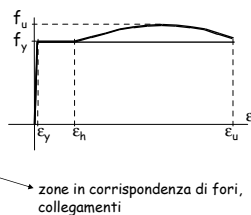
#### Criteri generali

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  $f_y$



#### 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  
resistenza di bulloni, saldature  $\gamma_{M2} = 1.25$
- resistenza di collegamenti ad attrito  
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)

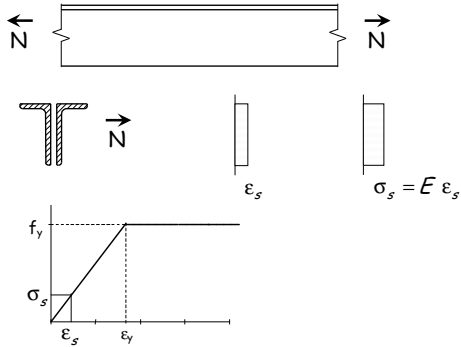
Le sezioni sono divise in 4 classi, in base a quanto l'instabilità locale ne condiziona il comportamento

- 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

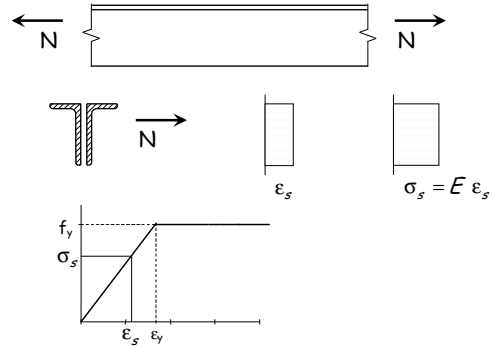
Verranno presentate in seguito

### Sforzo normale Trazione

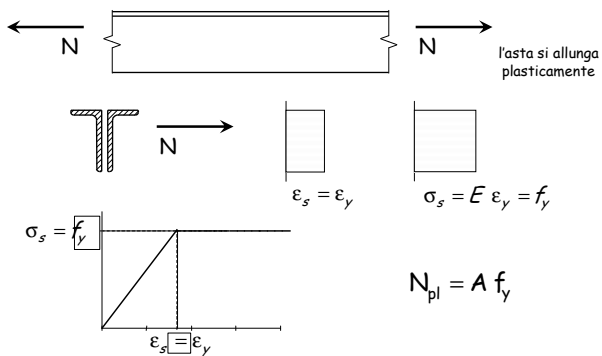
### Comportamento al crescere delle deformazioni



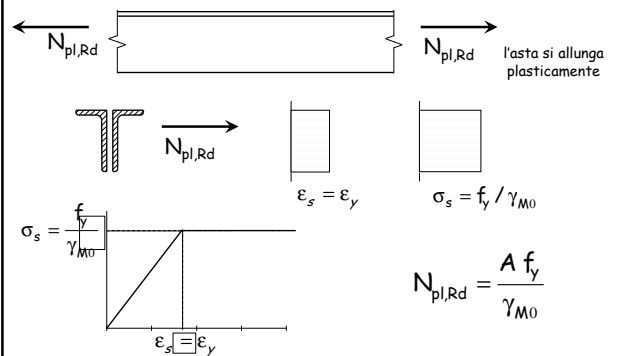
### Comportamento al crescere delle deformazioni



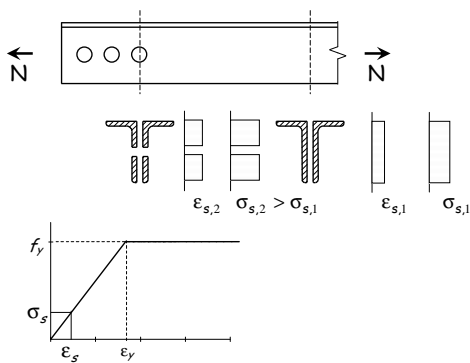
### Comportamento al crescere delle deformazioni



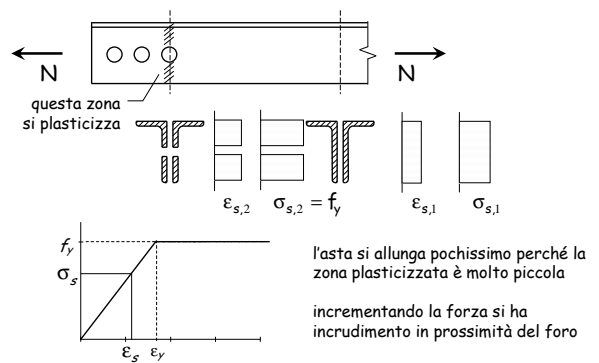
### Comportamento ultimo resistenza plastica della sezione



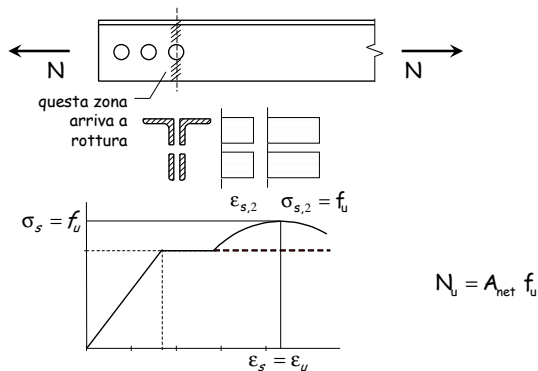
### Comportamento quando nell'asta vi sono dei fori



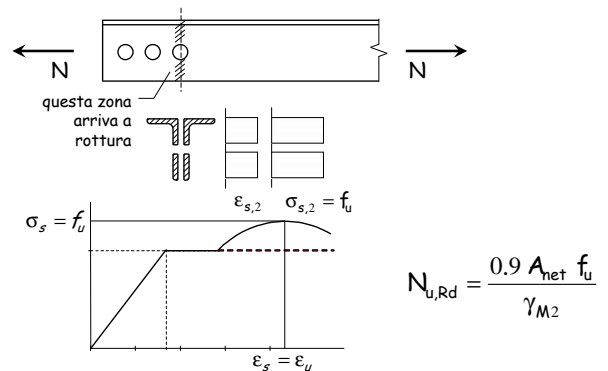
### Comportamento quando nell'asta vi sono dei fori



### Comportamento ultimo resistenza ultima della sezione forata



### Comportamento ultimo resistenza ultima della sezione forata



### Verifica - stato limite ultimo

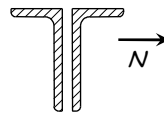
La resistenza a trazione di un'asta è pari al minore tra i valori della resistenza plastica della sezione piena e della resistenza ultima della sezione indebolita.

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

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

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

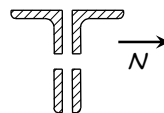
### Verifica - tensioni ammissibili



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

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

Inoltre, se l'asta presenta sezioni indebolite ....



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

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

NTC 08, punto 4.2.4.1.2

### 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

Acciaio S235 (Fe 360)

#### Sezione indebolita

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

160 x 1.4 = 224

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

0.9 x 360 / 1.25 = 259

### Verifica - confronto

#### Sezione piena

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

240

$240 \times 1.4 = 336$

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

355 / 1.05 = 338

Acciaio S355 (Fe 510)

#### Sezione indebolita

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

240 x 1.4 = 336

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

0.9 x 510 / 1.25 = 367

## Verifica - commento

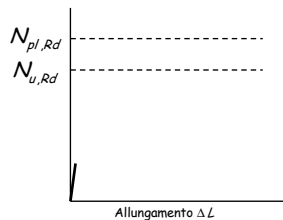
Tenendo conto delle differenze tra i carichi agenti, la resistenza a trazione valutata allo stato limite ultimo è:

- 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  $N_{u,Rd}$

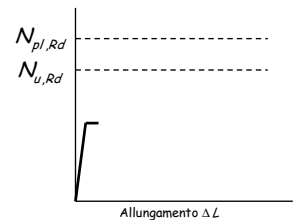
### Duttilità di aste tese: caso $N_{pl,Rd} > N_{u,Rd}$



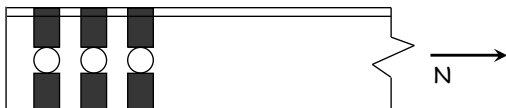
### Duttilità di aste tese: caso $N_{pl,Rd} > N_{u,Rd}$



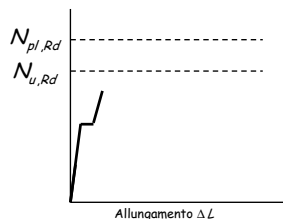
- Plasticizzazione delle sezioni indebolite



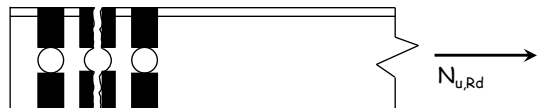
### Duttilità di aste tese: caso $N_{pl,Rd} > N_{u,Rd}$



- Plasticizzazione delle sezioni indebolite
- Incrudimento delle sezioni indebolite

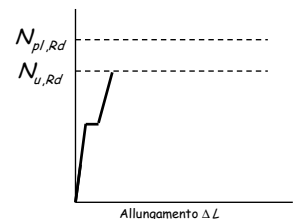


### Duttilità di aste tese: caso $N_{pl,Rd} > N_{u,Rd}$

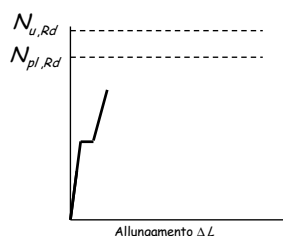


- Plasticizzazione delle sezioni indebolite
- Incrudimento delle sezioni indebolite
- Rottura della sezione più debole

L'asta è fragile



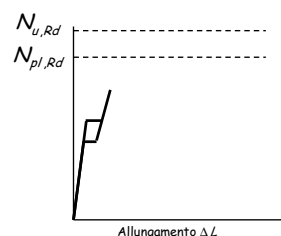
### Duttilità di aste tese: caso $N_{pl,Rd} < N_{u,Rd}$



### Duttilità di aste tese: caso $N_{pl,Rd} < N_{u,Rd}$



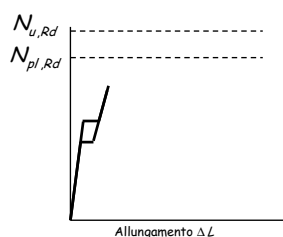
- Plasticizzazione delle sezioni indebolite



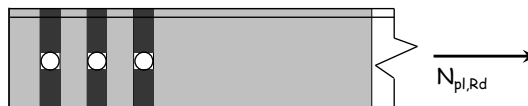
### Duttilità di aste tese: caso $N_{pl,Rd} < N_{u,Rd}$



- Plasticizzazione delle sezioni indebolite
- Incrudimento delle sezioni indebolite

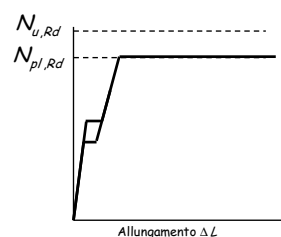


### Duttilità di aste tese: caso $N_{pl,Rd} < N_{u,Rd}$



- Plasticizzazione delle sezioni indebolite
- Incrudimento delle sezioni indebolite
- Plasticizzazione della sezione piena

L'asta è duttile



## Duttilità

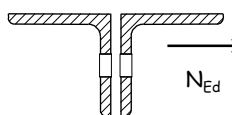
Il comportamento dell'asta (con fori) dipende da chi è più grande tra  $N_{pl,Rd}$  e  $N_{u,Rd}$

- 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:



2 L 65x7

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

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

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

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

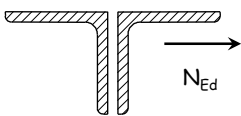
- Si sceglie il profilato.

- 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

- Determinazione dell'area necessaria.

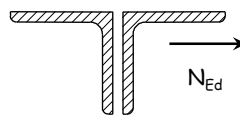
$$A = \frac{\gamma_{M0} N_{Ed}}{f_y} = \frac{339.9 \times 10^3}{235/1.05} = 1518 \text{ mm}^2$$

- 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

- Verifica della sezione indebolita.

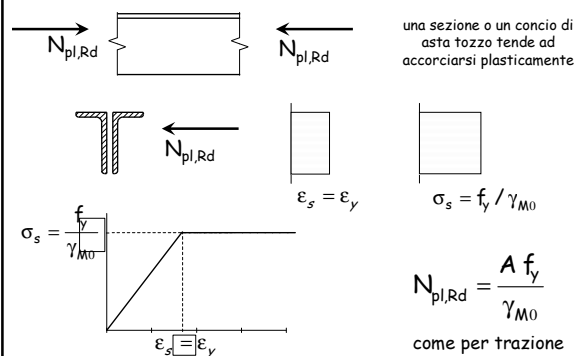
$$A_{net} = A - A_{foro} = 1740 - 2 \times 15 \times 7 = 1530 \text{ mm}^2$$

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

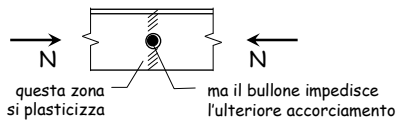
Anche la sezione indebolita è verificata

Sforzo normale  
 Compressione

### Comportamento ultimo resistenza plastica della sezione

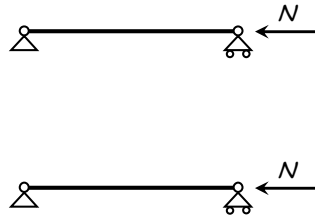


### Comportamento quando vi sono dei fori

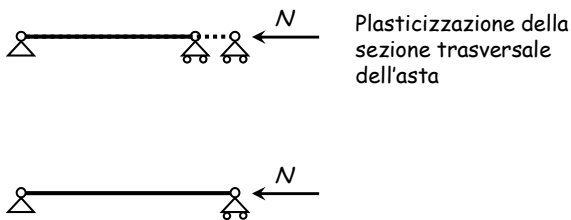


- Una sezione, o un'asta tozza, compressa hanno la stessa resistenza di una sezione compressa
  - La presenza di fori (che contengono bulloni) non inficia la resistenza
- ... ma questo vale solo per la sezione, o per un elemento tozzo, non per le aste usuali

### Modalità di collasso di aste compresse

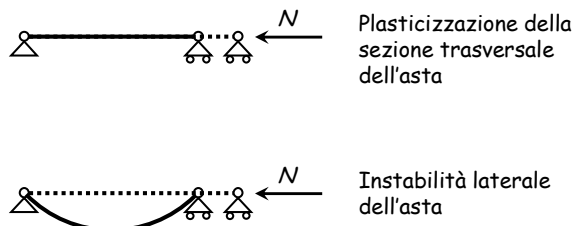


### Modalità di collasso di aste compresse



Plasticizzazione della sezione trasversale dell'asta

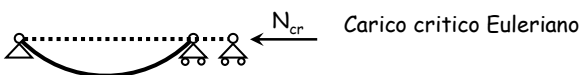
### Modalità di collasso di aste compresse



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:

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

$\lambda$  = snellezza dell'asta  $\lambda = \frac{l_0}{i}$   
 $i$  = raggio d'inerzia della sezione

### Comportamento ultimo di un'asta ideale

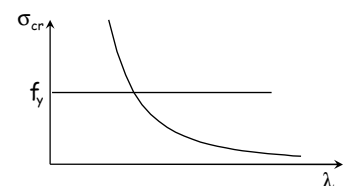
$$\sigma = \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

Instabilità dell'asta

inoltre

$$\sigma = f_y$$

Collasso plastico



## Verifica di un'asta ideale

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

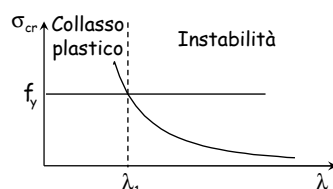
Instabilità dell'asta

inoltre

$$\sigma = f_y$$

Collasso plastico

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



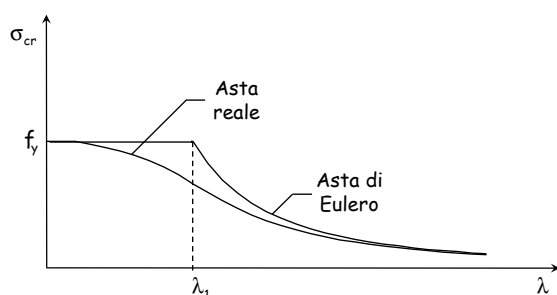
## Aste reali

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.

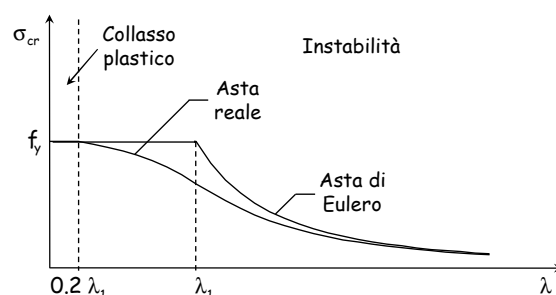
## Comportamento delle aste reali

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



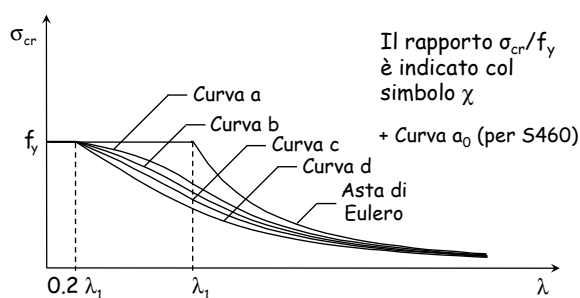
## Comportamento delle aste reali

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



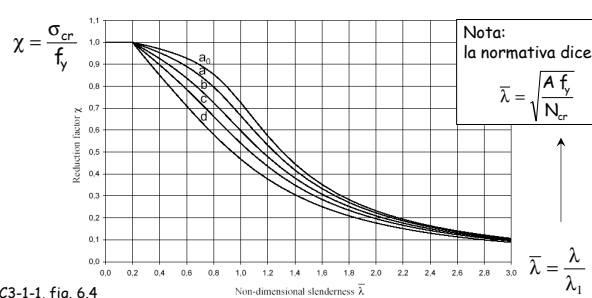
## Comportamento delle aste reali

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





## Comportamento delle aste reali

Vengono fornite anche formule per calcolare  $\chi$

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

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

Curva di instabilità	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Fattore di imperfezione $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

NTC08, punto 4.2.4.1.3 - EC3-1-1, punto 6.3.1

## Comportamento delle aste reali

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

Tipo di sezione	Limiti	Asse di inflessione	Curva di stabilità per:	
			S235 S275 S355 S420	S460
Sezioni laminate		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	x-x	a
			y-y	b
	$h/b > 1.2$	$t_f > 40 \text{ mm}$	x-x	b
			y-y	c
	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	$h/b \leq 1.2$	x-x	b
			y-y	c
Sez. ad I saldate		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	x-x	b
			y-y	c
	$t_f > 40 \text{ mm}$		x-x	c
			y-y	d

## Comportamento delle aste reali

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

Tipo di sezione	Limiti	Asse di inflessione	Curva di stabilità per:	
			S235 S275 S355 S420	S460
Sez. curve		formata a caldo	qualunque	a
		formata a freddo	qualunque	c
Sez. sez. saldate		in generale	qualunque	b
		saldate con $a > 0.5 t_f$ $b/t_f < 30$ ; $h/t_w < 30$	qualunque	c

## Comportamento delle aste reali

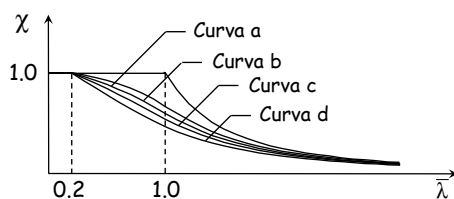
- Le imperfezioni (e quindi la scelta tra le curve) dipende dalla forma del profilo

Tipo di sezione	Limiti	Asse di inflessione	Curva di stabilità per:	
			S235 S275 S355 S420	S460
Sez. piene, ad L e T		qualunque	c	c
Sezioni ad L		qualunque	b	b

## Verifica - stato limite ultimo

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

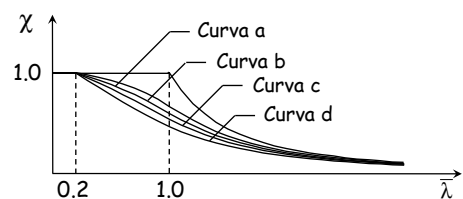
$$\chi = \frac{\sigma_{cr}}{f_y} \leq 1 \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$



## Verifica - stato limite ultimo

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{Resistenza all'instabilità}$$

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

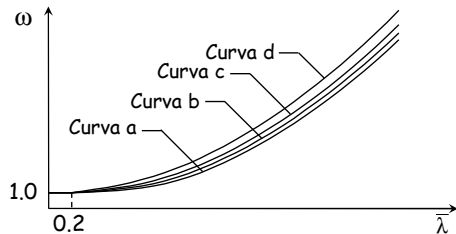


NTC 08, punto 4.2.4.1.3.1

### Verifica - tensioni ammissibili

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

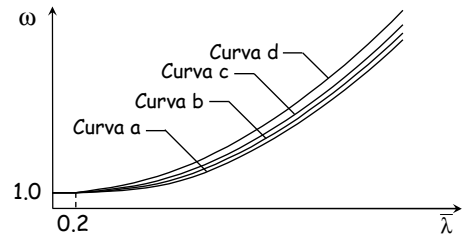
$$\omega = \frac{f_y}{\sigma_{cr}} \geq 1 \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1}$$



### Verifica - tensioni ammissibili

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \sigma_{cr} \leq \frac{\sigma_{cr}}{f_y} f_y \leq \frac{f_y}{\omega} \quad \text{Applicando il coefficiente di sicurezza a } f_y \dots$$

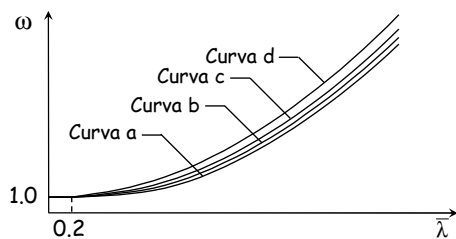
$$\omega = \frac{f_y}{\sigma_{cr}} \geq 1 \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad \sigma = \omega \frac{N}{A} \leq \bar{\sigma}$$



### Verifica - tensioni ammissibili

$$N_{max} = \frac{1}{\omega} \bar{\sigma} A \quad \text{Sforzo normale ammissibile}$$

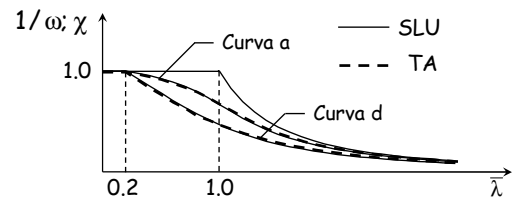
$$N \leq N_{max}$$



### Verifica - confronto

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

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



### Verifica - confronto

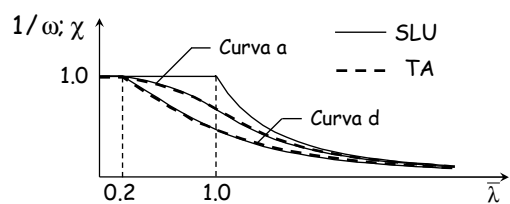
$$N_{max} = \frac{1}{\omega} \bar{\sigma} A \quad \text{TA}$$

$$160 \times 1.4 = 224$$

Acciaio S235 (Fe 360)

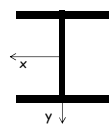
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi f_y A}{\gamma_{M1}} \quad \text{SLU}$$

$$235 / 1.05 = 224$$



### 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

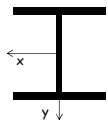
Piano di maggiore snellezza: xz

$$i_y = 60.0 \text{ mm} \quad \lambda = \frac{l_0}{i_y} = \frac{3500}{60} = 58.33$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{58.33}{93.91} = 0.621$$

### Esempio

Dati:



HE 240 A

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

Acciaio S235

$l_0 = 3.50 \text{ m}$   
(uguale nei due piani)

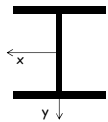
#### 2 - Individuazione della curva di instabilità

### Esempio

Tipo di sezione		Limiti	Asse di inflessione	Curva di stabilità per:		
				S235 S275 S355 S420	S460	
Sezioni laminate		$h/b > 1.2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	x - x	a	a <sub>0</sub>
				y - y	b	a <sub>0</sub>
		$t_f > 40 \text{ mm}$	x - x	b	a	
			y - y	c	a	
		$h/b \leq 1.2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	x - x	b	a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y - y	d	c
Sez. ad I saldate		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	x - x	b	b	
			y - y	c	c	
		$t_f > 40 \text{ mm}$	x - x	c	c	
			y - y	d	d	

### Esempio

Dati:



HE 240 A

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

Acciaio S235

$l_0 = 3.50 \text{ m}$   
(uguale nei due piani)

#### 2 - Individuazione della curva di instabilità

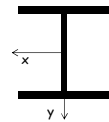
curva c

$\alpha = 0.49$

Curva di instabilità	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Fattore di imperfezione $\alpha$	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

### Esempio

Dati:



HE 240 A

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

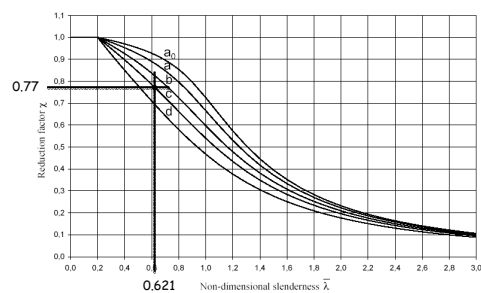
Acciaio S235

$l_0 = 3.50 \text{ m}$   
(uguale nei due piani)

#### 3 - Determinazione di $\chi$

### Esempio

#### • Graficamente



### Esempio

#### • Analiticamente

$\bar{\lambda} = 0.621$

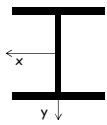
$\alpha = 0.49$

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

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

### Esempio

Dati:



HE 240 A

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

Acciaio S235

$l_0 = 3.50 \text{ m}$   
(uguale nei due piani)

3 - Determinazione di  $\chi$

$$\chi = 0.7728$$

$$|N_{Ed}| < N_{b,Rd}$$

La sezione è verificata

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

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

### Progetto - stato limite ultimo

1 - Si assegna a  $\chi$  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

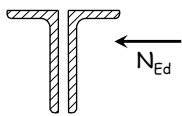
(evitare snellezze  $\lambda > 200$  per membrature principali e  $\lambda > 250$  per membrature secondarie)

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

$\lambda_1 = 93.9$

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

1 - Determinazione dell'area necessaria

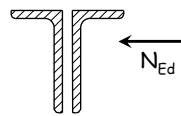
$$\chi = 0.6 \quad \Rightarrow \quad A = \frac{N_{Ed}}{\chi f_y / \gamma_{M1}} = \frac{342.9 \times 10^3}{0.6 \times 235 / 1.05} = 2554 \text{ mm}^2$$

2 - Scelta della sezione

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

### Esempio

Dati:



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

Acciaio S235

$\lambda_1 = 93.9$

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

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

Coppia di profili  $i_{cp} = 23.9 \text{ mm} \quad \lambda_{cp} = \frac{l_0}{i_{cp}} = \frac{1800}{23.9} = 75.3$

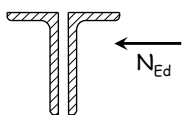
Singolo profilo  $i_{sp} = 12.7 \text{ mm} \quad \lambda_{sp} = \frac{l_0/3}{i_{sp}} = \frac{600}{12.7} = 47.2$

$$\lambda_{eq} = \sqrt{\lambda_{cp}^2 + \lambda_{sp}^2} = 88.9$$

$$\bar{\lambda}_{eq} = \frac{\lambda_{eq}}{\lambda_1} = \frac{88.9}{93.9} = 0.95$$

### Esempio

Dati:



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

Acciaio S235

$\lambda_1 = 93.9$

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

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

$$\bar{\lambda}_{eq} = 0.95$$

$$\chi = 0.63$$

Curva b

per profili a L (un tempo era curva c)

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi f_y A}{\gamma_{M1}} = \frac{0.63 \times 235 \times 2780}{1.05 \times 10^3} = 392.6 \text{ kN} \geq N_{Ed}$$