

# Corso di aggiornamento

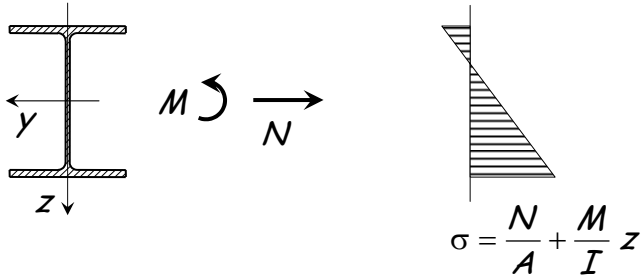
## Progetto e verifica di sezioni in acciaio e di collegamenti secondo l'Eurocodice 3

Teramo, 10 febbraio 2007

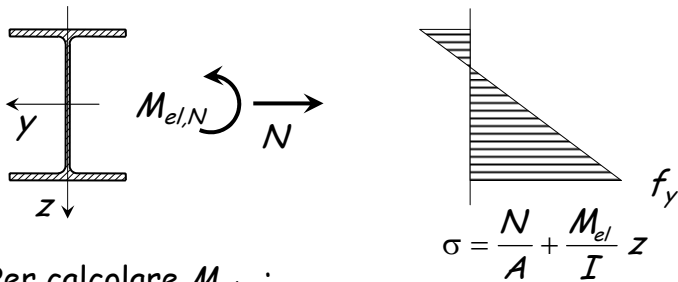
Aurelio Ghersi e Edoardo M. Marino

## Tenso - Flessione

## Comportamento ultimo



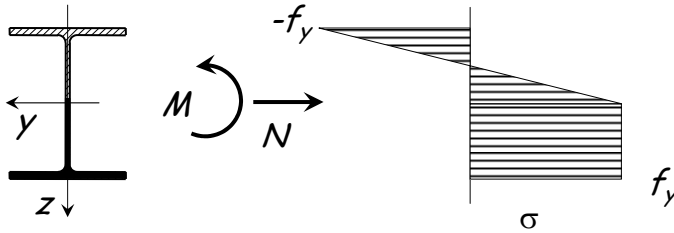
## Comportamento ultimo



Per calcolare  $M_{el,N}$ :

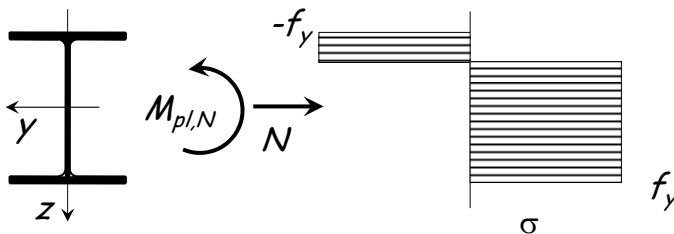
$$f_y = \frac{N}{A} + \frac{M_{el,N}}{W_{el}} \quad \Rightarrow \quad M_{el,N} = \left( f_y - \frac{N}{A} \right) W_{el}$$

## Comportamento ultimo



Incrementando il momento flettente le deformazioni plastiche si propagano fino alla completa plasticizzazione della sezione

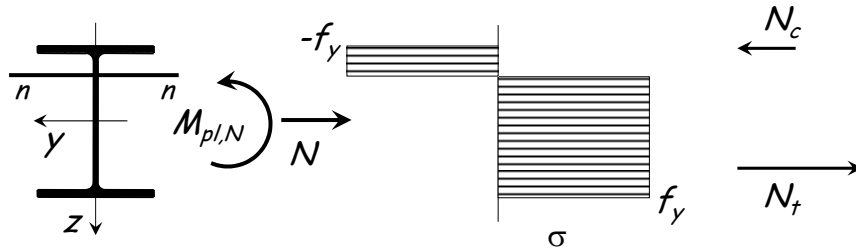
## Comportamento ultimo



Per calcolare  $M_{pl,N}$ :

- 1 - Bisogna prima determinare la posizione dell'asse neutro;
- 2 - Imponendo l'equilibrio alla rotazione rispetto all'asse baricentrico si determina  $M_{pl,N}$

## Comportamento ultimo



### 1 - Determinazione dell'asse neutro

$$N_c + N_t = N$$

(equilibrio alla traslazione)

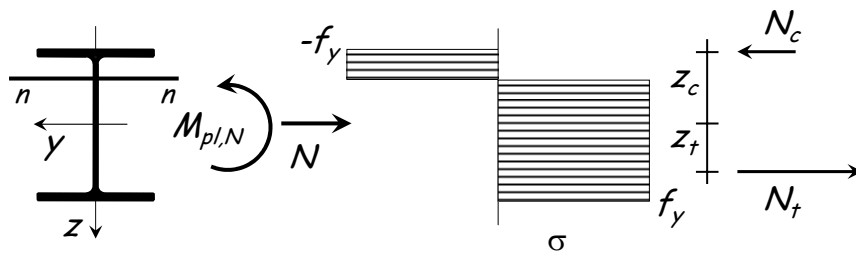


Asse neutro

$$N_c = -f_y A_c$$

$$N_t = f_y A_t$$

## Comportamento ultimo



### 2 - Calcolo di $M_{pl,N}$

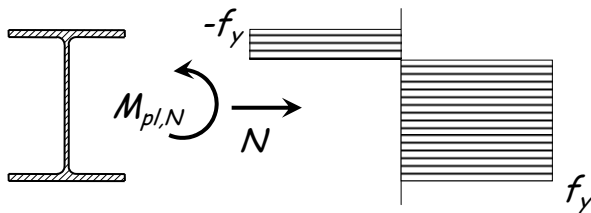
$$M_{pl,N} = N_t z_t - N_c z_c = f_y (A_t z_t - A_c z_c)$$

$$N_c = -f_y A_c$$

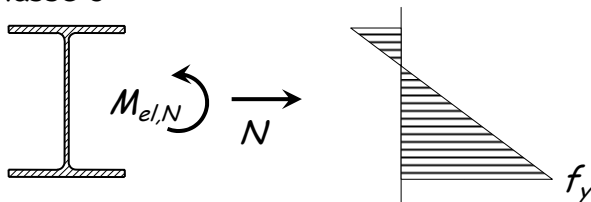
$$N_t = f_y A_t$$

## Verifica - stato limite ultimo

Classe 1 e 2

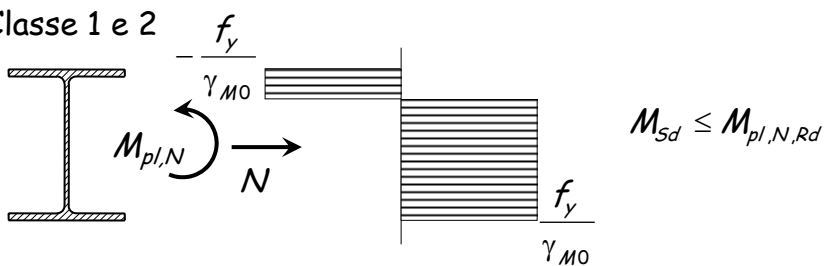


Classe 3

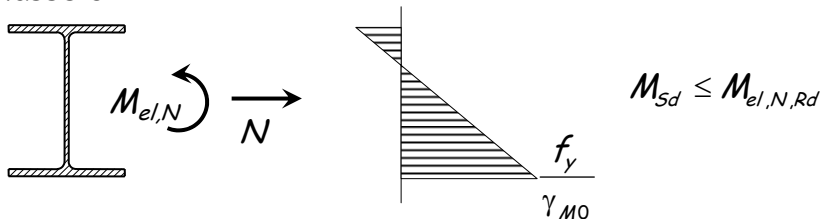


## Verifica - stato limite ultimo

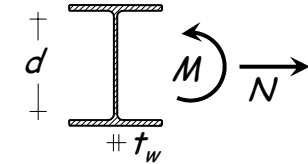
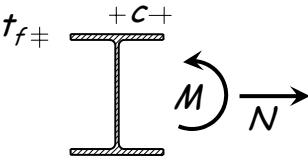
Classe 1 e 2



Classe 3

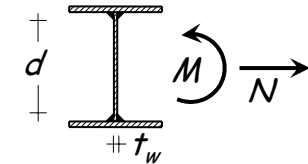
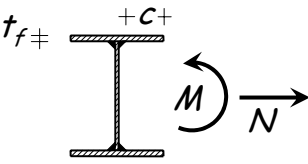


## Classificazione delle sezioni Profili laminati a doppio T

Anima	Classe	Limite
	1	Varia in funzione dell'asse neutro
	2	
	3	
	4	
Flangia	Classe	Limite
	1	$c / t_f \leq 10 \varepsilon$
	2	$c / t_f \leq 11 \varepsilon$
	3	$c / t_f \leq 15 \varepsilon$
	4	$c / t_f > 15 \varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$$

## Classificazione delle sezioni Profili saldati a doppio T

Anima	Classe	Limite
	1	Varia in funzione dell'asse neutro
	2	
	3	
	4	
Flangia	Classe	Limite
	1	$c / t_f \leq 9 \varepsilon$
	2	$c / t_f \leq 10 \varepsilon$
	3	$c / t_f \leq 14 \varepsilon$
	4	$c / t_f > 15 \varepsilon$

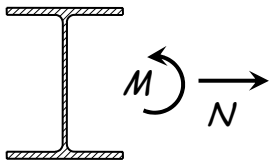
$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$$

## Domini di resistenza - stato limite ultimo

Dominio di resistenza, o curva di interazione = insieme delle coppie M-N per cui si ottiene lo stato limite ultimo della sezione

Per ricavare una coppia M-N del dominio

Sezione



Si assegna N

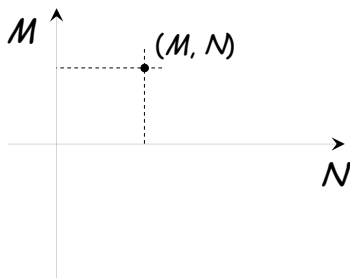
Si determina la posizione dell'asse neutro

Si determina M ( $M_{pl,N}$  o  $M_{el,N}$ )

## Domini di resistenza - stato limite ultimo

Dominio di resistenza, o curva di interazione = insieme delle coppie M-N per cui si ottiene lo stato limite ultimo della sezione

Per ricavare una coppia M-N del dominio



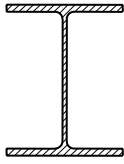
Si assegna N

Si determina l'asse neutro

Si determina M ( $M_{pl,N}$  o  $M_{el,N}$ )

e si riporta la coppia M - N nel diagramma

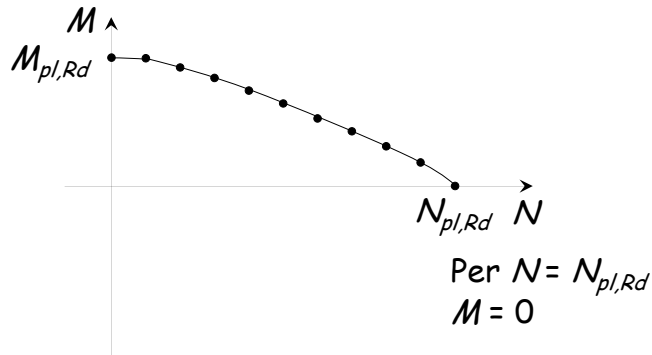
## Domini di resistenza - stato limite ultimo per sezioni di classe 1 e 2



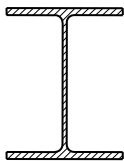
Per  $N = 0$   
 $M = M_{pl,Rd}$

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

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

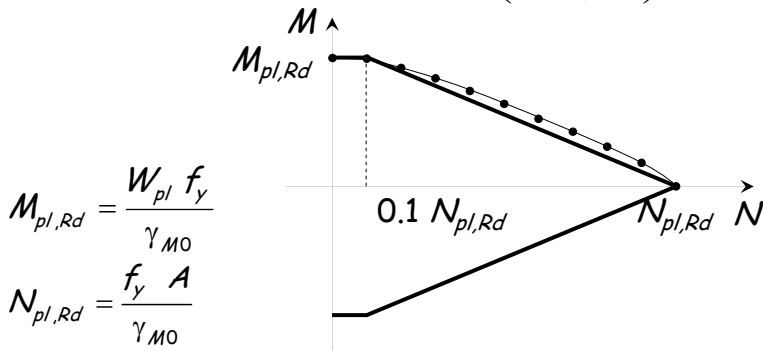


## Domini di resistenza - stato limite ultimo per sezioni di classe 1 e 2



$$M_{pl,N,Rd} = M_{pl,Rd} \quad N \leq 0.1 N_{pl,Rd}$$

$$M_{pl,N,Rd} = 1.11 M_{pl,Rd} \left( 1 - \frac{N}{N_{pl,Rd}} \right) \quad N > 0.1 N_{pl,Rd}$$

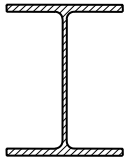


$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$$

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



## Domini di resistenza - stato limite ultimo per sezioni di classe 1 e 2



$$M_{pl,N,Rd} = M_{pl,Rd} \quad N \leq 0.1 N_{pl,Rd}$$

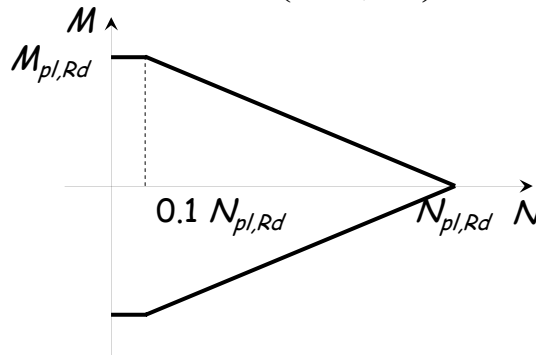
$$N \leq 0.1 N_{pl,Rd}$$

$$M_{pl,N,Rd} = 1.11 M_{pl,Rd} \left( 1 - \frac{N}{N_{pl,Rd}} \right) \quad N > 0.1 N_{pl,Rd}$$

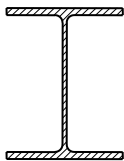
$$N > 0.1 N_{pl,Rd}$$

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

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



## Domini di resistenza - stato limite ultimo per sezioni di classe 3

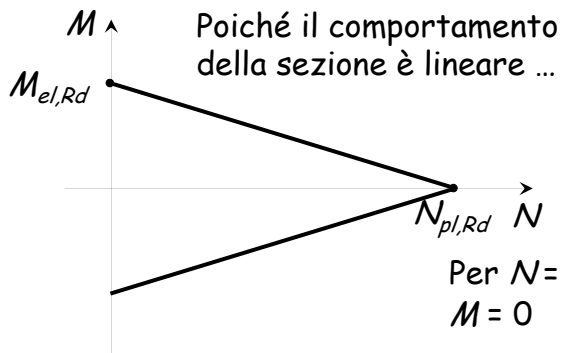


$$M_{el,N,Rd} = M_{el,Rd} \left( 1 - \frac{N}{N_{pl,Rd}} \right)$$

Per  $N = 0$   
 $M = M_{el,Rd}$

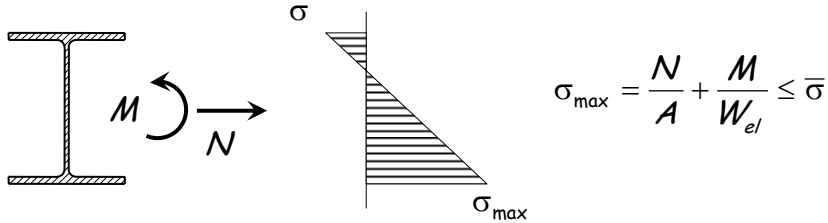
$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}}$$

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

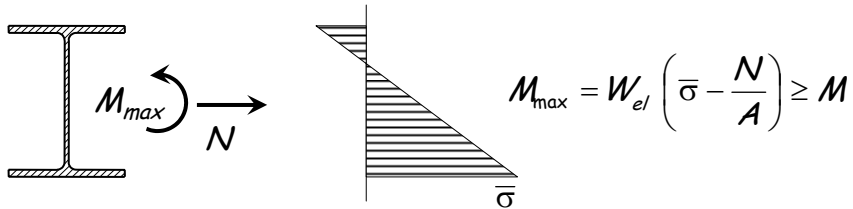


Per  $N = N_{pl,Rd}$   
 $M = 0$

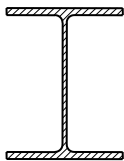
## Verifica - tensioni ammissibili



oppure



## Domini di resistenza - tensioni ammissibili

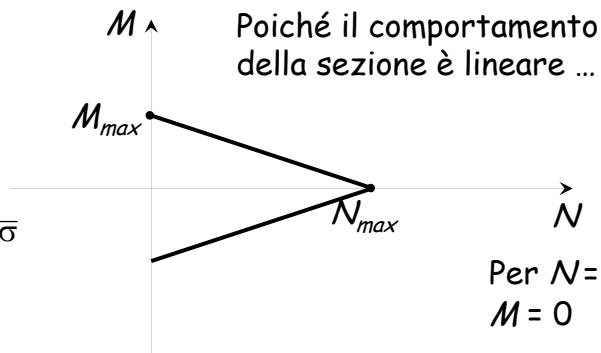


$$M_{\max} = M_{\max} \left( 1 - \frac{N}{N_{\max}} \right)$$

Per  $N = 0$   
 $M = M_{\max}$

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

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

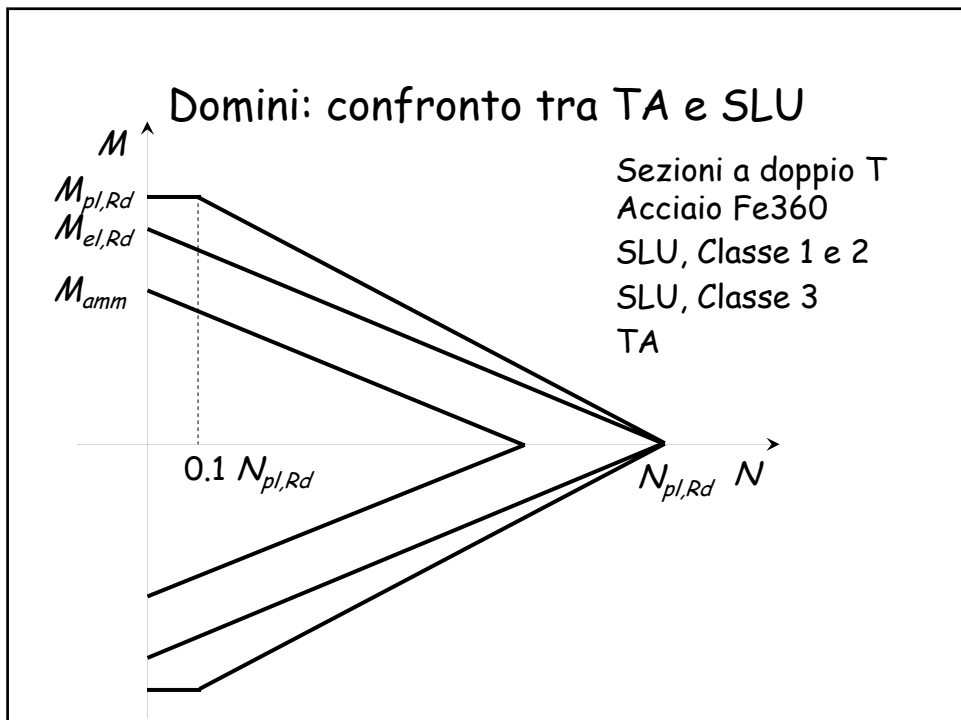


Per  $N = N_{\max}$   
 $M = 0$

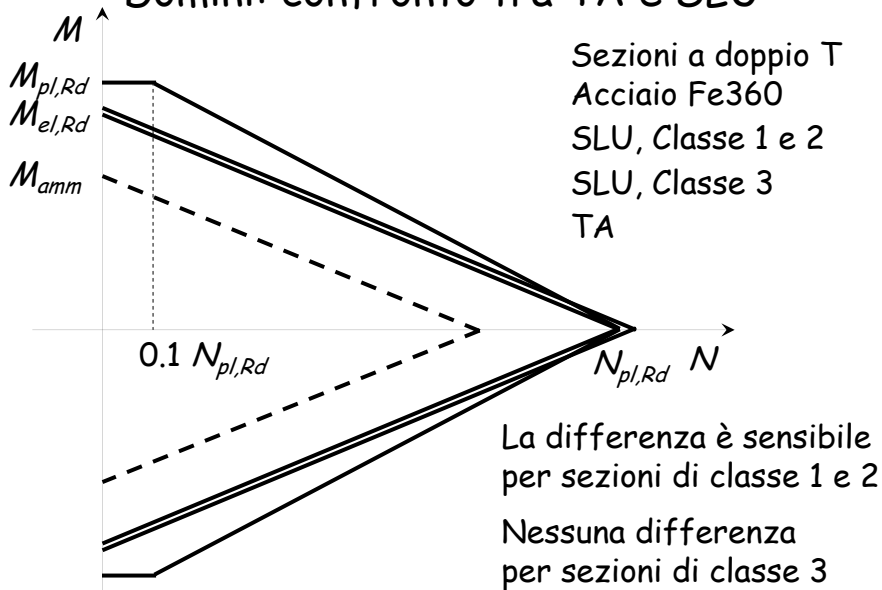
## Domini: confronto tra TA e SLU

Il confronto può essere effettuato sovrapponendo i domini ricavati per TA e SLU

Poiché i carichi allo SLU sono maggiori (di  $1.4 \div 1.5$ ) di quelli alle TA, il dominio relativo alle TA deve essere opportunamente scalato (ad esempio  $\times 1,45$ )

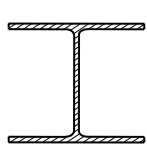


## Domini: confronto tra TA e SLU



## Esempio

Dati:



Sezione	HEB300
$A$	$149 \text{ cm}^2$
$W_{pl}$	$1868 \text{ cm}^3$
Acciaio	Fe360

1 - Classe della sezione

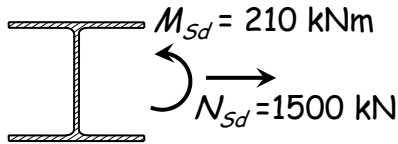
Anima:  $\frac{d}{t_w} = \frac{208}{11} = 19 \leq 144 \quad \varepsilon = 144$

Flangia:  $\frac{c}{t_f} = \frac{150}{19} = 7.9 \leq 10 \quad \varepsilon = 10$

La sezione appartiene alla classe 1.

## Esempio

Dati:



Sezione	HEB300
$A$	$149 \text{ cm}^2$
$W_{pl}$	$1868 \text{ cm}^3$
Acciaio	Fe360

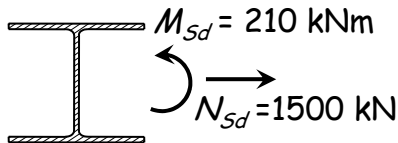
2 - Determinazione di  $N_{pl,Rd}$  ed  $M_{pl,Rd}$

$$N_{pl,Rd} = \frac{f_y A}{\gamma_{M0}} = \frac{235 \times 149}{1.05 \times 10} = 3334.8 \text{ kN}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{f_y W_{pl}}{\gamma_{M0}} = \frac{235 \times 1868}{1.05 \times 10^3} = 418.1 \text{ kNm}$$

## Esempio

Dati:



Sezione	HEB300
Acciaio	Fe360
$N_{pl,Rd}$	3334.8 kN
$M_{pl,Rd}$	418.1 kNm

3 - Determinazione di  $M_{pl,N,Rd}$  e verifica

$$N_{Sd} = 1500 \text{ kN} \geq 0.1 N_{pl,Rd} = 333.5 \text{ kN}$$

$$M_{pl,N,Rd} = 1.11 M_{pl,Rd} \left( 1 - \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} \right) = 255.3 \text{ kNm} > M_{Sd} = 210.0 \text{ kNm}$$

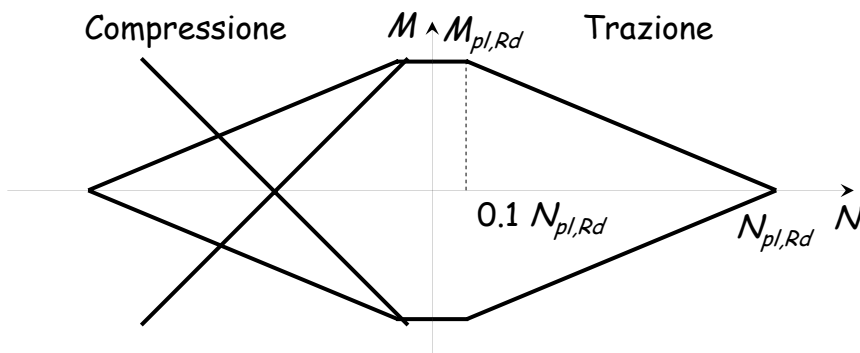
La sezione è verificata

## Presso - Flessione

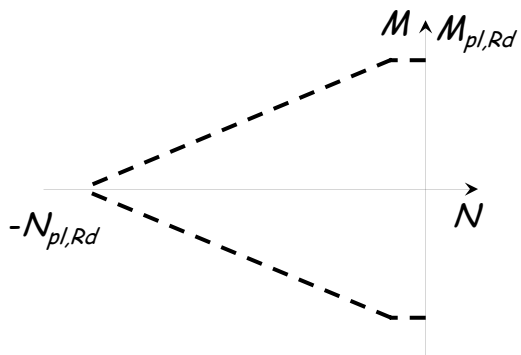
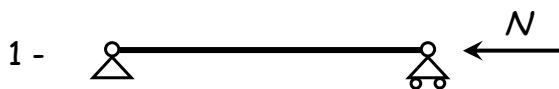
### Domini di resistenza - stato limite ultimo

Si possono ottenere semplicemente ribaltando il dominio M-N costruito nel caso di tenso-flessione?

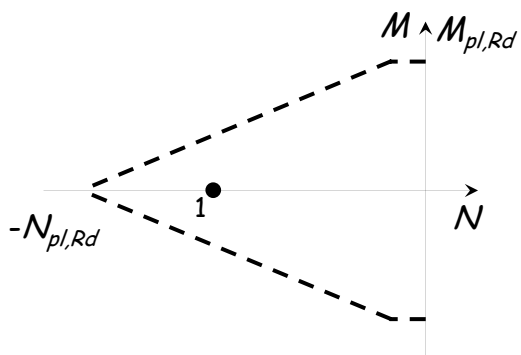
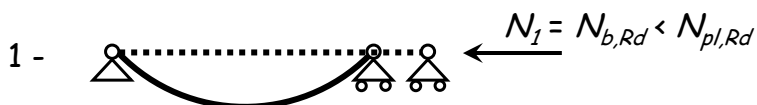
Va bene per la singola sezione, ma per l'asta bisogna tener conto dell'instabilità



## Domini di resistenza - stato limite ultimo

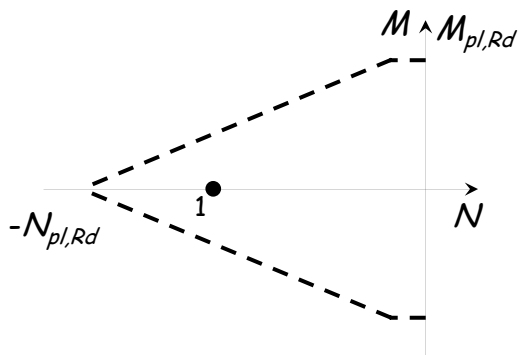
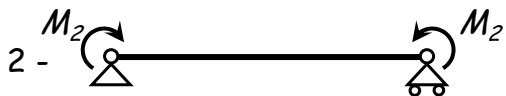


## Domini di resistenza - stato limite ultimo



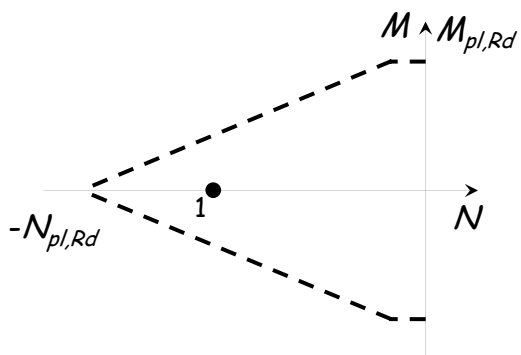
$$1 - N_1 = N_{b,Rd}, M_1 = 0$$

## Domini di resistenza - stato limite ultimo



$$1 - N_1 = N_{b,Rd}, M_1 = 0$$

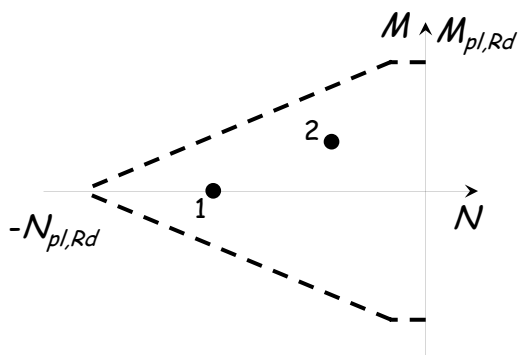
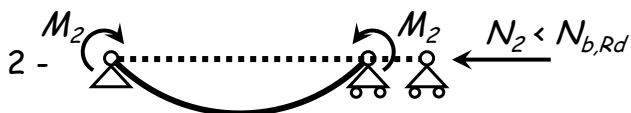
## Domini di resistenza - stato limite ultimo



$$1 - N_1 = N_{b,Rd}, M_1 = 0$$



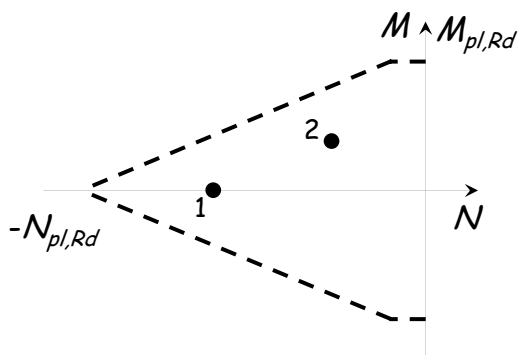
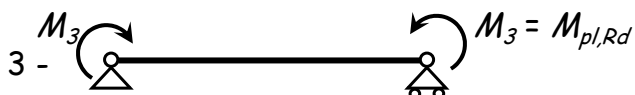
## Domini di resistenza - stato limite ultimo



$$1 - N_1 = N_{b,Rd}, M_1 = 0$$

$$2 - N_2 < N_{b,Rd}, M_2 < M_{pl,Rd}$$

## Domini di resistenza - stato limite ultimo



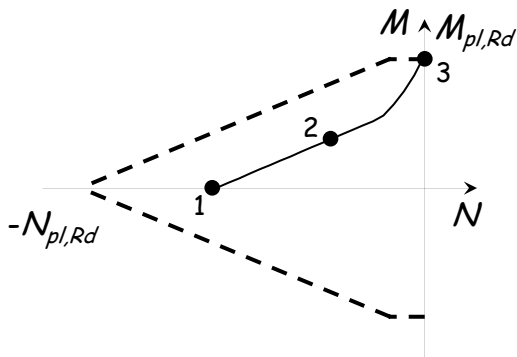
$$1 - N_1 = N_{b,Rd}, M_1 = 0$$

$$2 - N_2 < N_{b,Rd}, M_2 < M_{pl,Rd}$$

## Domini di resistenza - stato limite ultimo



L'asta si plasticizza e  
collassa in assenza di  
sforzo normale



$$1 - N_1 = N_{b,Rd}, M_1 = 0$$

$$2 - N_2 < N_{b,Rd}, M_2 < M_{pl,Rd}$$

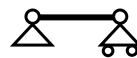
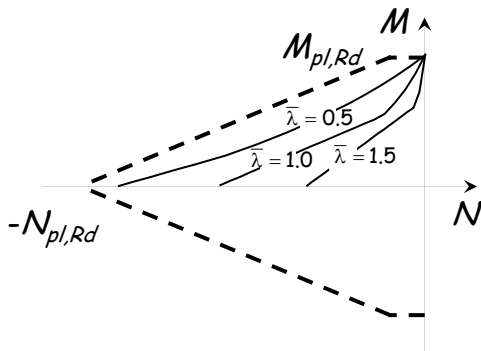
$$3 - N_3 = 0, M_3 = M_{pl,Rd}$$

Collegando i punti si  
ottiene il dominio

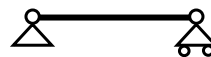
## Domini di resistenza - stato limite ultimo

Il dominio dipende dalla snellezza dell'asta:

- L'ampiezza del dominio si riduce all'aumentare della snellezza;



$$\bar{\lambda} = 0.5$$



$$\bar{\lambda} = 1.0$$

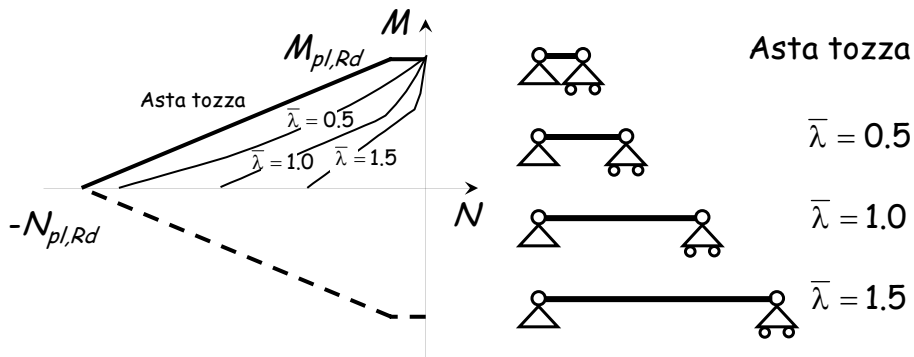


$$\bar{\lambda} = 1.5$$

## Domini di resistenza - stato limite ultimo

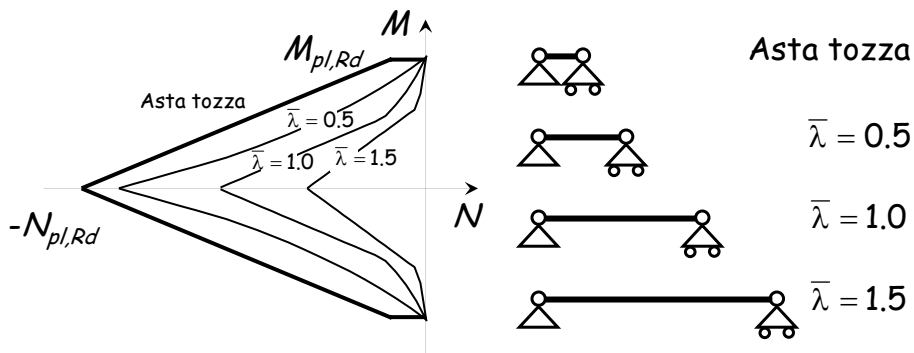
Il dominio dipende dalla snellezza dell'asta:

- Nel caso di aste tozze coincide con quello per tenso-flessione



## Domini di resistenza - stato limite ultimo

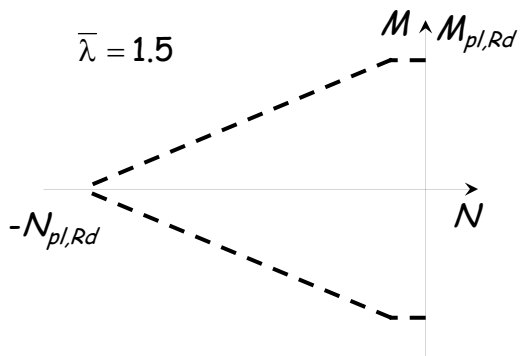
Il dominio è simmetrico per aste con sezione trasversale simmetrica



## Domini di resistenza - stato limite ultimo



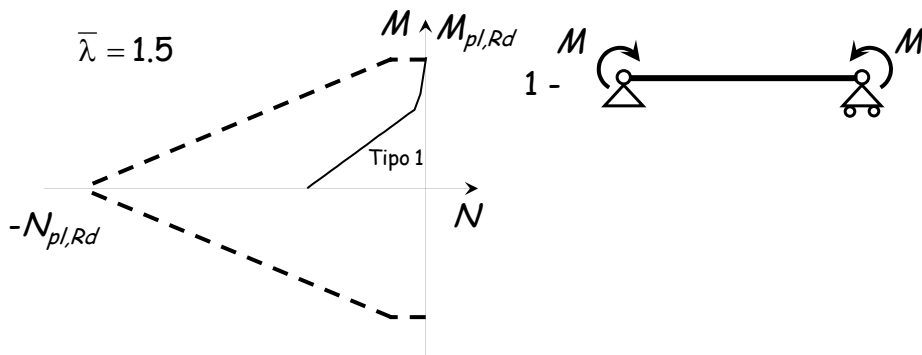
Momento tipo 1



## Domini di resistenza - stato limite ultimo



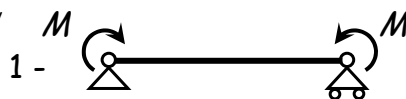
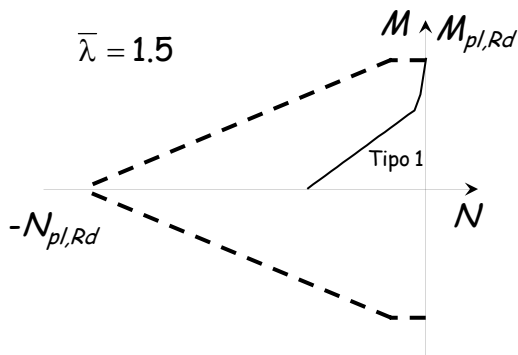
Momento tipo 1



## Domini di resistenza - stato limite ultimo



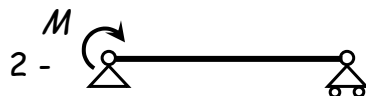
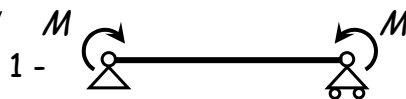
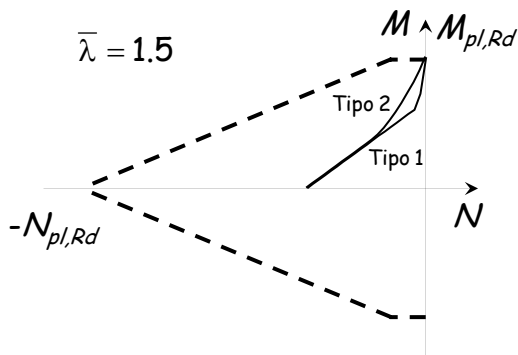
Momento tipo 2



## Domini di resistenza - stato limite ultimo



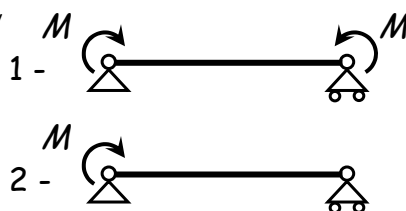
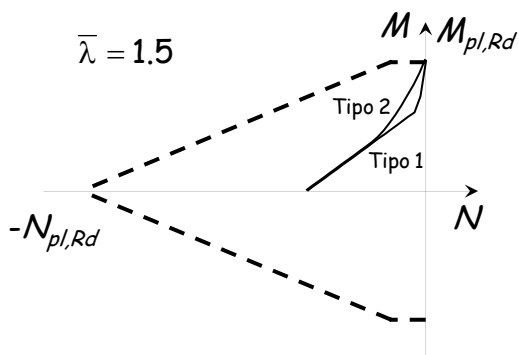
Momento tipo 2



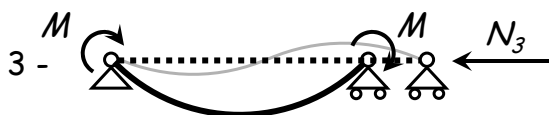
## Domini di resistenza - stato limite ultimo



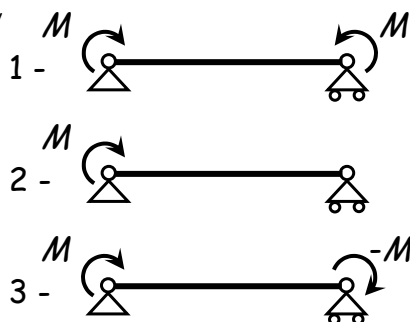
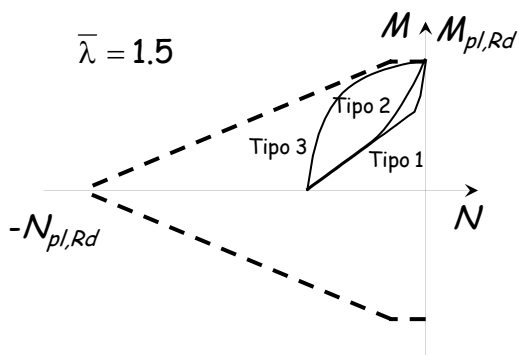
Momento tipo 3



## Domini di resistenza - stato limite ultimo



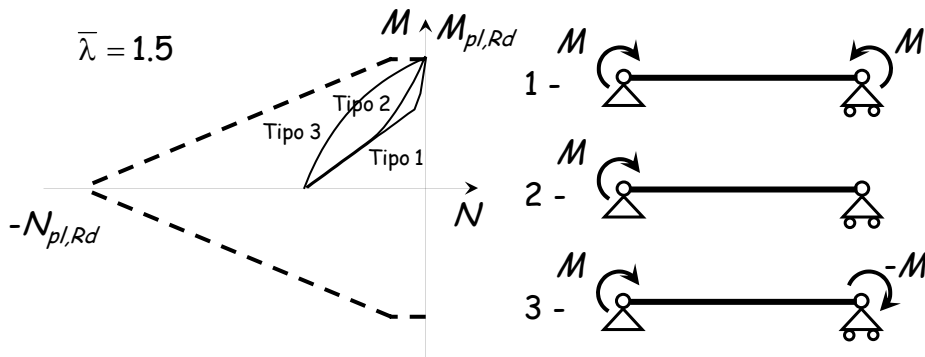
Momento tipo 3



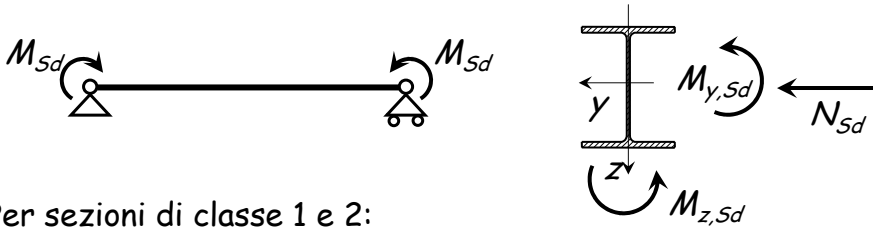
## Domini di resistenza - stato limite ultimo

Il dominio dipende dalla snellezza dell'asta:

- L'ampiezza del dominio aumenta passando dal diagramma dei momenti di tipo 1 a quello di tipo 3.



## Verifica - stato limite ultimo



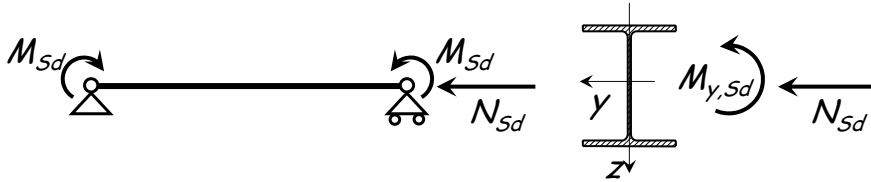
Per sezioni di classe 1 e 2:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{b,Rd}} + \frac{k_y M_{y,Sd}}{W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z M_{z,Sd}}{W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

$k_y, k_z \leq 1.5$  Dipende da:

- snellezza dell'asta;
- diagramma del momento;
- sforzo normale.

## Verifica - stato limite ultimo

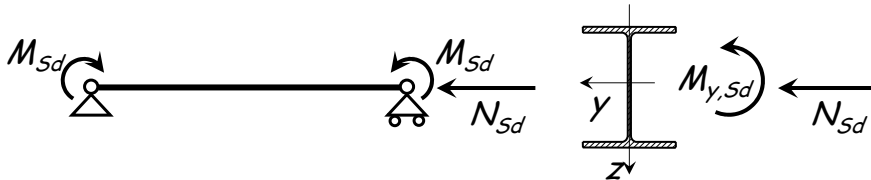


Nel caso più frequente in cui esiste un unico momento flettente:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{b,Rd}} + \frac{k_y M_{y,Sd}}{\boxed{W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} M_{pl,Rd}} \leq 1$$

$$k_y \leq 1.5$$

## Verifica - stato limite ultimo



Nel caso più frequente in cui ho un unico momento flettente:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{b,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{pl,Rd} / k_y} \leq 1$$

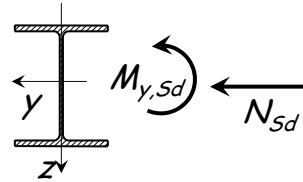
$$k_y \leq 1.5$$



## Verifica - stato limite ultimo

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{Sd}}{\chi_y A f_y} \leq 1.5$$

$$\mu_y = \bar{\lambda}_y (2 \beta_{My} - 4) + \frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}} \leq 0.9$$



$\beta_{My}$  dipende dal diagramma del momento flettente



$$-1 \leq \psi \leq 1$$

$$\beta_{My} = 1.8 - 0.7 \psi$$

N.B. Nel caso di diagramma parabolico o di altra forma esistono relazioni diverse per il calcolo di  $\beta_{My}$

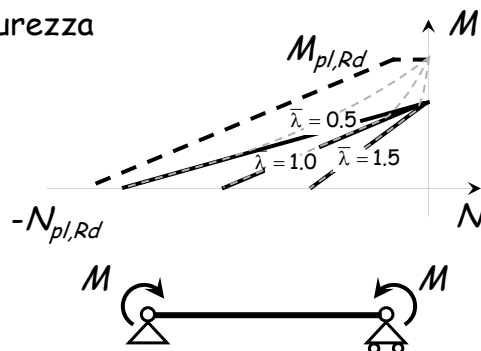
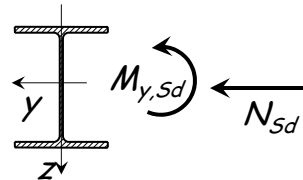
## Verifica - stato limite ultimo

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{Sd}}{\chi_y A f_y} \leq 1.5$$

oppure

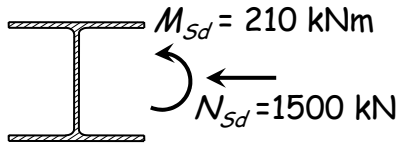
$$k_y = 1.5 \quad \text{a favore di sicurezza}$$

L'approssimazione è accettabile tranne che per aste tozze e per valori modesti dello sforzo normale

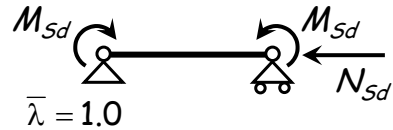


## Esempio

Dati:



Sezione HEB300  
Acciaio Fe360



1 - Classe della sezione

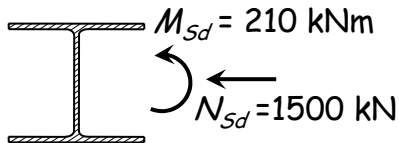
Anima:  $\frac{d}{t_w} = \frac{208}{11} = 19 \leq 48 \varepsilon = 48$

Flangia:  $\frac{c}{t_f} = \frac{150}{19} = 7.9 \leq 10 \varepsilon = 10$

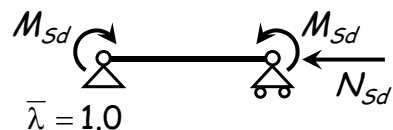
La sezione appartiene alla classe 1.

## Esempio

Dati:



Sezione HEB300  
Acciaio Fe360



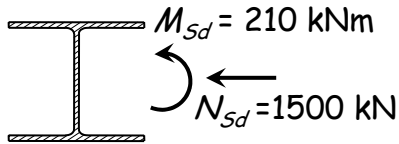
2 - Determinazione di  $M_{pl,Rd}$

$M_{pl,Rd} = 418.1 \text{ kNm}$

Era già stato determinato

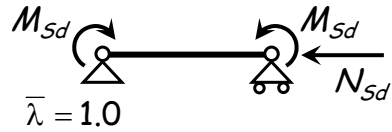
## Esempio

Dati:



Sezione  
Acciaio

HEB300  
Fe360



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

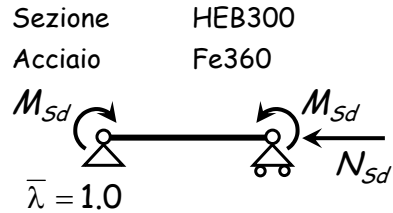
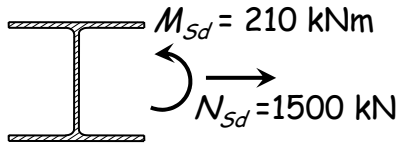
Quale curva dobbiamo utilizzare?

## Scelta della curva di instabilità

Sezione trasversale	Limiti	Intorno all'asse	Curva di instabilità
Sezioni laminate ad I 	$h/b > 1.2$ :		
	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y	a
		z-z	b
	$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b
		z-z	c
	$h/b \leq 1.2$ :		
	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b
		z-z	c
	$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y	d
		z-z	d

## Esempio

Dati:



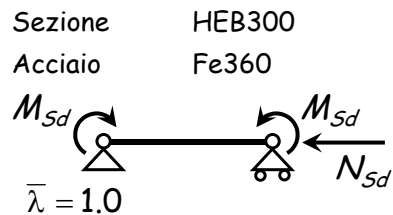
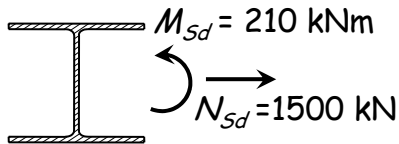
3 - Determinazione di  $N_{b,Rd}$

Curva c  $\Rightarrow \chi = 0.5399$   
 $\bar{\lambda} = 1.0$

$$N_{b,Rd} = \chi N_{pl,Rd} = 0.5399 \times 3334.8 = 1800.5 \text{ kN}$$

## Esempio

Dati:



4 - Verifica

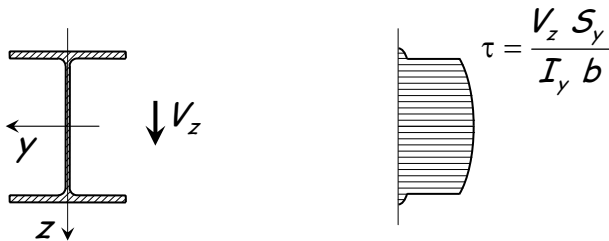
$$k_y = 1.5$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{b,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{pl,Rd} / k_y} = \frac{1500}{1800.5} + \frac{210}{418.1 / 1.5} = 0.83 + 0.75 \leq 1.58$$

La sezione non è verificata

# Taglio

## Comportamento ultimo



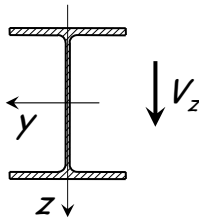
In campo lineare le tensioni si valutano con la formula di Jouraski:

$S_y$  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

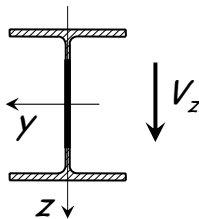


$$\tau = \frac{V_z S_y}{I_y b}$$

$$\tau = \frac{f_y}{\sqrt{3}}$$

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

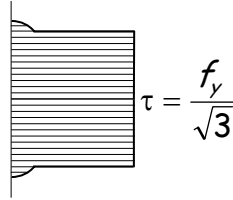
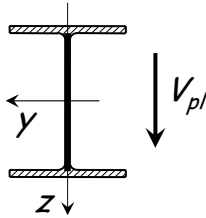
## Comportamento ultimo



$$\tau = \frac{f_y}{\sqrt{3}}$$

La plasticizzazione si propaga fino a che ...

## Comportamento ultimo



... si plasticizza tutta l'anima.

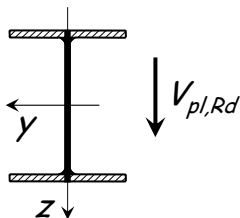
$$V_{pl} = A_{anima} \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad \text{per sezioni a doppio T}$$

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

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

# Collegamenti

## Tipi di collegamenti

### 1 - Collegamento a parziale ripristino di resistenza

In grado di trasmettere le caratteristiche di sollecitazione di progetto

### 2 - Collegamento a completo ripristino di resistenza

In grado di trasmettere le caratteristiche di sollecitazione ultime del meno resistente tra gli elementi collegati



## Tipi di collegamenti

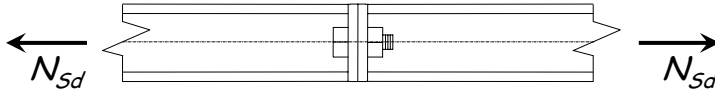
1 - Collegamento bullonati

2 - Collegamenti saldati

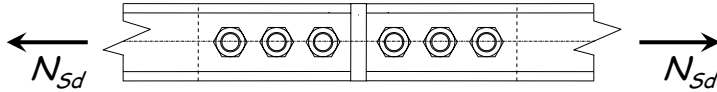
Collegamenti bullonati

## Collegamenti bullonati

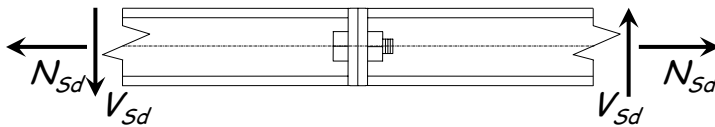
1 - Con bulloni sollecitati a trazione



2 - Con bulloni sollecitati a taglio

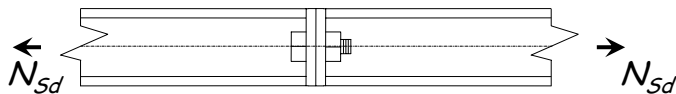


3 - Con bulloni sollecitati a trazione e taglio



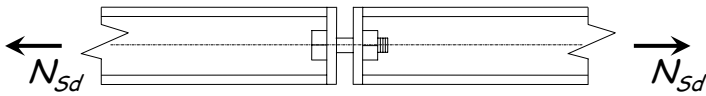
## Collegamenti bullonati bulloni sollecitati a trazione

Meccanismi di rottura



## Collegamenti bullonati bulloni sollecitati a trazione

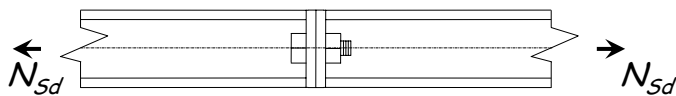
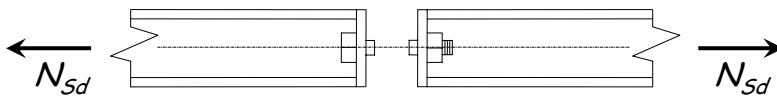
### Meccanismi di rottura



## Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

### Meccanismi di rottura

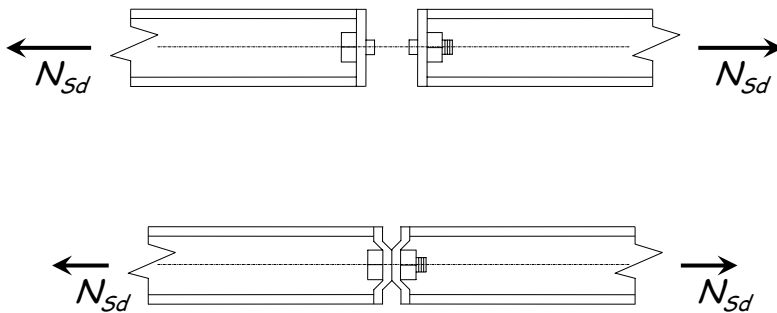
#### 1 - Rottura dei bulloni a trazione



## Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

### Meccanismi di rottura

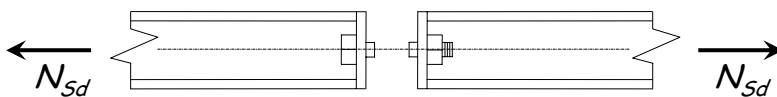
#### 1 - Rottura dei bulloni a trazione



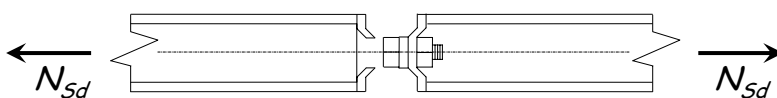
## Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

### Meccanismi di rottura

#### 1 - Rottura dei bulloni a trazione

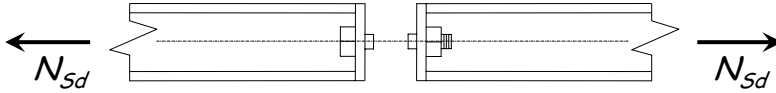


#### 2 - Punzonamento della piastra



## Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

### 1 - Rottura dei bulloni a trazione



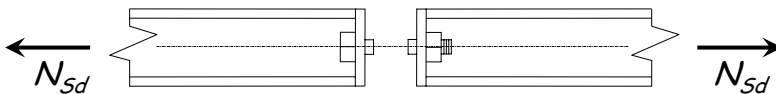
Il bullone si rompe quando la tensione sul bullone è pari a  $f_{ub}$

$$F_{t,max} = A_{res} f_{ub}$$

$A_{res}$  Area resistente del bullone

## Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

### 1 - Rottura dei bulloni a trazione



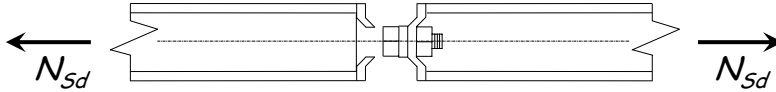
Il bullone si rompe quando la tensione sul bullone è pari a  $f_{ub}$

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{Mb}}$$

$A_{res}$  Area resistente del bullone

## Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

### 2 - Punzonamento della piastra



La piastra si rompe quando la tensione tangenziale sulla giacitura di rottura è pari a  $f_u / \sqrt{3}$

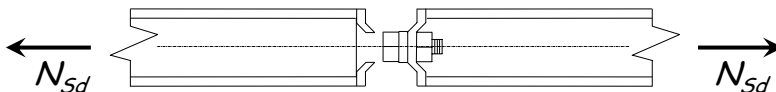
$$B_{p,max} = \pi d_m t_p (f_u / \sqrt{3})$$

$d_m$       Diametro della giacitura di rottura

$t_p$       Spessore della piastra

## Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

### 2 - Punzonamento della piastra



La piastra si rompe quando la tensione tangenziale sulla giacitura di rottura è pari a  $f_u / \sqrt{3}$

$$B_{p,Rd} = \frac{\pi d_m t_p (0.6 f_u)}{\gamma_{Mb}}$$

$d_m$       Diametro della giacitura di rottura

$t_p$       Spessore della piastra

## Verifica di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

### 1 - Rottura dei bulloni a trazione

$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd} = \frac{0.9 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{Mb}}$$

$A_{res}$  Area resistente del bullone

### 2 - Punzonamento della piastra

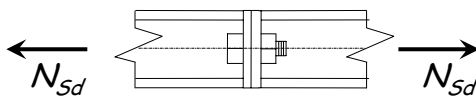
$$F_{t,Sb} \leq B_{p,Rb} = \frac{\pi d_m t_p (0.6 f_u)}{\gamma_{Mb}}$$

$d_m$  Diametro della giacitura di rottura

$t_p$  Spessore della piastra

## Esempio

Dati:



$N_{Sd}$	100 kN
2 Bulloni	M16
	classe 5.6
Lamiera	Fe360
	$t_p = 5$ mm

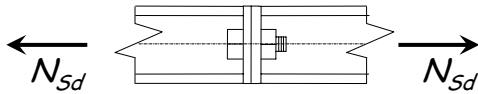
### 1 - Determinazione di $F_{t,Rd}$

$$A_{res} = 157 \text{ mm}^2$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{Mb}} = \frac{0.9 \times 157 \times 500}{1.35 \times 10^3} = 52.3 \text{ kN}$$

## Esempio

Dati:



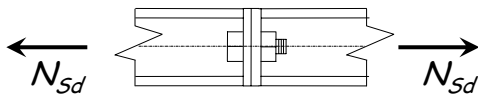
$N_{Sd}$	100 kN
2 Bulloni	M16
	classe 5.6
Lamiera	Fe360
	$t_p = 5 \text{ mm}$

2 - Determinazione di  $B_{p,Rd}$

$$B_{p,Rd} = \frac{\pi d_m t_p (0.6 f_u)}{\gamma_{Mb}} = \frac{\pi \times 25 \times 5 \times (0.6 \times 360)}{1.35 \times 10^3} = 62.8 \text{ kN}$$

## Esempio

Dati:



$N_{Sd}$	100 kN
2 Bulloni	M16
	classe 5.6
Lamiera	Fe360
	$t_p = 5 \text{ mm}$

3 - Verifica

$$F_{t,Sd} = \frac{N_{Sd}}{n_b} = \frac{100}{2} = 50.0 \text{ kN} < F_{t,Rd} < B_{p,Rd}$$

$$F_{t,Rd} = 52.3 \text{ kN}$$

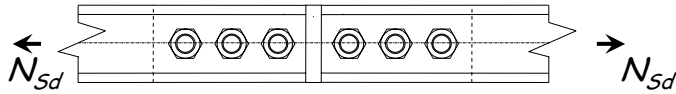
$$B_{p,Rd} = 62.8 \text{ kN}$$

Il collegamento è verificato



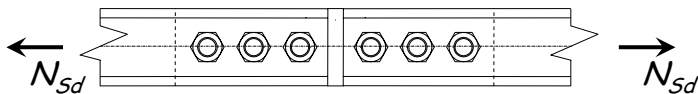
## Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

Meccanismi di rottura



## Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

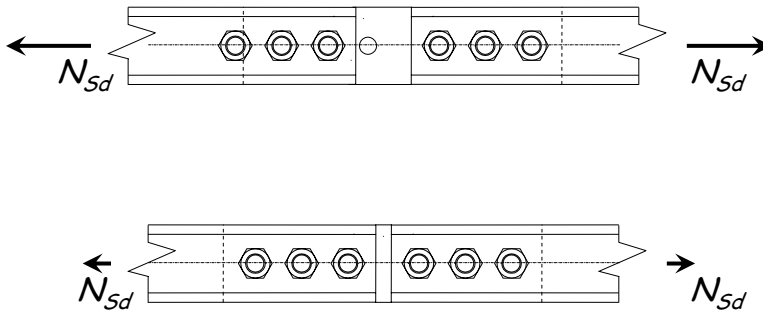
Meccanismi di rottura



## Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

### Meccanismi di rottura

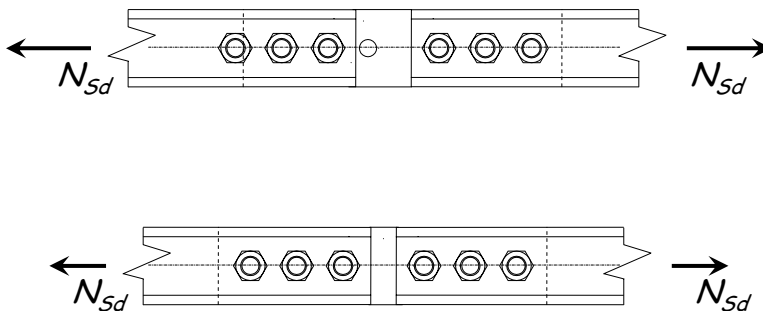
#### 1 - Rottura dei bulloni a taglio



## Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

### Meccanismi di rottura

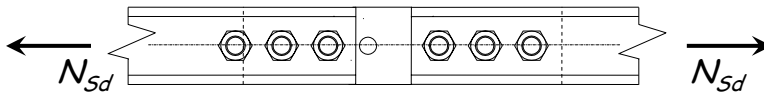
#### 1 - Rottura dei bulloni a taglio



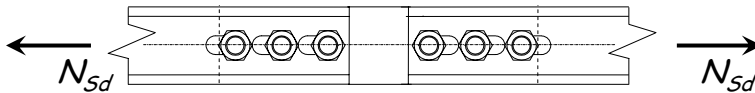
## Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

### Meccanismi di rottura

#### 1 - Rottura dei bulloni a taglio

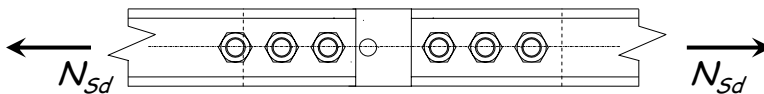


#### 2 - Rifollamento delle lamiere



## Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

#### 1 - Rottura dei bulloni a taglio



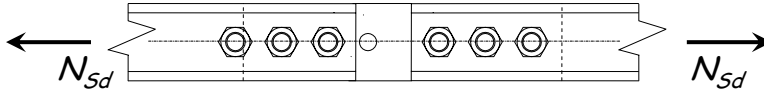
Il bullone si rompe quando la tensione tangenziale sul bullone è pari a  $f_{ub} / \sqrt{3}$

$$F_{V,max} = A (f_{ub} / \sqrt{3})$$

$A$  Area nominale del bullone

## Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

### 1 - Rottura dei bulloni a taglio



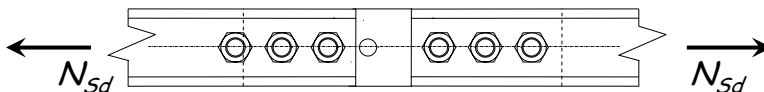
Il bullone si rompe quando la tensione tangenziale sul bullone è pari a  $f_{ub} / \sqrt{3}$

$$F_{v,Rd} = \frac{A (0.6 f_{ub})}{\gamma_{Mb}}$$

$A$  Area nominale del bullone

## Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

### 1 - Rottura dei bulloni a taglio



Se il piano di taglio attraversa la parte filettata del bullone:

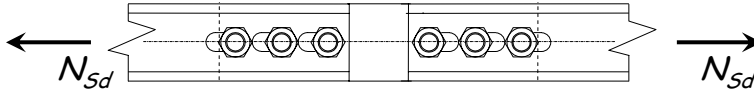
$$F_{v,Rd} = \frac{A_{res} (0.6 f_{ub})}{\gamma_{Mb}} \quad (\text{per bulloni di classe 4.6, 5.6 ed 8.8})$$

$$F_{v,Rd} = \frac{A_{res} (0.5 f_{ub})}{\gamma_{Mb}} \quad (\text{per bulloni di classe 4.8, 5.8 ed 10.9})$$

$A_{res}$  Area resistente del bullone

## Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

### 2 - Rifollamento delle lamiere



Si ottiene quando la tensione esercitata dal bullone sulla lamiera raggiunge il valore convenzionale  $2.5 \alpha f_u$ ;

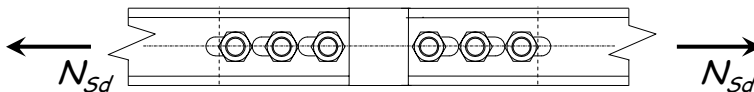
$$F_{b,max} = 2.5 \alpha d t_p f_u$$

$d$       Diametro del bullone

$t_p$      Spessore della lamiera

## Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

### 2 - Rifollamento delle lamiere



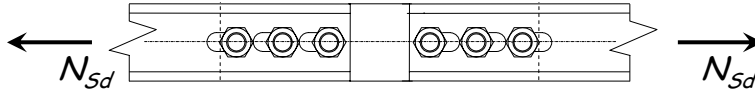
Si ottiene quando la tensione esercitata dal bullone sulla lamiera raggiunge il valore convenzionale  $2.5 \alpha f_u$

$$F_{b,max} = 2.5 \alpha d t_p f_u$$

$$\alpha = \min \left( \frac{e_1}{3 d_0}, \frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$$

## Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

### 2 - Rifollamento delle lamiera



Si ottiene quando la tensione esercitata dal bullone sulla lamiera raggiunge il valore convenzionale  $2.5 \alpha f_u$ ;

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \alpha d t_p f_u}{\gamma_{Mb}}$$

$$\alpha = \min \left( \frac{e_1}{3 d_0}, \frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$$

## Verifica di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

### 1 - Rottura dei bulloni a taglio (rottura sulla sezione nominale)

$$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd} = \frac{0.6 A f_{ub}}{\gamma_{Mb}}$$

$A$  Area nominale del bullone

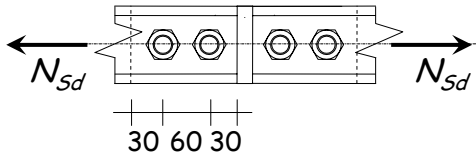
### 2 - Rifollamento della lamiera

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \alpha d t_p f_u}{\gamma_{Mb}}$$

$$\alpha = \min \left( \frac{e_1}{3 d_0}, \frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$$

## Esempio

Dati:



$N_{Sd}$	100 kN
2 Bulloni (per lato)	M16 classe 5.6
Lamiera	Fe360
	$t_p = 10$ mm

1 - Determinazione di  $F_{v,Rd}$

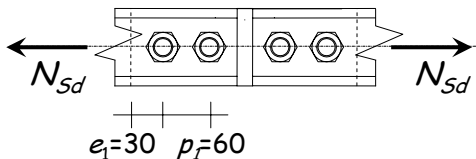
$$A = 201 \text{ mm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 A f_{ub}}{\gamma_{Mb}} = \frac{0.6 \times 201 \times 500}{1.35 \times 10^3} = 44.7 \text{ kN}$$

N.B. In questo caso, ogni bullone porta 2  $F_{v,Rd}$

## Esempio

Dati:



$N_{Sd}$	100 kN
2 Bulloni (per lato)	M16 classe 5.6
Lamiera	Fe360
	$t_p = 10$ mm

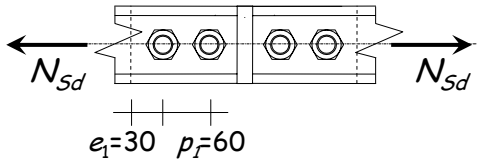
2 - Determinazione di  $F_{b,Rd}$  (del piatto)

$$\alpha = \min\left(\frac{e_1}{3 d_0}, \frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1\right) = \min(0.555, 0.861, 1.39, 1)$$

$$d = 16 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad d_0 = 18 \text{ mm}$$

## Esempio

Dati:



$N_{Sd}$	100 kN
2 Bulloni (per lato)	M16 classe 5.6
Lamiera	Fe360
	$t_p = 10 \text{ mm}$

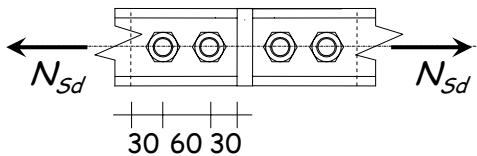
2 - Determinazione di  $F_{b,Rd}$  (del piatto)

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \times 0.555 \times 18 \times 10 \times 360}{1.35 \times 10^3} = 66.6 \text{ kN}$$

$$\alpha = 0.555$$

## Esempio

Dati:



$N_{Sd}$	100 kN
2 Bulloni (per lato)	M16 classe 5.6
Lamiera	Fe360
	$t_p = 10 \text{ mm}$

3 - Verifica

$$F_{v,Sd} = \frac{N_{Sd}}{n_b} = \frac{100}{2} = 50.0 \text{ kN} < 2 F_{v,Rd} < F_{b,Rd}$$

$$2 F_{v,Rd} = 2 \times 44.7 = 89.4 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd} = 66.6 \text{ kN}$$

Il collegamento è verificato



## Verifica di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio e trazione

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1.4 F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}$$

$F_{v,Sd}, F_{t,Sd}$  Sollecitazioni di taglio e trazione

$F_{v,Rd}$  Resistenza a taglio del bullone

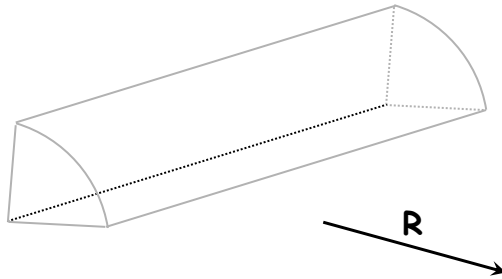
$F_{t,Rd}$  Resistenza a trazione del bullone

## Collegamenti saldati

1 - A completa penetrazione

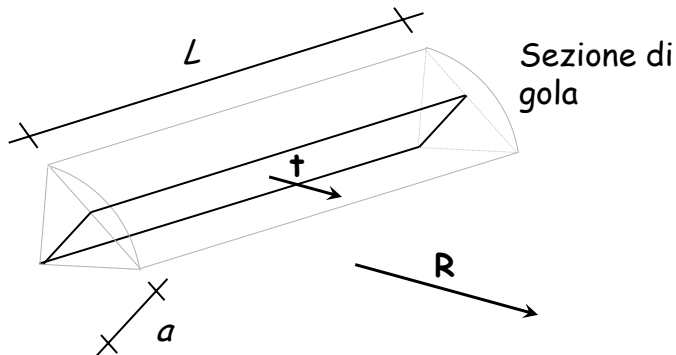
2 - Con cordoni d'angolo

## Resistenza dei cordoni di saldatura



$R$  Forza agente sul cordone d'angolo

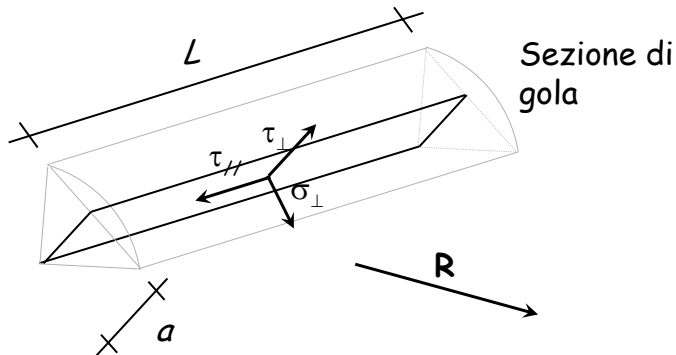
## Resistenza dei cordoni di saldatura



$R$  Forza agente sul cordone d'angolo

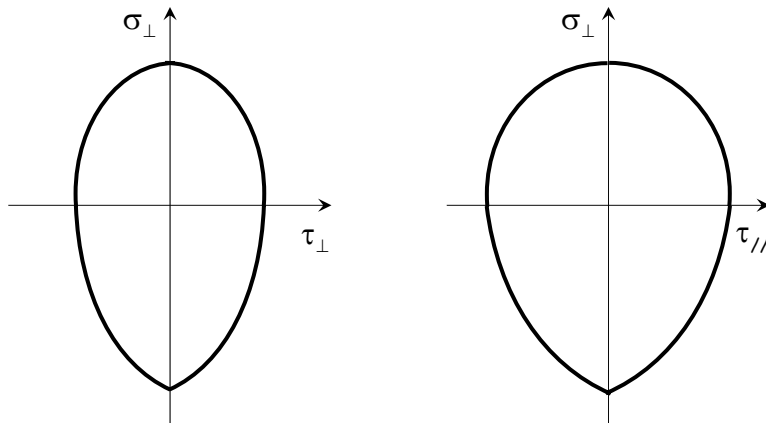
$t$  Tensione agente sulla sezione di gola  
(ha lo stessa direzione di  $R$  e modulo pari a  $t = R / a L$ )

## Resistenza dei cordoni di saldatura



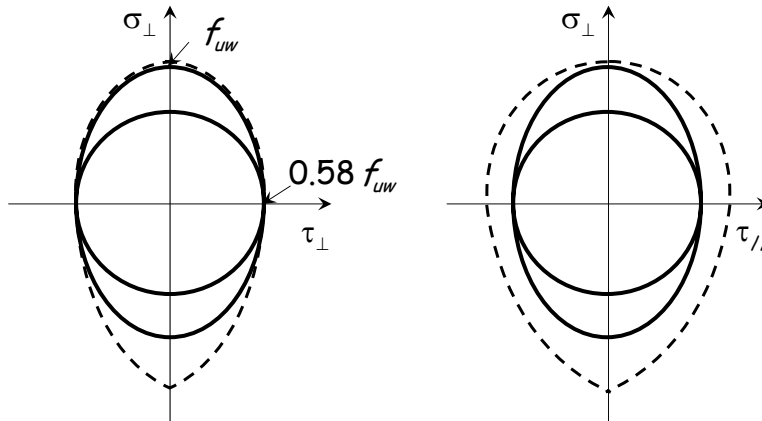
- R** Forza agente sul cordone d'angolo
- t** Tensione agente sulla sezione di gola  
(ha lo stessa direzione di R e modulo pari a  $t = R / a L$ )
- $\sigma_{\perp} \tau_{\parallel} \tau_{\perp}$  Componenti di **t**

## Resistenza dei cordoni di saldatura



Il dominio di rottura di un cordone di saldatura è stato determinato sperimentalmente e prende il nome di *peroide*.

## Resistenza dei cordoni di saldatura



L'Eurocodice 3 propone due domini di rottura:  
 1 - dominio sferico;  
 2 - ellissoide di rotazione.

## Resistenza dei cordoni di saldatura

Se si usa il dominio sferico:

$$f_{vw} = \frac{f_{uw}}{\sqrt{3}} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w}$$

$f_{vw}$  Massima tensione sopportabile da cordone di saldatura

$\beta_w$  Tiene conto della differenza tra il cordone di saldatura ed il materiale base

$\beta_w = 0.80$  Per Fe360

$\beta_w = 0.85$  Per Fe430

$\beta_w = 0.90$  Per Fe510

## Resistenza dei cordoni di saldatura

Se si usa il dominio sferico:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{Mw}}$$

$f_{vw}$  Massima tensione sopportabile da cordone di saldatura

$\beta_w$  Tiene conto della differenza tra il cordone di saldatura ed il materiale base

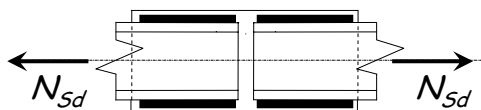
$\beta_w = 0.80$  Per Fe360

$\beta_w = 0.85$  Per Fe430

$\beta_w = 0.90$  Per Fe510

## Esempio

Dati:



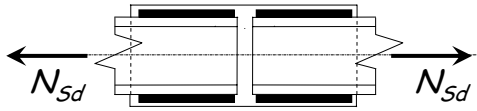
$N_{Sd}$	150 kN
4 Cordoni (per lato)	$a = 3 \text{ mm}$ $L = 80 \text{ mm}$
Lamiera	Fe360

1 - Determinazione di  $f_{vw,d}$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{Mw}} = \frac{360 / \sqrt{3}}{0.80 \times 1.35} = 192.5 \text{ MPa}$$

## Esempio

Dati:



$N_{Sd}$	150 kN
4 Cordoni (per lato)	$a = 3$ mm $L = 80$ mm
Lamiera	Fe360

2 - Verifica

$$F_{v,Sd} = \frac{N_{Sd}}{n_c} = \frac{150}{4} = 37.5 \text{ kN}$$

$$F_{v,Sd} < a L f_{vw,d} = \frac{3 \times 80 \times 192.5}{10^3} = 46.2 \text{ kN}$$

$$f_{vw,d} = 192.5 \text{ MPa}$$

Il collegamento è verificato

Verifica di cordoni di saldatura  
(se si usa l'ellissoide di rotazione)

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}}$$

N.B. Questo metodo è molto più complesso perché richiede la valutazione delle diverse componenti di tensione sulla sezione di gola.

# FINE

Tratta da:

Per questa presentazione:

coordinamento

*A. Gherzi*

realizzazione

*E.M. Marino*

ultimo aggiornamento

*9/02/2007*