

Corso di aggiornamento
Progettazione strutturale e
Norme Tecniche per le Costruzioni

Progetto di aste e collegamenti in acciaio

8 - Classificazione dei collegamenti e collegamenti bullonati

Spoletto
8-10 novembre 2012
Aurelio Gherzi

Classificazione dei collegamenti

Classificazione

- In base alla modalità di esecuzione:
 1. Collegamento bullonati
 2. Collegamenti saldati

Resistenze da usare

- Sempre i valori ultimi (non quelli di snervamento)

Bulloni: f_{ub}

Saldature:

si dovrebbe usare f_{uw} (resistenza della saldatura);
per comodità la si riporta a f_u del materiale base

Classificazione

- In base all'azione che si trasmette
 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

Classificazione

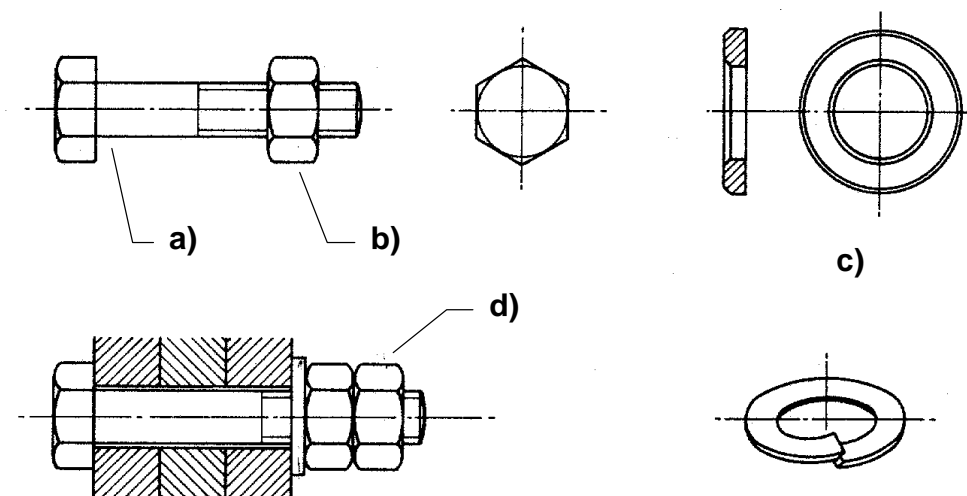
- In base alla rigidezza
con riferimento alla rotazione relativa tra i pezzi uniti
 1. Collegamento rigido
la rotazione relativa è praticamente nulla
 2. Collegamento semirigido
la rotazione relativa è legata al momento flettente;
equivale ad una molla rotazionale
 3. Collegamento a cerniera
la rotazione relativa è sostanzialmente consentita

Collegamenti bullonati

I bulloni

Sono costituiti da:

- a) vite con testa esagonale e gambo filettato in tutta o in parte
- b) dado di forma esagonale
- c) rondella sia del tipo elastico che rigido (o rosetta)
- d) controdado (se necessario) per garantire che il dado non si sviti neanche in presenza di vibrazioni



I bulloni

caratteristiche geometriche

- diametro (nominale)
individuato dalla lettera M più il diametro in mm

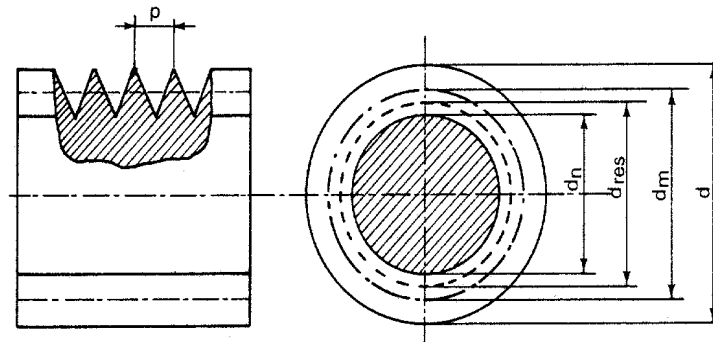
diámetro (mm)	12	14	16	18	20	22	24	27	30
sigla	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30

- lunghezza
tale da assicurare l'attraversamento degli elementi da collegare;
non eccessiva per evitare sprechi e necessità di tagliare i pezzi
in eccesso
- lunghezza della parte filettata

I bulloni

area nominale ed area resistente

- la sezione si riduce in corrispondenza della filettatura



sigla	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30
$A \text{ (mm}^2\text{)}$	113	154	201	254	314	380	452	573	707
$A_{res} \text{ (mm}^2\text{)}$	84.3	115	157	192	245	303	353	459	581
A_{res} / A	0.75	0.75	0.78	0.75	0.78	0.80	0.78	0.80	0.82


I bulloni

classe di resistenza

- Sigla che individua le caratteristiche dell'acciaio:
due numeri separati da un punto
 - Primo numero: indica la tensione di rottura in MPa (divisa per 100: 4 → 400 MPa)
 - Secondo numero: indica il rapporto tra tensione di snervamento e tensione di rottura (moltiplicato per 10: 6 → 0.6)

bulloni ad alta resistenza

- Classi previste dalle NTC08:



classe	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
f_{ub} (MPa)	400	500	600	800	1000
f_{yb} (MPa)	240	300	480	640	900

NTC08, punto 4.2.8.1.1

I bulloni diametri dei fori

- condiziona sia la facilità di montaggio della struttura che la sua deformazione

d diametro bullone

d_0 diametro foro

$d-d_0$ gioco foro-bullone

diametro bullone d	12	14	16	18	20	22	24	27	30
NTC08	1	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5
Eurocodice 3	1	1	2	2	2	2	2	3	3

Valori massimi del gioco foro-bullone (mm)

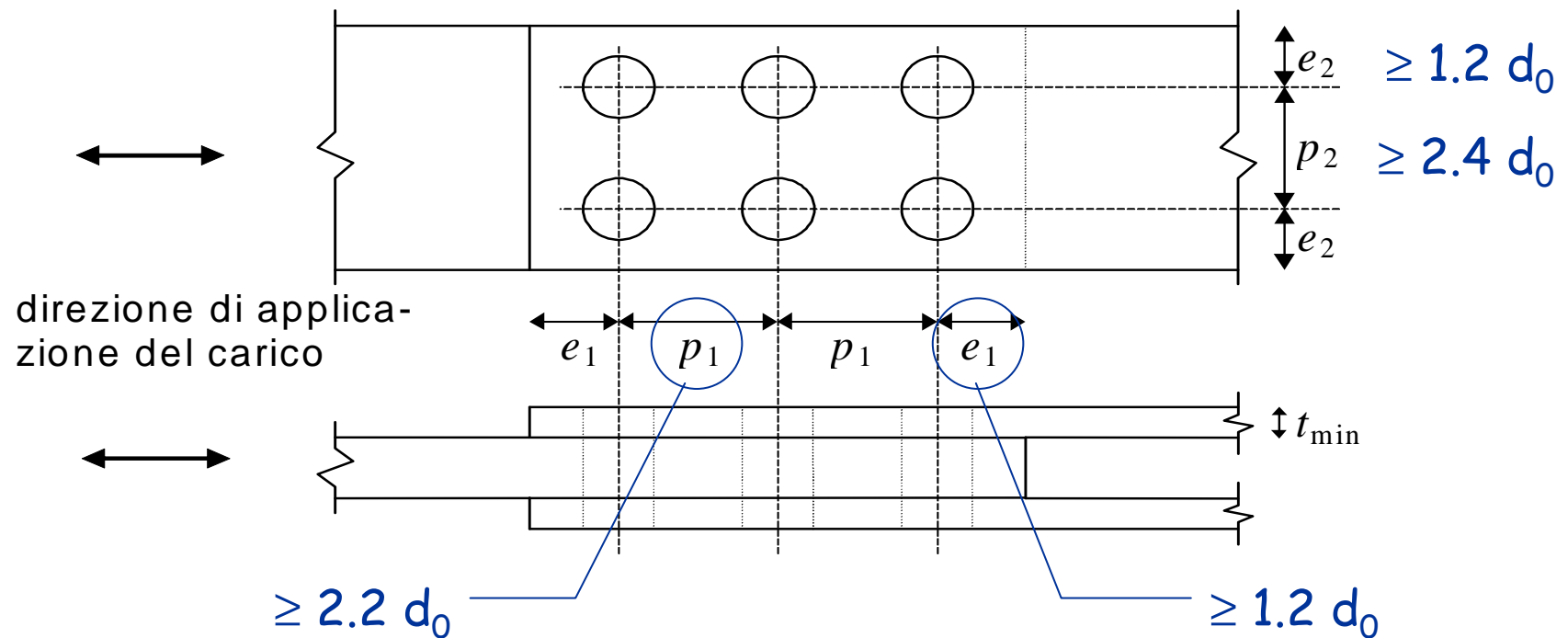
- fori calibrati: $d-d_0 \leq 0.3 \text{ mm}$
usati per limitare al massimo le deformazioni indotte dallo scorrimento del bullone nel foro

NTC08, punto 4.2.8.1.1

I bulloni

distanze tra fori e foro-bordo

- limiti per le distanze minime, sia in direzione della forza trasmessa che perpendicolarmente



I limiti nascono da problemi di resistenza della lamiera

NTC08, punto 4.2.8.1.1, Tab. 4.2.XIII

I bulloni

distanze tra fori e foro-bordo

- limiti per le distanze massime, sia in direzione della forza trasmessa che perpendicolarmente

Distanze massime	Esposizione ad fenomeni corrosivi o ambientali	
	Unioni esposte	Unioni non esposte
e_1	$4t + 40 \text{ mm}$	--
e_2	$4t + 40 \text{ mm}$	--
p_1	$\min(14t; 200\text{mm})$	$\min(14t; 200\text{mm})$
p_2	$\min(14t; 200\text{mm})$	$\min(14t; 200\text{mm})$

L'instabilità del piatto tra i bulloni non deve essere considerata se

$$p_1 < 9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} t$$

I limiti nascono da problemi di durabilità e resistenza della lamiera

NTC08, punto 4.2.8.1.1, Tab. 4.2.XIII

I bulloni serraggio

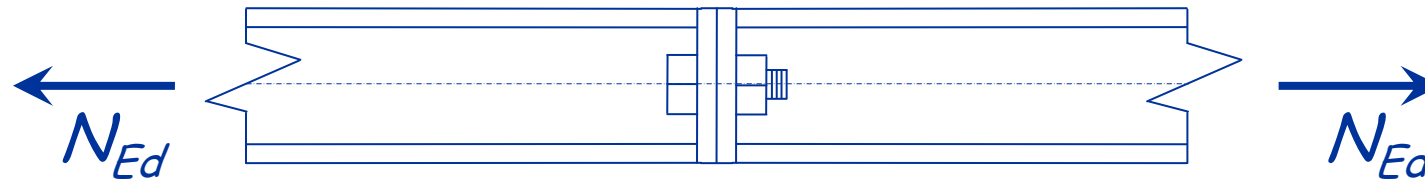
- Serraggio:
 - importante per garantire un buon comportamento e limitare deformabilità
 - fondamentale nelle unioni ad attrito
- Forza di precarico:

$$F_{p,Cd} = 0.7 \frac{f_{ub} A_{res}}{\gamma_{M7}}$$

$$\gamma_{M7} = 1.10$$

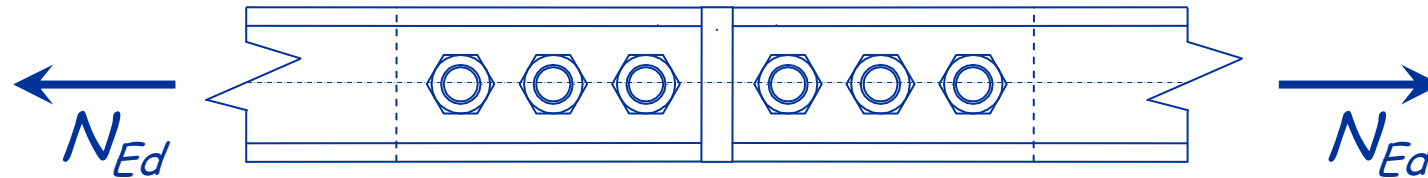
Collegamenti bullonati modalità di comportamento

1 - Con bulloni sollecitati a trazione

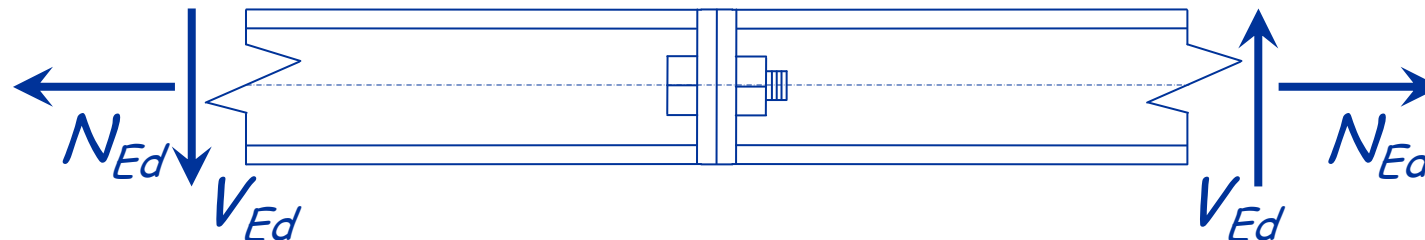


2 - Con bulloni sollecitati a taglio

In alternativa:
ad attrito



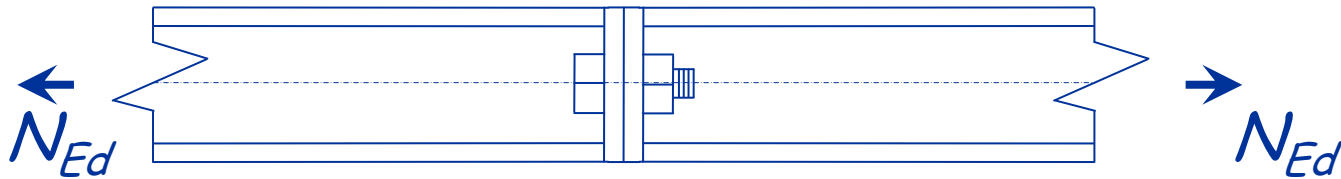
3 - Con bulloni sollecitati a trazione e taglio



Bulloni soggetti a trazione

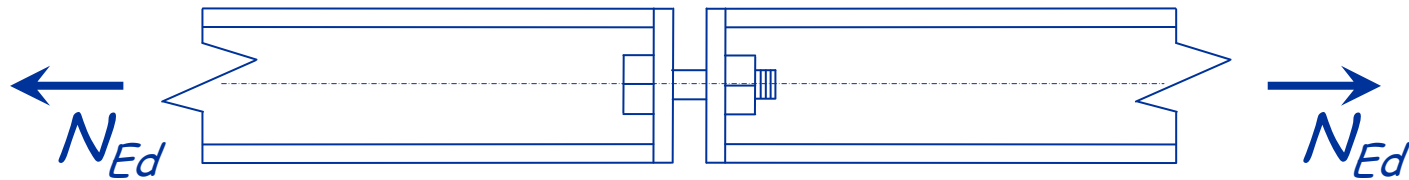
Collegamenti bullonati bulloni sollecitati a trazione

Meccanismi di rottura



Collegamenti bullonati bulloni sollecitati a trazione

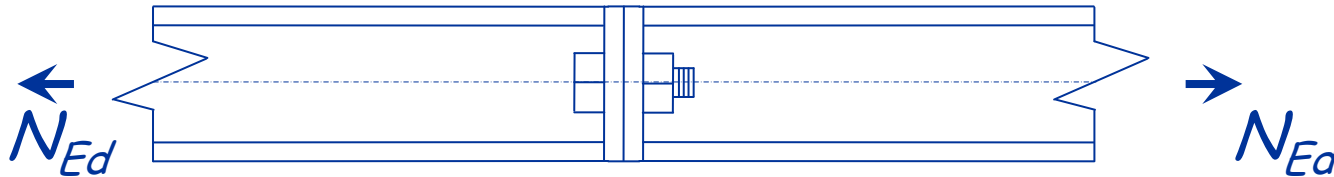
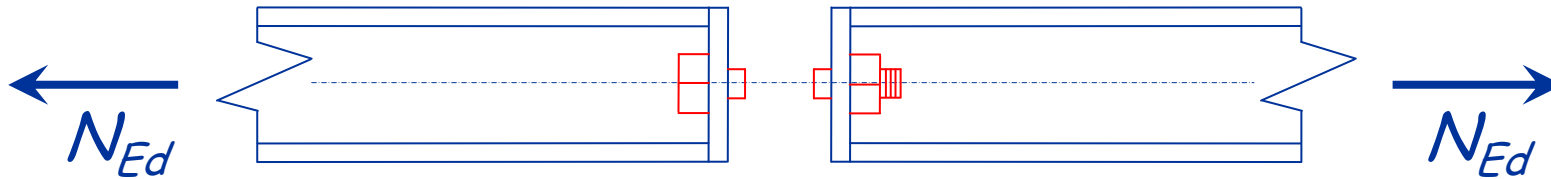
Meccanismi di rottura



Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

Meccanismi di rottura

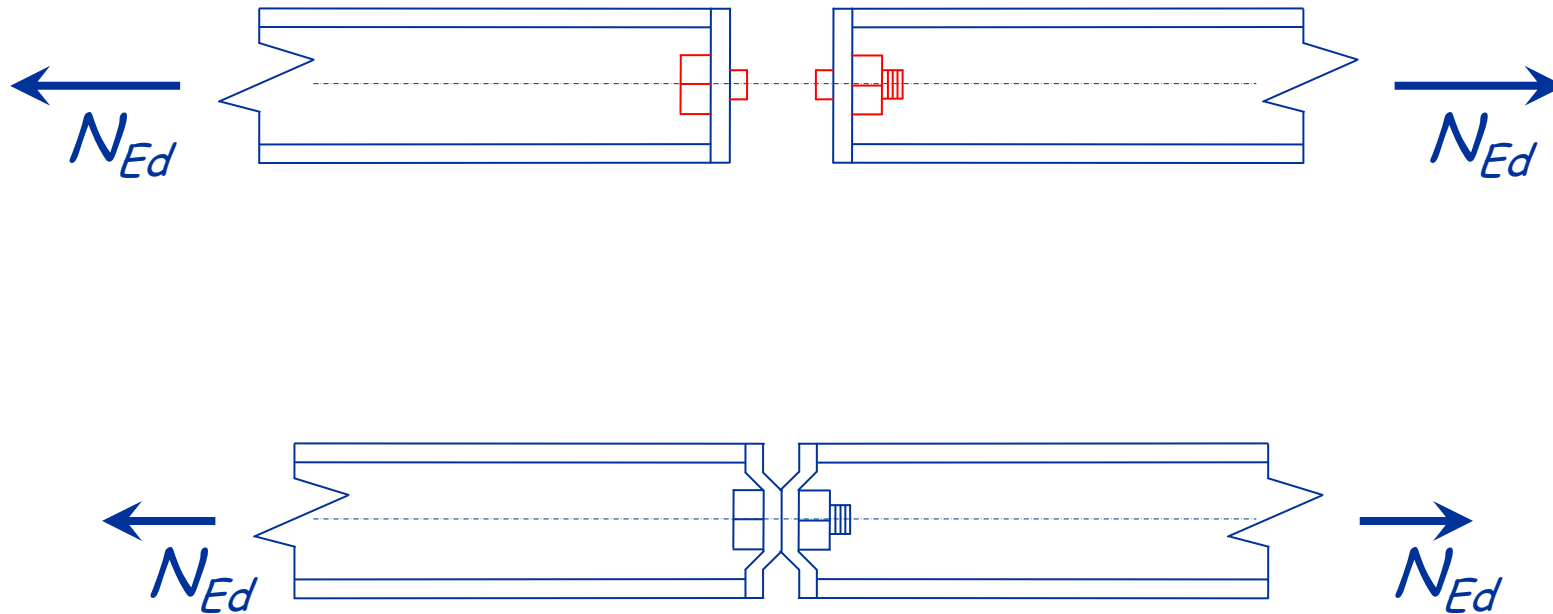
1 - Rottura dei bulloni a trazione



Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

Meccanismi di rottura

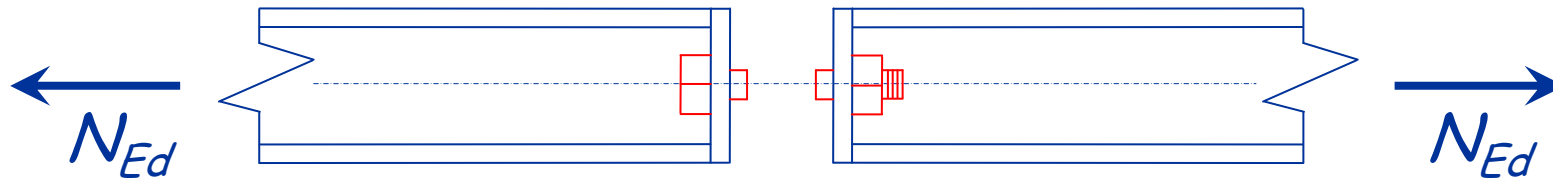
1 - Rottura dei bulloni a trazione



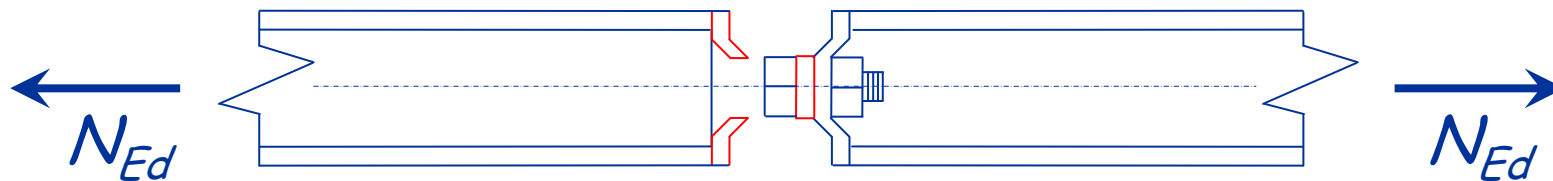
Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

Meccanismi di rottura

1 - Rottura dei bulloni a trazione

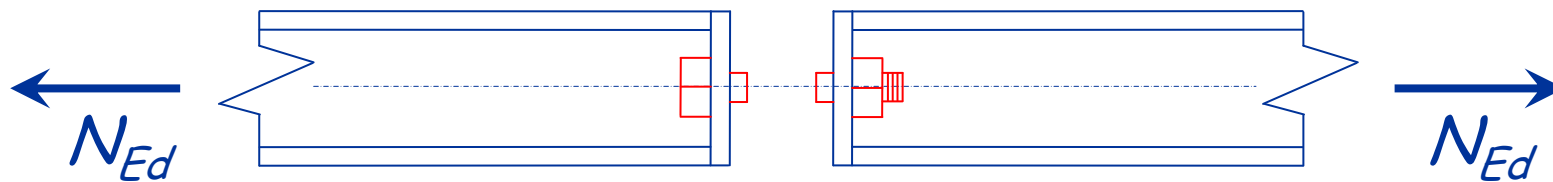


2 - Punzonamento della piastra



Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

1 - Rottura dei bulloni a trazione



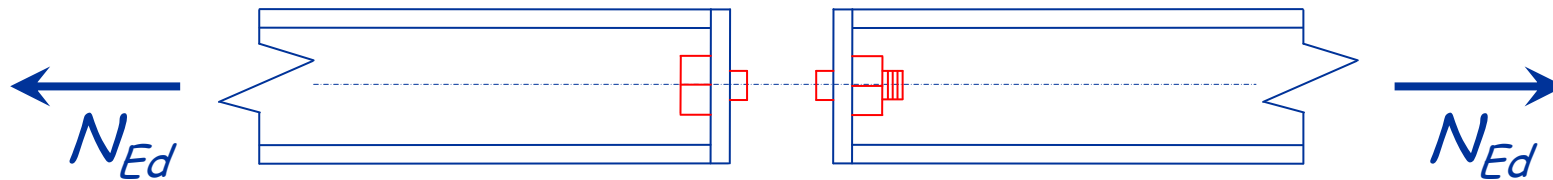
La tensione nel bullone per effetto della forza F_t è uniforme

$$\sigma = \frac{F_t}{A_{res}}$$

A_{res} Area resistente del bullone

Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

1 - Rottura dei bulloni a trazione



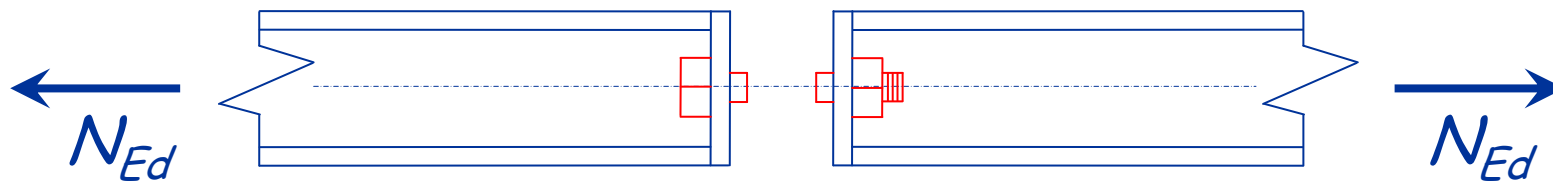
Il bullone si rompe quando la tensione sul bullone è pari a f_{ub}

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

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}

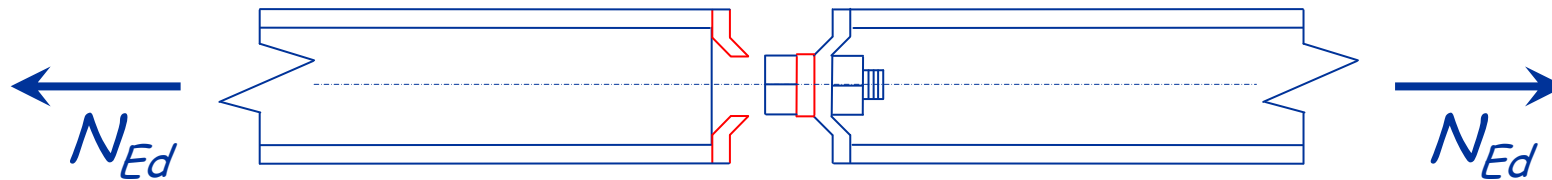
$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{M2}}$$

A_{res} Area resistente del bullone

NTC08, punto 4.2.8.1.1

Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

2 - Punzonamento della piastra

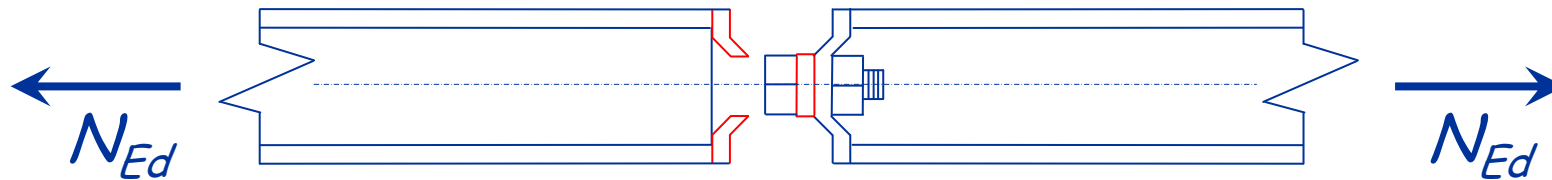


La superficie di rottura è cilindrica con altezza t_p e diametro d_m

$$\tau = \frac{F_t}{\pi d_m t_p}$$

Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

2 - Punzonamento della piastra



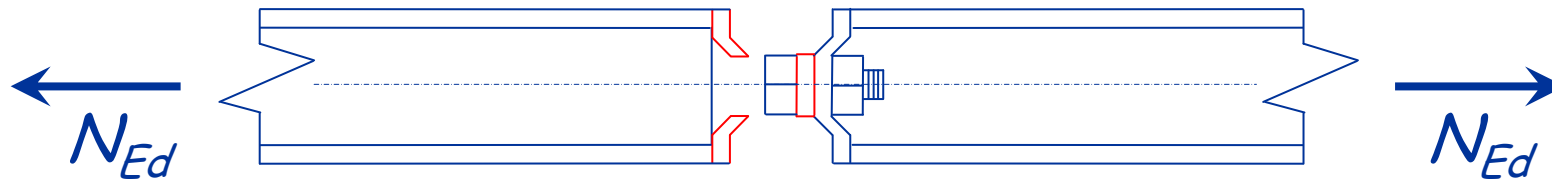
Secondo il criterio di Von Mises la piastra si rompe quando la tensione ideale sulla giacitura di rottura è pari ad f_u :

$$\sigma_{id} = \sqrt{(\sigma^2 + 3 \tau^2)} = \sqrt{3} \tau = f_u$$

ovvero...

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 $f_u / \sqrt{3}$

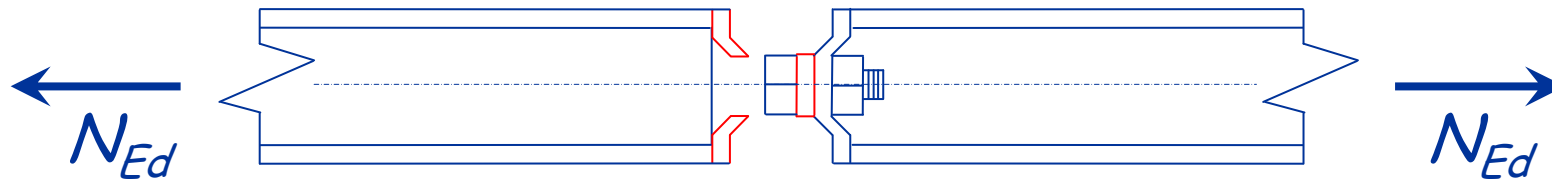
$$B_{p,max} = \pi d_m t_p (f_u / \sqrt{3})$$

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 $f_u / \sqrt{3}$

$$B_{p,Rd} = \frac{0.6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}}$$

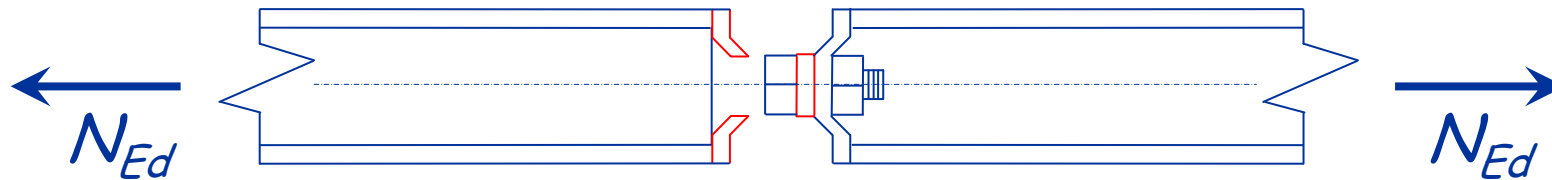
d_m Diametro della giacitura di rottura

t_p Spessore della piastra

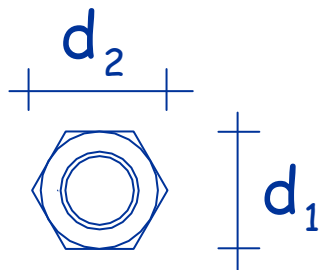
NTC08, punto 4.2.8.1.1

Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

2 - Punzonamento della piastra



Diametro della giacitura di rottura



$$d_m = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Verifica di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a trazione

1 - Rottura dei bulloni a trazione

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} = \frac{0.9 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{M2}}$$

A_{res} Area resistente del bullone

2 - Punzonamento della piastra

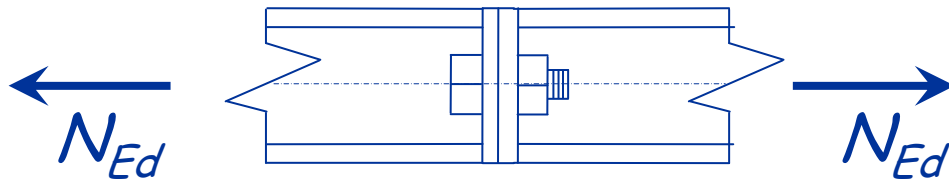
$$F_{t,Ed} \leq B_{p,Rb} = \frac{0.6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}}$$

d_m Diametro della giacitura di rottura

t_p Spessore della piastra

Esempio

Dati:



N_{Ed}	100 kN
Acciaio	S235
2 Bulloni	M16
	classe 5.6
Piatto	$t_p = 5 \text{ mm}$

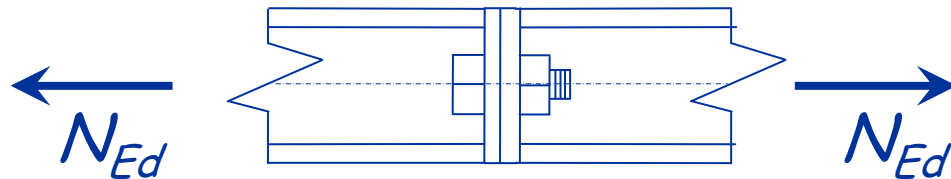
1 - Determinazione di $F_{t,Rd}$

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

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \times 157 \times 500}{1.25 \times 10^3} = 56.5 \text{ kN}$$

Esempio

Dati:



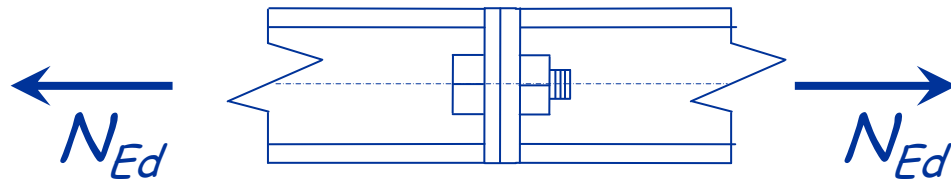
N_{Ed}	100 kN
Acciaio	S235
2 Bulloni	M16
	classe 5.6
Piatto	$t_p = 5 \text{ mm}$

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

$$B_{p,Rd} = \frac{0.6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0.6 \times \pi \times 25 \times 5 \times 360}{1.25 \times 10^3} = 67.9 \text{ kN}$$

Esempio

Dati:



N_{Ed}	100 kN
Acciaio	S235
2 Bulloni	M16 classe 5.6
Piatto	$t_p = 5 \text{ mm}$

3 - Verifica

$$F_{t,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n_b} = \frac{100}{2} = 50.0 \text{ kN}$$

$$< F_{t,Rd} < B_{p,Rd}$$

$$F_{t,Rd} = 56.5 \text{ kN}$$

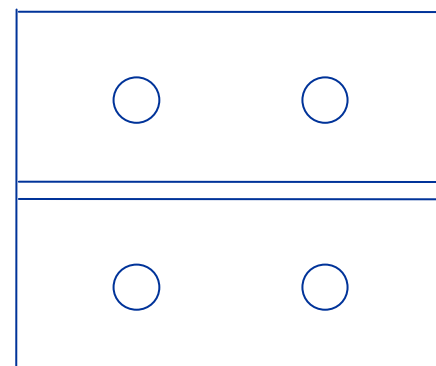
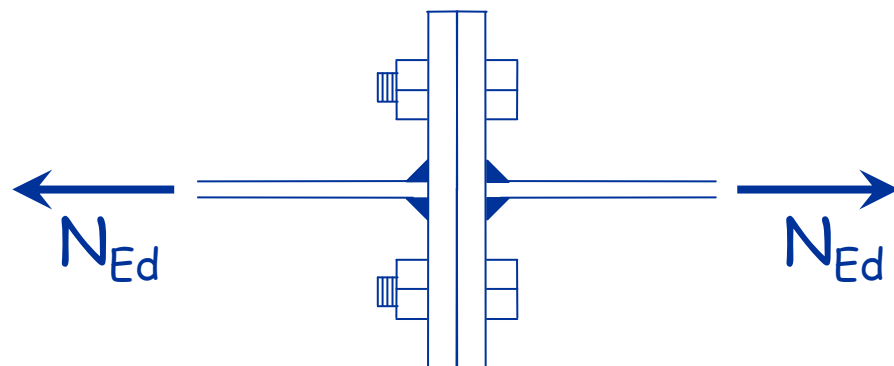
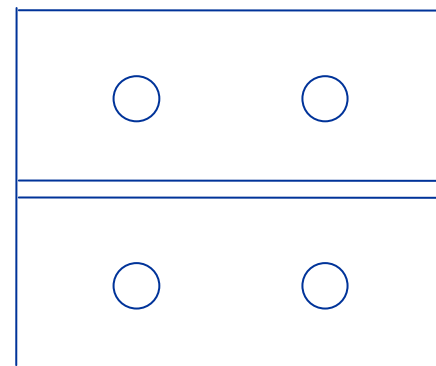
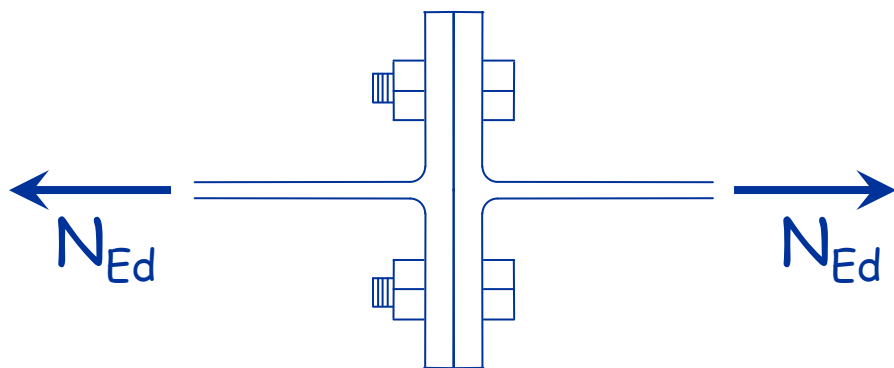
$$B_{p,Rd} = 67.9 \text{ kN}$$

Il collegamento è verificato

Occorre però verificare anche la resistenza del piatto

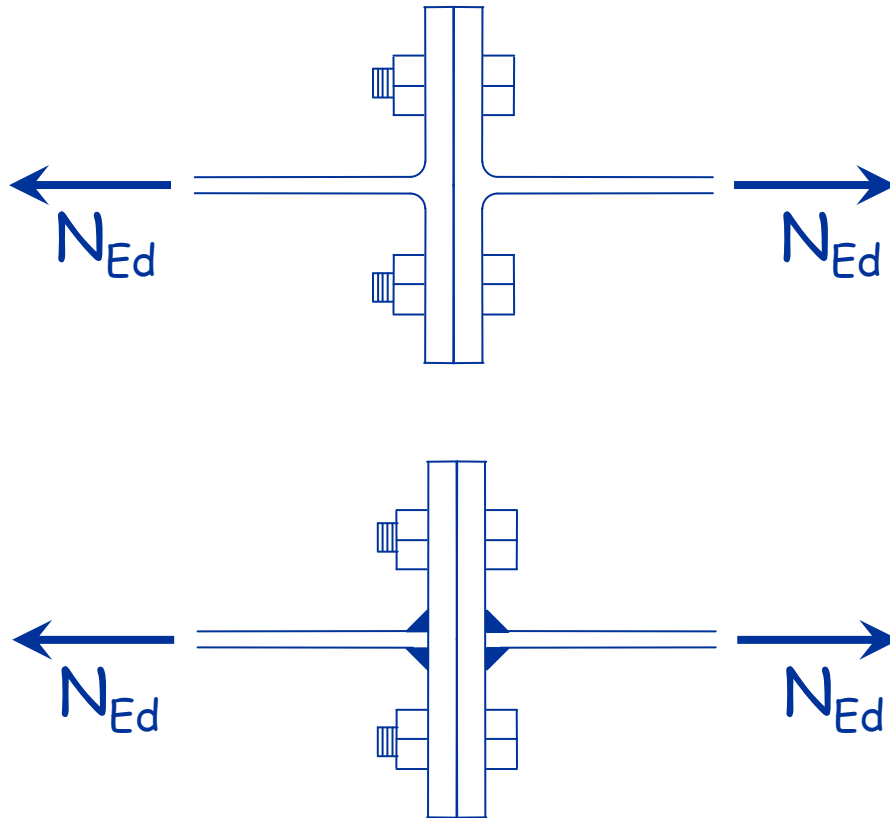
Collegamento a T equivalente
(T stub)

Collegamento di elementi a T equivalente



I risultati sono utili per la verifica di collegamenti più complessi (es. collegamenti trave-colonna)

Collegamento di elementi a T equivalente

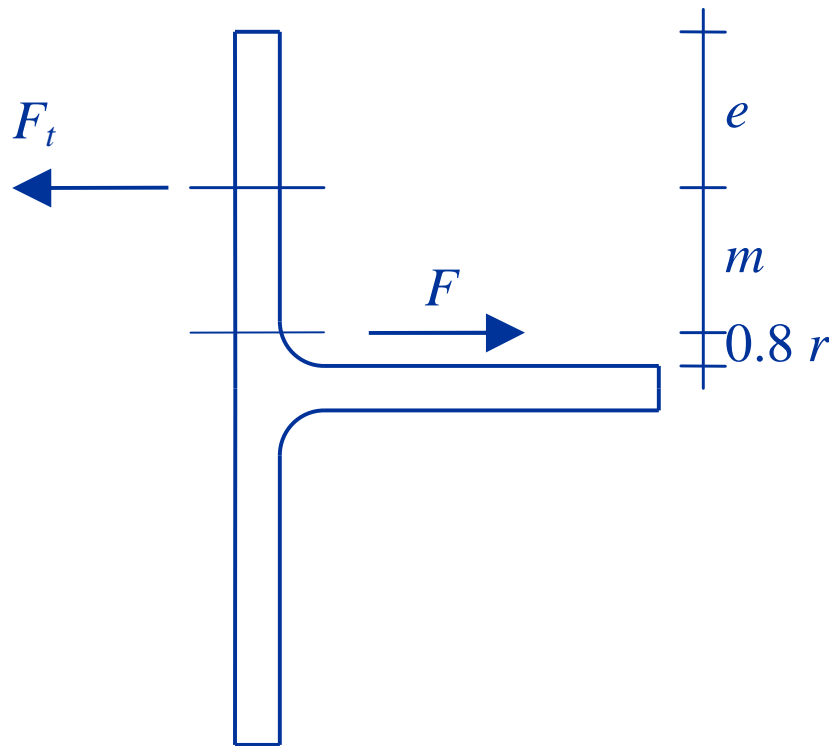


Verifiche

- Bulloni
 - Rottura a trazione
 - Punzonamento flangia
- Flangia
 - Bisogna considerare diversi meccanismi di collasso

I risultati sono utili per la verifica di collegamenti più complessi (es. collegamenti trave-colonna)

Indicazioni geometriche



e distanza asse bullone
estremo flangia

m distanza asse bullone
sezione da verificare

Nota:

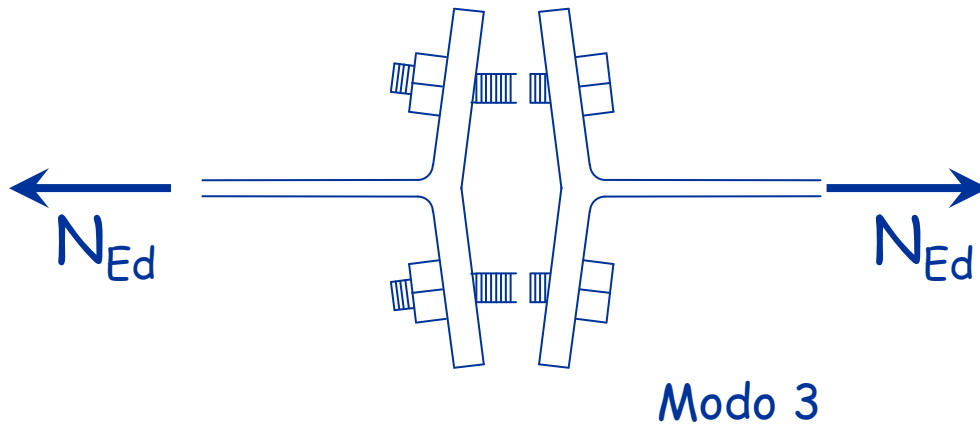
la verifica a flessione
della flangia va fatta
ad una distanza $0.8 r$
dal filo piatto

oppure
 $0.8 a \sqrt{2}$

L_{eff} larghezza efficace della flangia
(ortogonale al piano della figura)

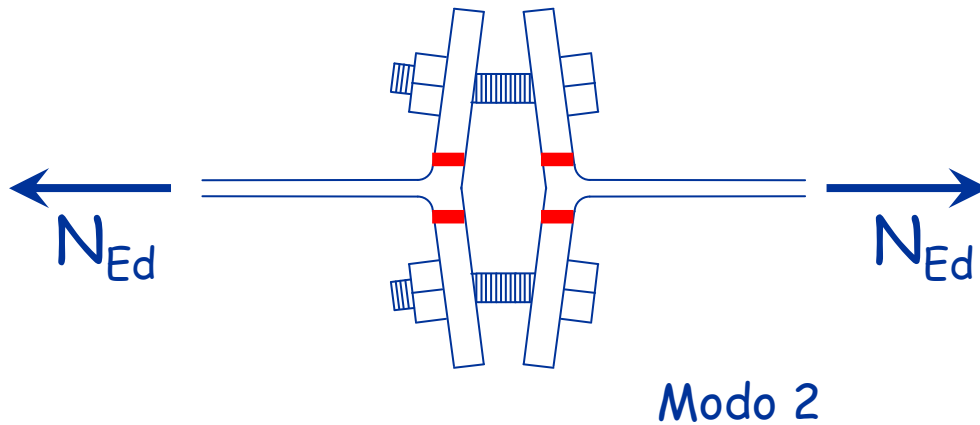
Meccanismi di collasso del bullone/flangia

- Rottura a trazione del bullone
(o a punzonamento della flangia)



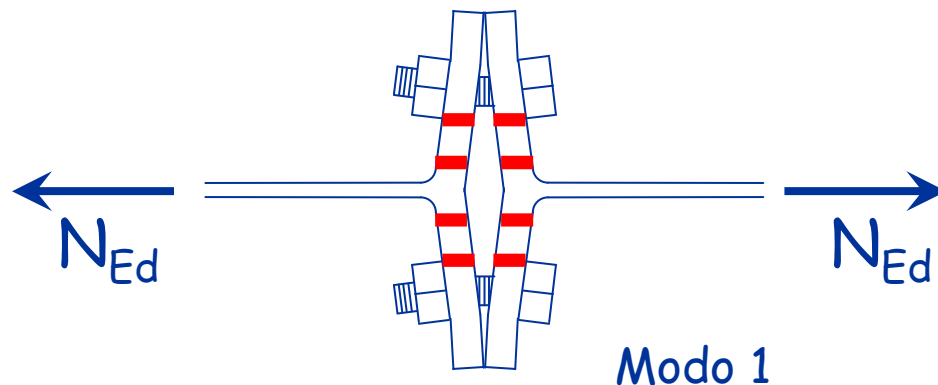
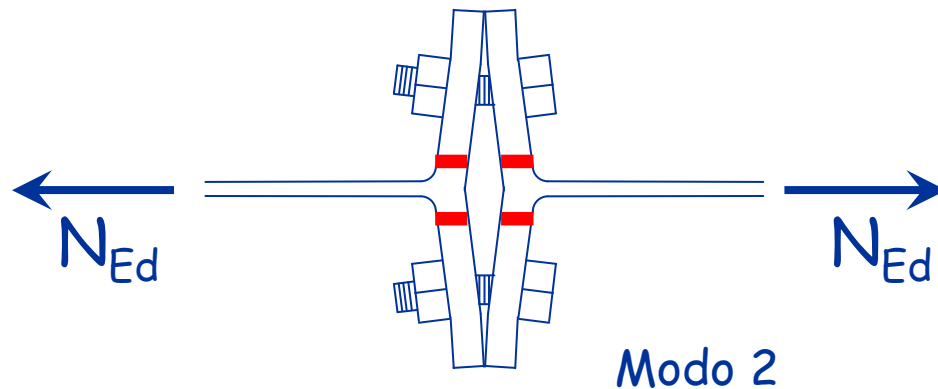
Meccanismi di collasso della flangia

- Rottura del piatto per flessione (senza effetto leva)



Meccanismi di collasso della flangia

- Rottura del piatto per flessione (con effetto leva)

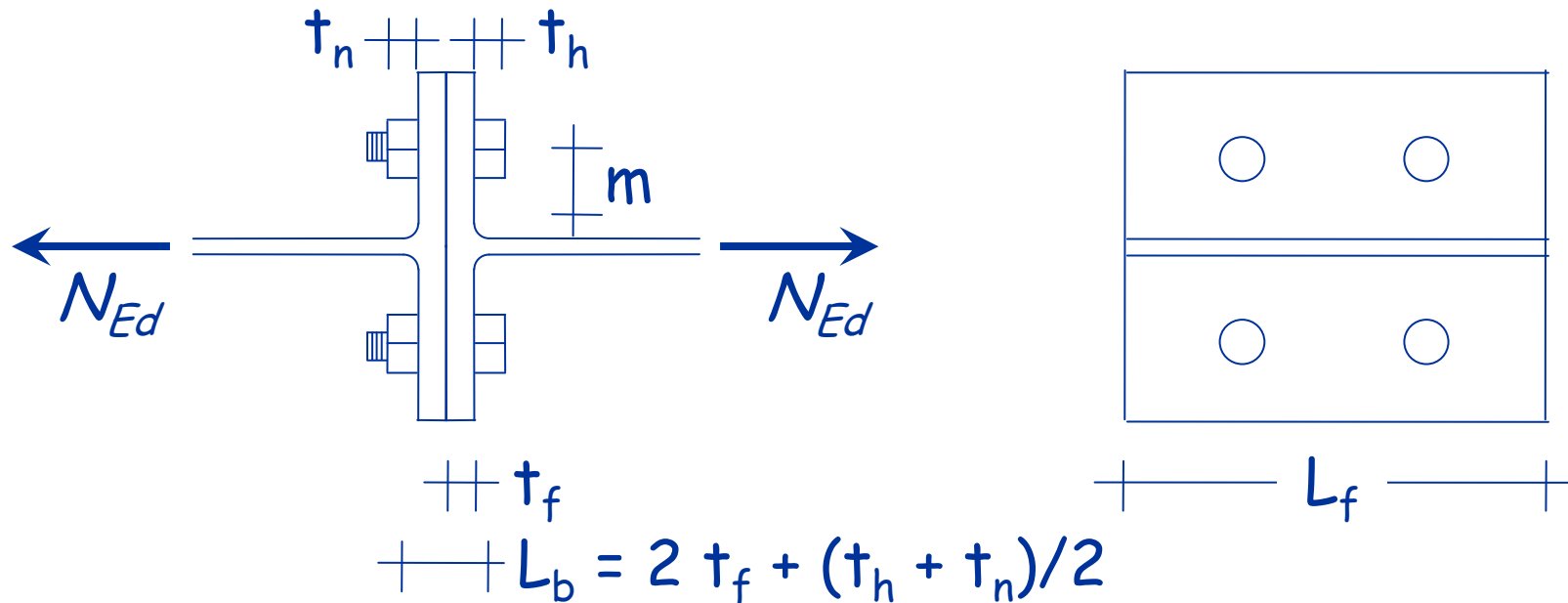


L'effetto leva

- incrementa la forza sollecitante dei bulloni
- modifica la modalità di collasso della flangia

Irrigidire l'elemento se si vuole evitare questo effetto

Effetto leva



Non si ha effetto leva se la piastra è spessa, ovvero

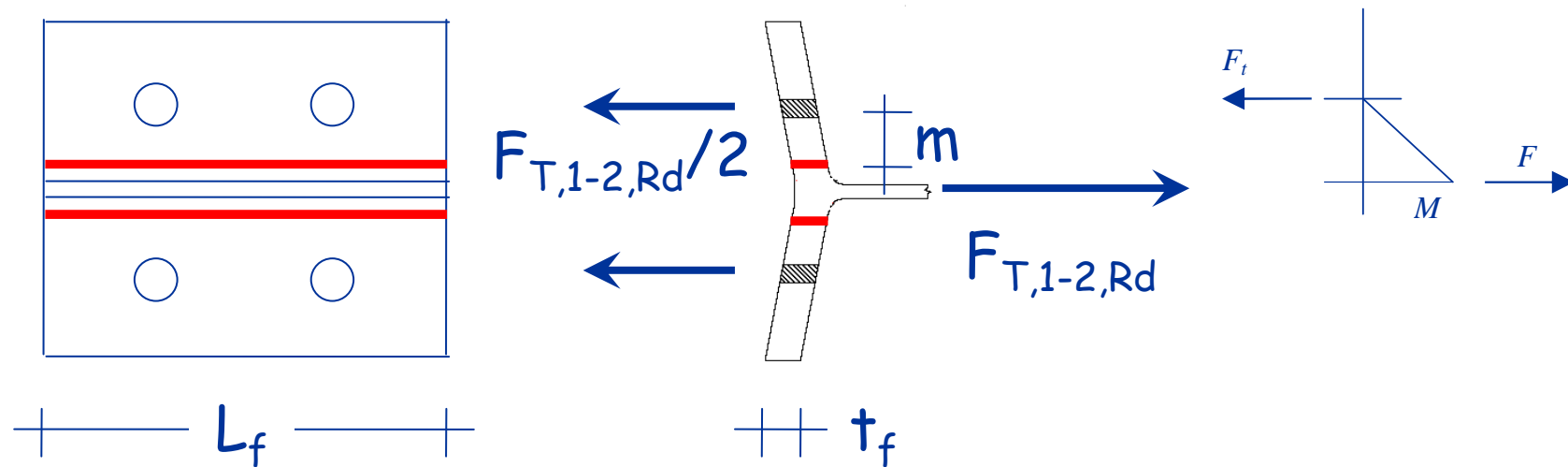
$$L_b \geq \frac{8.8 m^3 A_{res}}{L_f t_f^3}$$

L_b lunghezza parte del bullone sottoposta a trazione

EN 1993, parte 1-8, punto 6.2.4.1

Meccanismi di collasso in assenza di effetto leva

Meccanismo 2: plasticizzazione della flangia

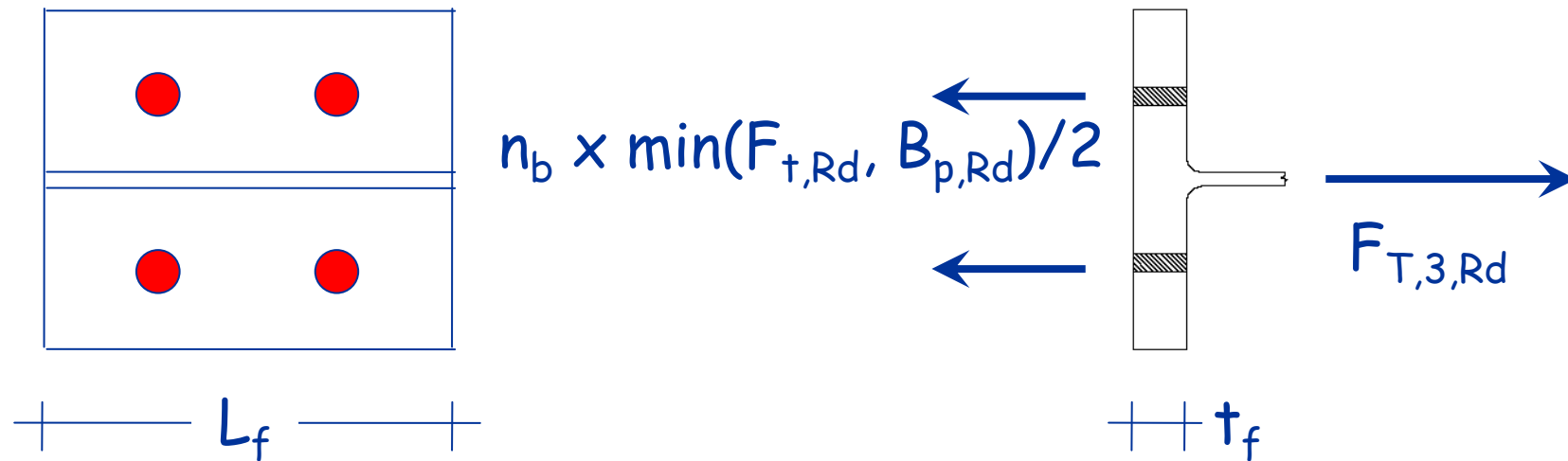


$$M_{pl,Rd} = W_{pl} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{b_f t_f^2}{4} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad \Rightarrow \quad F_{T,2,Rd} = \frac{2 M_{pl,Rd}}{m}$$

EN 1993, parte 1-8, punto 6.2.4.1

Meccanismi di collasso in assenza di effetto leva

Meccanismo 3: collasso bulloni

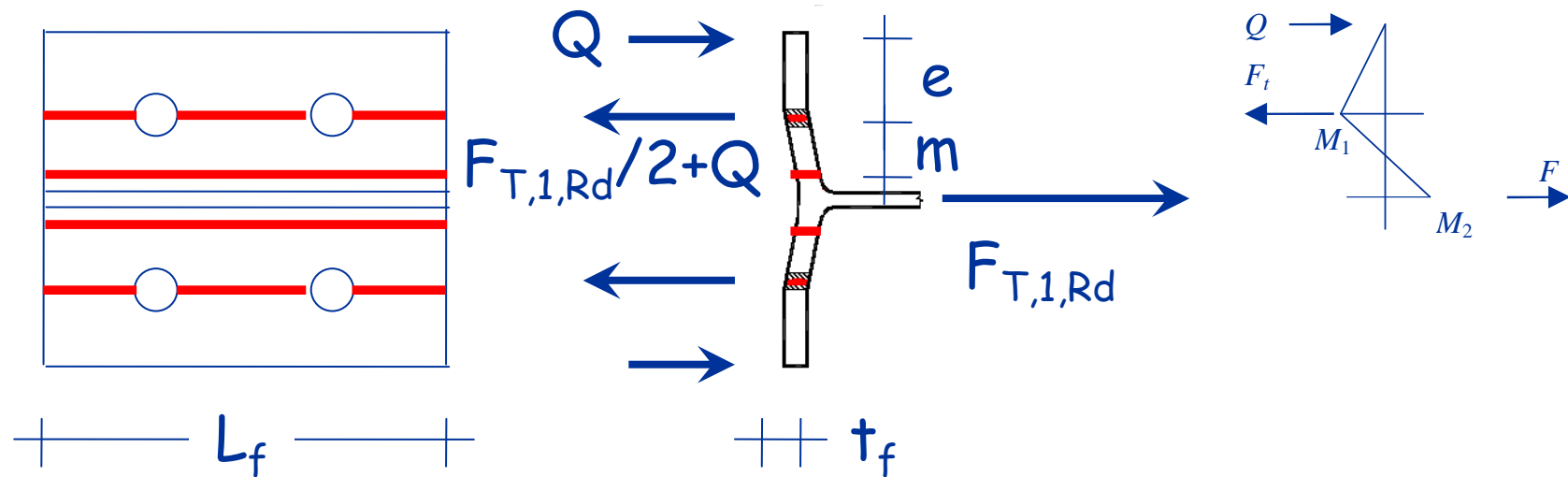


n_b numero di bulloni

$$F_{T,3,Rd} = n_b \min(F_{t,Rd}, B_{p,Rd})$$

Meccanismi di collasso in presenza di effetto leva

Meccanismo 1: plasticizzazione della flangia



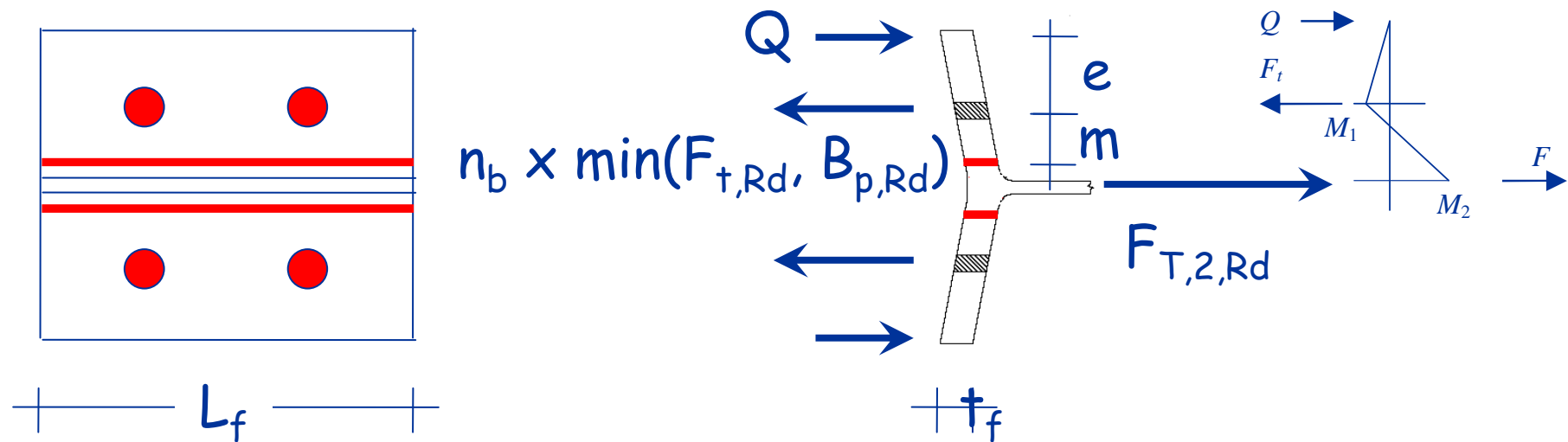
$$Q = M_{pl,Rd} / e$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 M_{pl,Rd}}{m} \quad \text{con} \quad M_{pl,Rd} = \frac{b_f t_f^2}{4} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

EN 1993, parte 1-8, punto 6.2.4.1

Meccanismi di collasso in presenza di effetto leva

Meccanismo 2: plasticizzazione della flangia



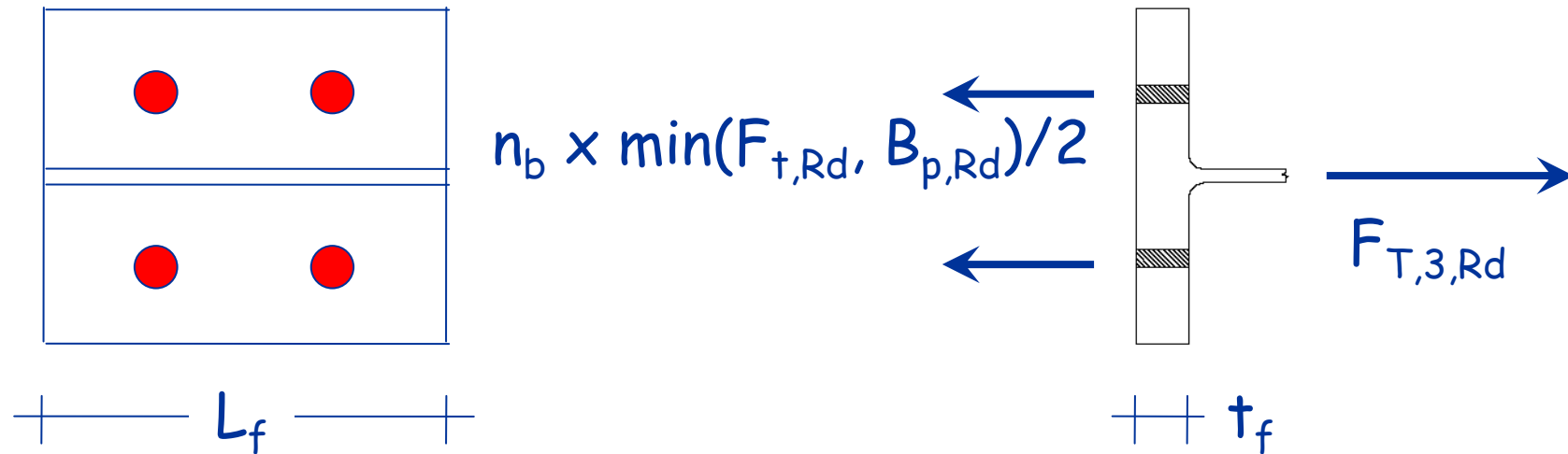
$$Q = [n_b \min(F_{t,Rd}, B_{p,Rd}) - F_{T,2,Rd}] / 2$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 M_{pl,Rd} + n_b \min(F_{t,Rd}, B_{p,Rd}) e}{m + e}$$

EN 1993, parte 1-8, punto 6.2.4.1

Meccanismi di collasso in presenza di effetto leva

Meccanismo 3: collasso bulloni

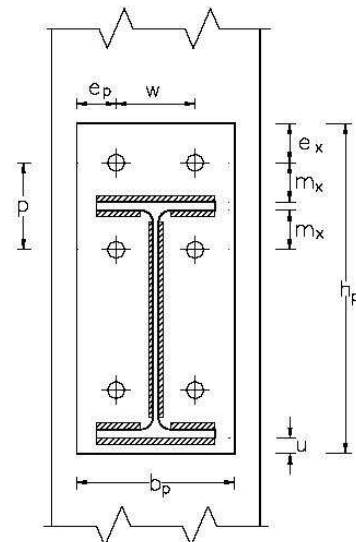
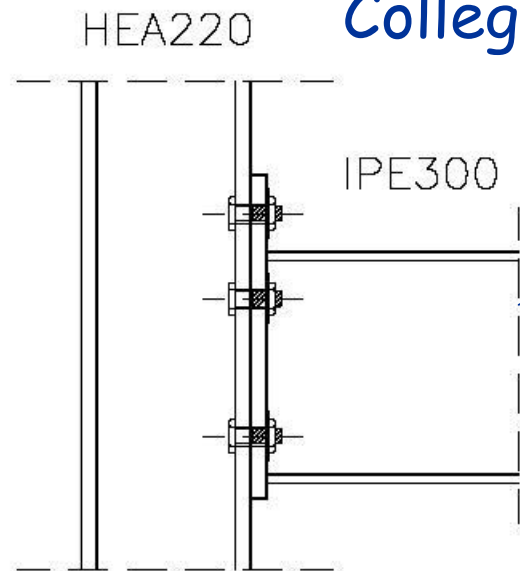


n_b numero di bulloni

$$F_{T,3,Rd} = n_b \min(F_{t,Rd}, B_{p,Rd})$$

Esempio

Collegamento flangiato trave colonna



Acciaio

da definire

Bulloni

da definire

Piatto

$t_p = 15 \text{ mm}$

$b_p = 200 \text{ mm}$

$h_p = 420 \text{ mm}$

$e_p = 50 \text{ mm}$

$m_x = e_x = 50 \text{ mm}$

$u = 20 \text{ mm}$

Saldature

$a_w = 4 \text{ mm}$

$a_f = 6 \text{ mm}$

Colonna

$t_{wc} = 7 \text{ mm}$

$t_{fc} = 11 \text{ mm}$

$r_c = 18 \text{ mm}$

Trave

$t_{fb} = 10.7$

$t_{wb} = 7.1$

Esempio

Collegamento flangiato trave colonna

La trazione corrispondente a M_{Rd} è portata dai 4 bulloni superiori

- Valuto la trazione
- Dimensiono i bulloni a trazione

MEd	100	kNm											
braccio coppia interna				289.3	mm								
forza di trazione			FEd	345.7	kN								
numero bulloni				4									
forza su un bullone			Ft,Ed	86.4	kN								
dimensionamento bullone	per dare sufficiente resistenza a trazione												
classe	6.8			area Ares necessaria	200.0	mm2	>	M18					
fub	600	MPa		scelgo	M20								
					d	20	mm						
					A	314	mm2						
					Ares	245	mm2						
					dm	32	mm						
					Ft,Rd	105.8	kN	verificato					

$$F_{Ed} = 345.7 \text{ kN}$$

$$F_{t,Rd} = 86.4 \text{ kN per 1 bullone}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{M2}}$$

Vedi file Bulloni, foglio Flangia

Esempio

Collegamento flangiato trave colonna

La trazione corrispondente a M_{Rd} è portata dai 4 bulloni superiori

- Valuto la trazione
- Dimensiono i bulloni a trazione
- Valuto lo spessore della flangia necessario per non avere problemi a punzonamento

dimensionamento flangia			per dare sufficiente resistenza a punzonamento								
Acciaio	S275										
f_y	275	MPa		t necessario	4.16	mm					
f_u	430	MPa									

$$B_{p,Rd} = \frac{0.6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}}$$

Vedi file Bulloni, foglio Flangia

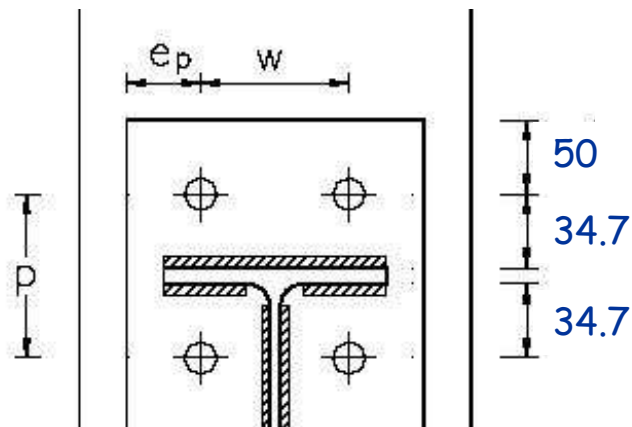
Esempio

Collegamento flangiato trave colonna

Completo la definizione geometrica

- Assegno il valore di p , ricordando che devo lasciare sufficiente distanza tra i fori in verticale, anche per consentire di avvitare i bulloni
posso usare $p = 80 \text{ mm}$
la distanza da filo ala è $(80 - 10.7)/2 = 34.65 \text{ mm}$
- Calcolo m : $m = 34.65 - 0.8 a \sqrt{2} = 27.9 \text{ mm}$

$$a = 6 \text{ mm}$$



Vedi file Bulloni, foglio Flangia

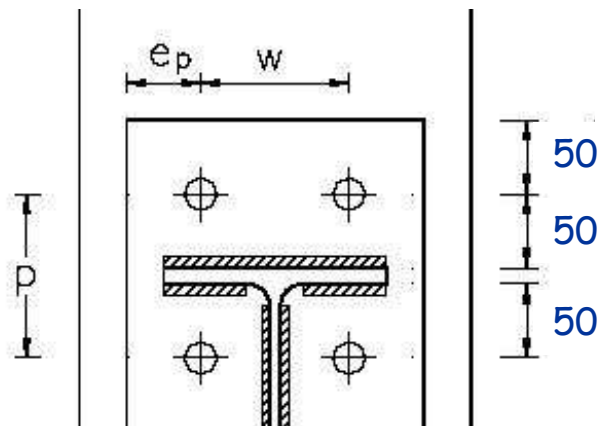
Esempio

Collegamento flangiato trave colonna

Verifico la flangia a flessione

- In assenza di effetto leva

verifica flangia (se t è assegnato)										
spessore flangia			tp	15	mm					$M_{pl,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_y}{4 \gamma_{MO}}$
			Mpl,Rd	2946429	Nmm					
				2.946	kNm					
senza effetto leva			FT2,Rd	211.5	kN	non verificato				$F_{T,2,Rd} = \frac{2 M_{pl,Rd}}{m}$



$$F_{T,Rd} = 211.5 \text{ kN} < F_{Rd}$$

Vedi file Bulloni, foglio Flangia

Esempio

Collegamento flangiato trave colonna

Progetto la flangia in modo che resista a flessione

- Con effetto leva
 - modo 1: è il meno gravoso per la flangia, ma bisogna controllare i bulloni

con effetto leva, modo 1			FT1,Rd	423.0	kN	verificato				$F_{T,1Rd} = \frac{4 M_{pl,Rd}}{m}$
			Q	58.9	kN					
			1 bullone	135.2	kN	non verificato				

$$F_{T,Rd} = 423.0 \text{ kN} > F_{Rd}$$

Ma il bullone non ce la fa

Vedi file Bulloni, foglio Flangia

Esempio

Collegamento flangiato trave colonna

Progetto la flangia in modo che resista a flessione

- Con effetto leva
 - modo 2: è un po' più gravoso per la flangia (rispetto al modo 1) ma il bullone sta bene

con effetto leva, modo 2			FT2,Rd	347.5	kN	verificato	$F_{T,2,Rd} = \frac{2 M_{pl,Rd} + n_b \min(F_{t,Rd}, B_{b,Rd}) e}{m + e}$
			Q	37.9	kN		
			1 bullone	105.8	kN		

$$F_{T,Rd} = 347.5 \text{ kN} > F_{Rd}$$

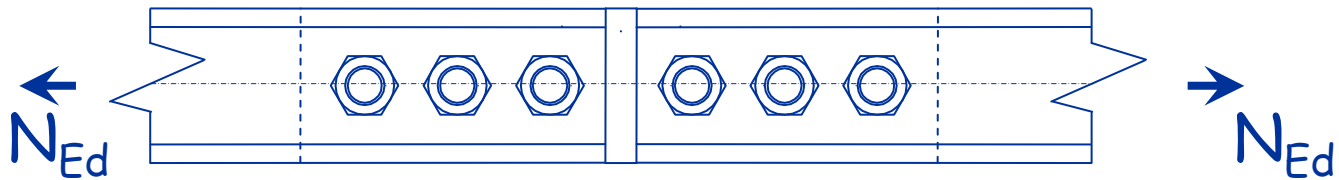
E il bullone sta bene

Vedi file Bulloni, foglio Flangia

Bulloni soggetti a taglio

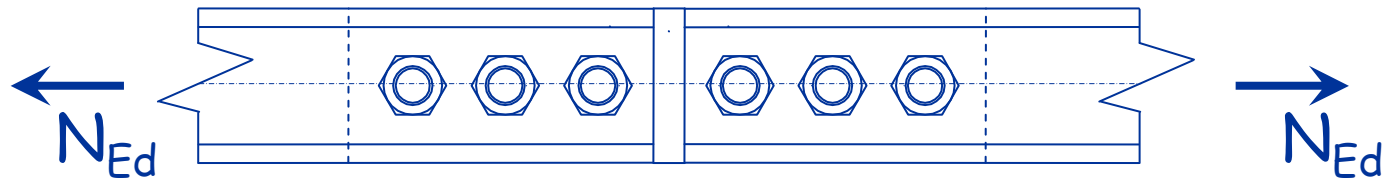
Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

Meccanismi di rottura



Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

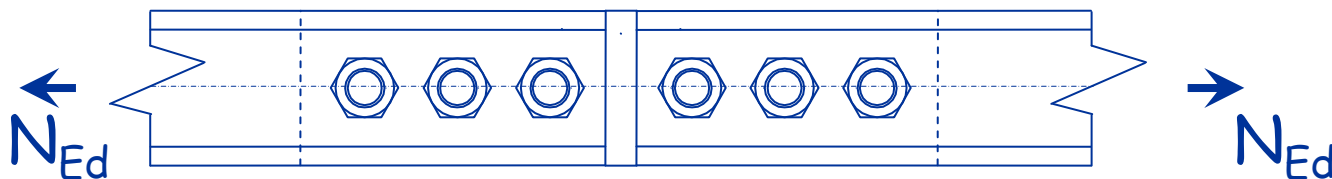
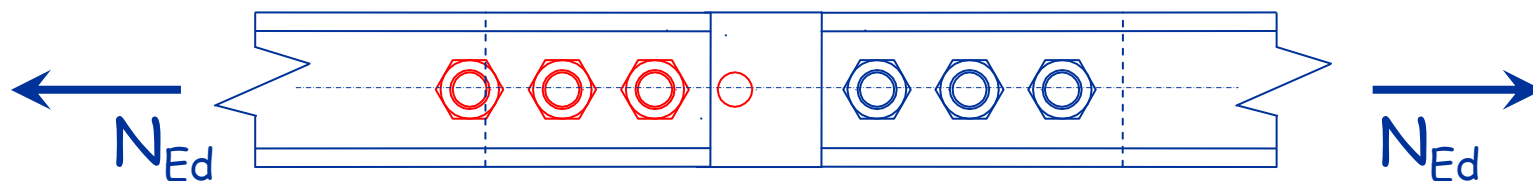
Meccanismi di rottura



Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

Meccanismi di rottura

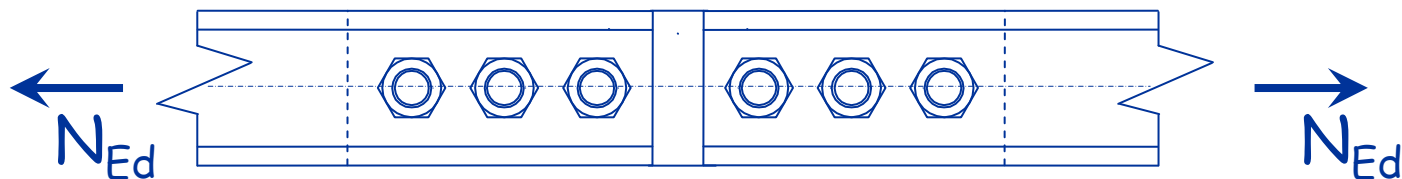
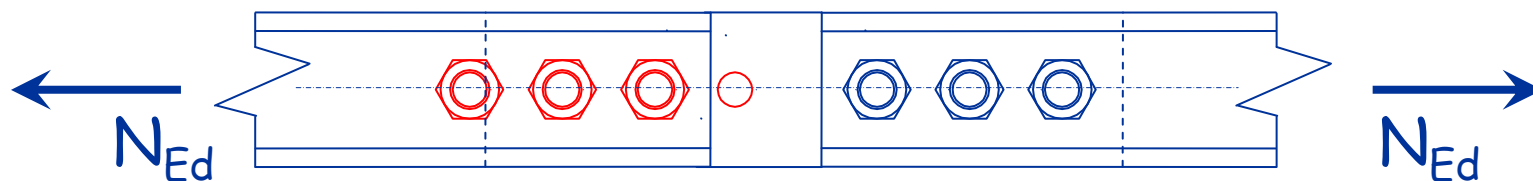
1 - Rottura dei bulloni a taglio



Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

Meccanismi di rottura

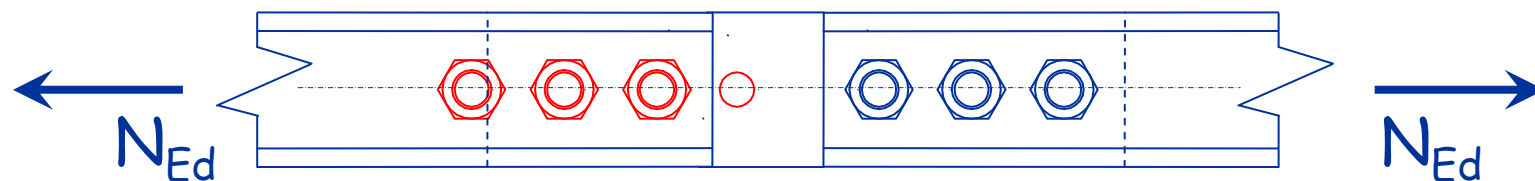
1 - Rottura dei bulloni a taglio



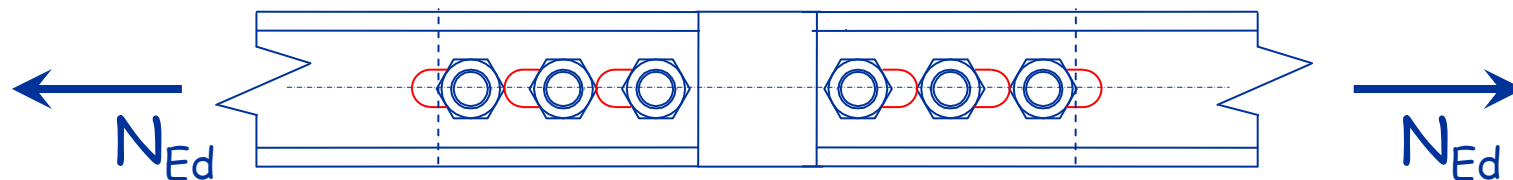
Collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

Meccanismi di rottura

1 - Rottura dei bulloni a taglio

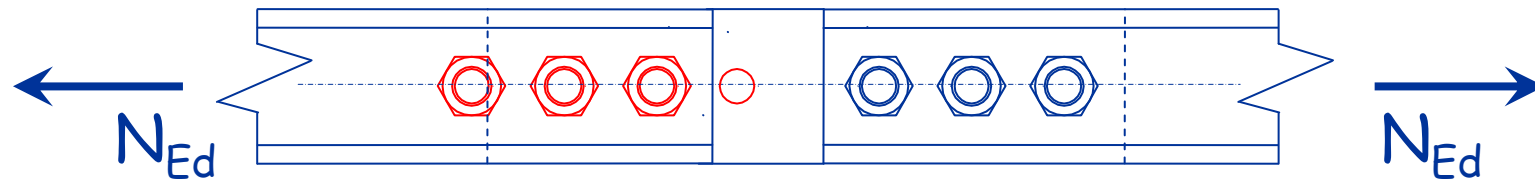


2 - Rifollamento delle lamiere



Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

1 - Rottura dei bulloni a taglio



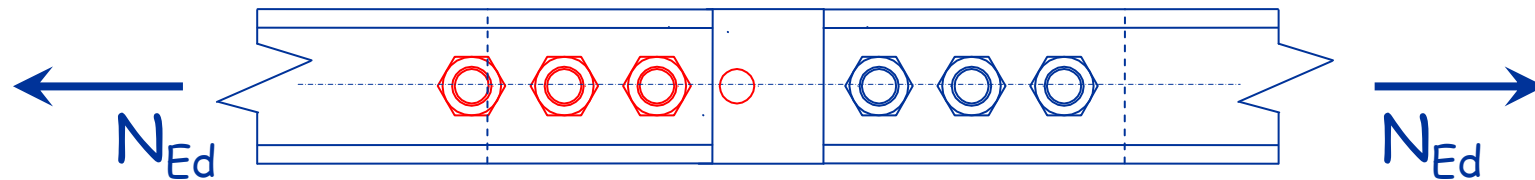
Il bullone si rompe quando la tensione tangenziale sul bullone è pari a $f_{ub} / \sqrt{3}$

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

A Area nominale del bullone

Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

1 - Rottura dei bulloni a taglio



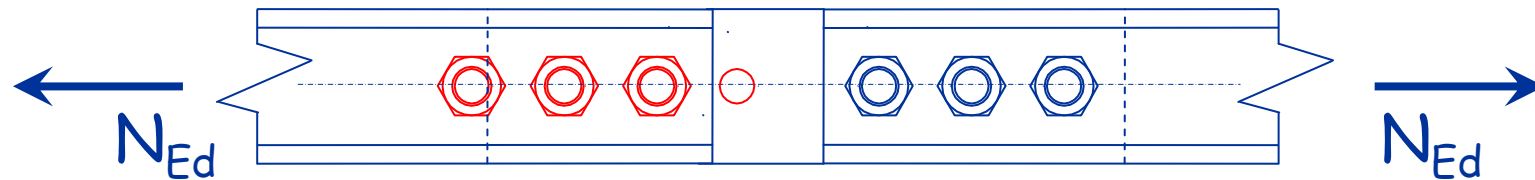
Il bullone si rompe quando la tensione tangenziale sul bullone è pari a $f_{ub} / \sqrt{3}$

$$F_{v,Rd} = \frac{A (0.6 f_{ub})}{\gamma_{M2}}$$

A Area nominale del bullone

Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

1 - Rottura dei bulloni a taglio



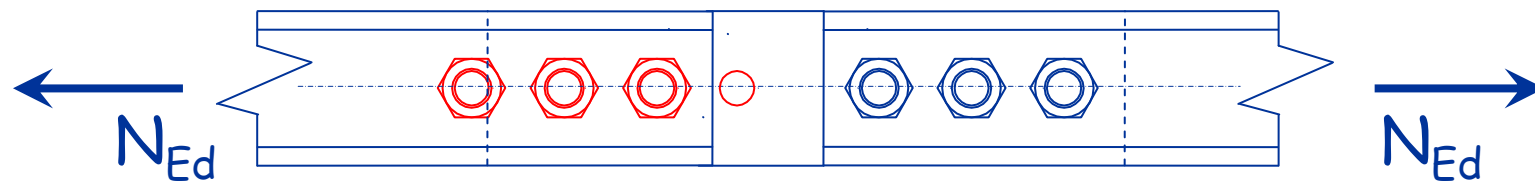
Se il piano di taglio non attraversa la parte filettata
del bullone:

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 A f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (\text{per tutte le classi di bulloni})$$

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:

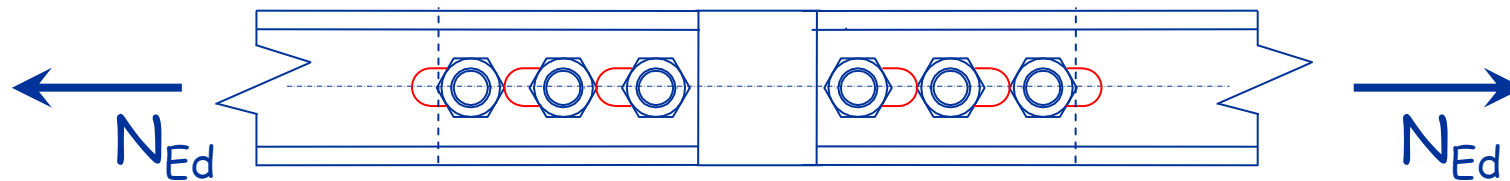
$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (\text{per bulloni di classe 4.6, 5.6 ed 8.8})$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0.5 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (\text{per bulloni di classe 6.8 e 10.9})$$

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 $k \propto f_u$

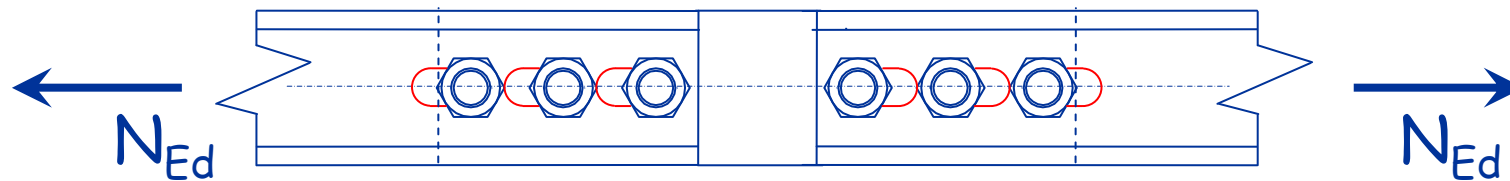
$$F_{b,max} = k \propto d t_p f_u$$

d Diametro del bullone

t_p Spessore della lamiera

Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

2 - Rifollamento delle lamiere



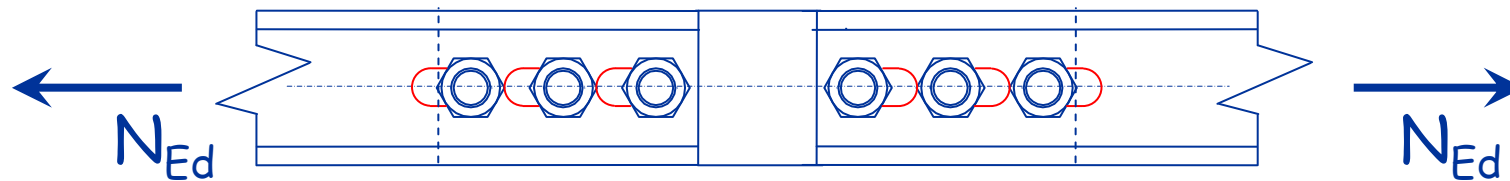
Si ottiene quando la tensione esercitata dal bullone sulla lamiera raggiunge il valore convenzionale $k \propto f_u$

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

Bulloni: di bordo	$k = \min\left(\frac{2.8 e_2}{d_0} - 1.7, 2.5\right)$	$\alpha = \min\left(\frac{e_1}{3 d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1\right)$
interni	$k = \min\left(\frac{1.4 p_2}{d_0} - 1.7, 2.5\right)$	$\alpha = \min\left(\frac{p_1}{3 d_0} - 0.25, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1\right)$

Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

2 - Rifollamento delle lamiere



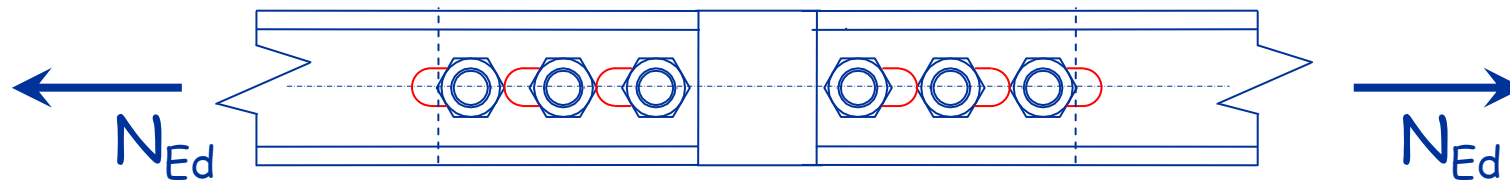
Si ottiene quando la tensione esercitata dal bullone sulla lamiera raggiunge il valore convenzionale $k \propto f_u$

$$F_{b,Rd} = \frac{k \alpha d t_p f_u}{\gamma_{M2}}$$

Bulloni: di bordo	$k = \min \left(\frac{2.8 e_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right)$	$\alpha = \min \left(\frac{e_1}{3 d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$
interni	$k = \min \left(\frac{1.4 p_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right)$	$\alpha = \min \left(\frac{p_1}{3 d_0} - 0.25, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$

Resistenza di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

2 - Rifollamento delle lamiere



Osservazione su k :

$$F_{b,Rd} = \frac{k \alpha d t_p f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2.5 \alpha d t_p f_u}{\gamma_{M2}}$$

Secondo le vecchie norme:

Bulloni:
di bordo

$$e_2 \geq 1.5 d_0$$

$$k = \min \left(\frac{2.8 e_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right) = 2.5$$

interni

$$p_2 \geq 3 d_0$$

$$k = \min \left(\frac{1.4 p_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right) = 2.5$$

Verifica di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio

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

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} = \frac{0.6 A f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (\text{rottura nella parte filettata})$$

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} = \frac{0.6 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad \text{o} \quad F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} = \frac{0.5 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{M2}}$$

2 - Rifollamento della lamiera

$$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd} = \frac{k \alpha d t_p f_u}{\gamma_{M2}}$$

Bulloni:
di bordo

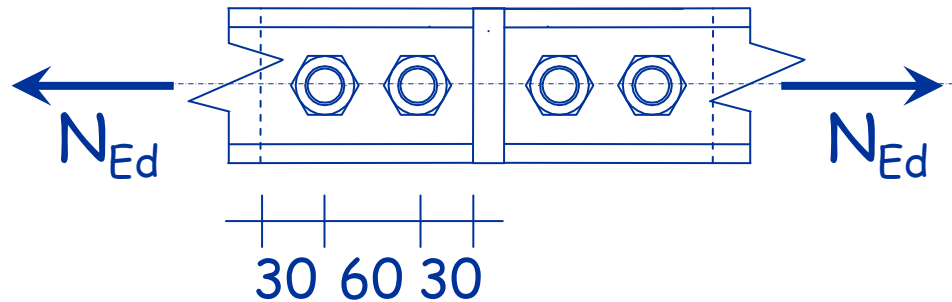
$$k = \min \left(\frac{2.8 e_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right) \quad \alpha = \min \left(\frac{e_1}{3 d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$$

interni

$$k = \min \left(\frac{1.4 p_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right) \quad \alpha = \min \left(\frac{p_1}{3 d_0} - 0.25, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$$

Esempio

Dati:



N_{Ed}	100 kN
Acciaio	S235
Asta	2 U 65x42 $t_w = 5.5$ mm
2 Bulloni	M16, classe 5.6
Piatto	$t_p = 10$ mm

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

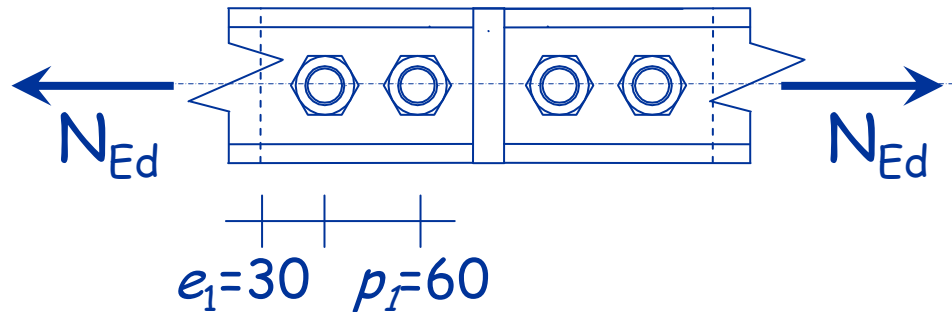
$$A = 201 \text{ mm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 A f_{ub}}{\gamma_{Mb}} = \frac{0.6 \times 201 \times 500}{1.25 \times 10^3} = 48.2 \text{ kN}$$

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

Esempio

Dati:



N_{Ed}	100 kN
Acciaio	S235
Asta	2 U 65x42
	$t_w = 5.5 \text{ mm}$
2 Bulloni	M16, classe 5.6
Piatto	$t_p = 10 \text{ mm}$

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

$$\alpha = \min\left(\frac{e_1}{3 d_0}, \frac{p_1}{3 d_0} - 0.25, \left(\frac{f_{ub}}{f_u}\right), 1\right) = \min(0.588, 0.926, 1.39, 1)$$

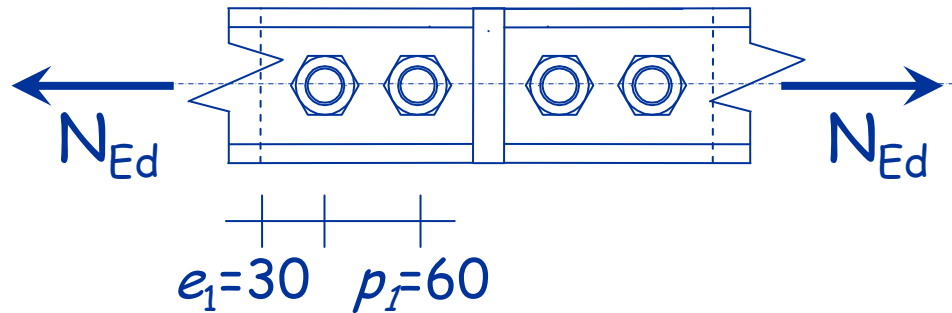
$$k = 2.5$$

$$d = 16 \text{ mm} \Rightarrow d_0 = 17 \text{ mm}$$

Quasi sempre > 1

Esempio

Dati:



N_{Ed}	100 kN
Acciaio	S235
Asta	2 U 65x42
	$t_w = 5.5$ mm
2 Bulloni	M16, classe 5.6
Piatto	$t_p = 10$ mm

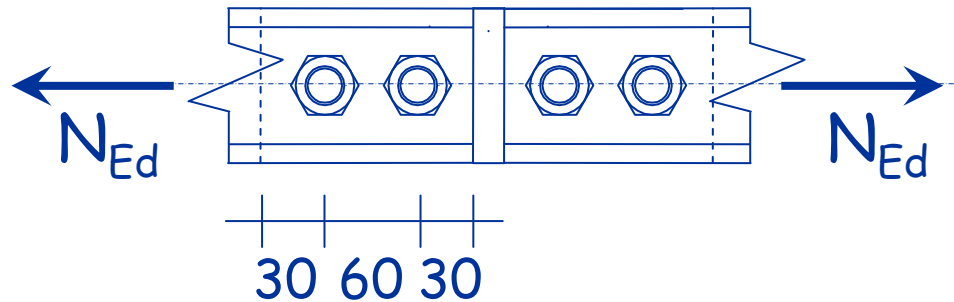
2 - Determinazione di $F_{b,Rd}$ (del piatto)

$$k = 2.5 \quad \alpha = 0.588$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \times 0.588 \times 16 \times 10 \times 360}{1.25 \times 10^3} = 67.7 \text{ kN}$$

Esempio

Dati:



N_{Ed}	100 kN
Acciaio	S235
Asta	2 U 65x42 $t_w = 5.5$ mm
2 Bulloni	M16, classe 5.6
Piatto	$t_p = 10$ mm

3 - Verifica

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

$$2 F_{v,Rd} = 2 \times 48.2 = 96.4 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd} = 67.7 \text{ kN}$$

Il collegamento è verificato

Collegamenti bullonati a taglio

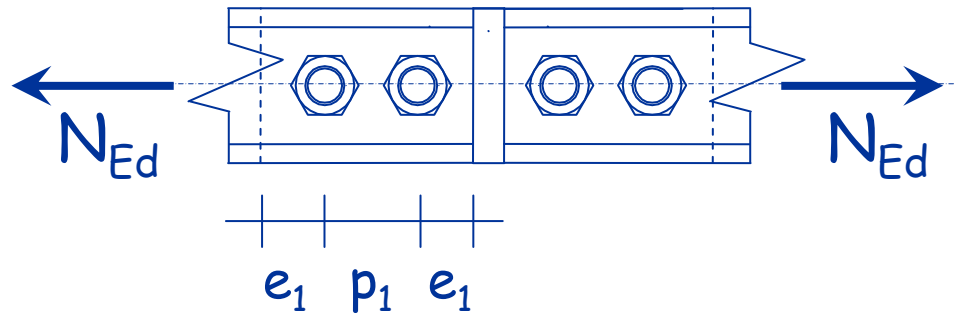
suggerimento progettuale

Dimensionamento:

- Progettare i bulloni in base alla resistenza a taglio
 - individuare il diametro massimo che si può usare (in base alle dimensioni dell'elemento da forare, ad esempio $d < 1/3 h$ profilato)
 - stabilire classe e diametro dei bulloni
 - determinare numero dei bulloni
- Usare la verifica a rifollamento per definire la distanza minima tra i bulloni
 - Controllare che siano soddisfatte le prescrizioni sulle distanze massime

Esempio

Dati:



N_{Ed}	250 kN
Acciaio	S235
Asta	2 U 65x42
	$t_w = 5.5 \text{ mm}$
Bulloni	M16, classe 5.6
Piatto	$t_p = 10 \text{ mm}$

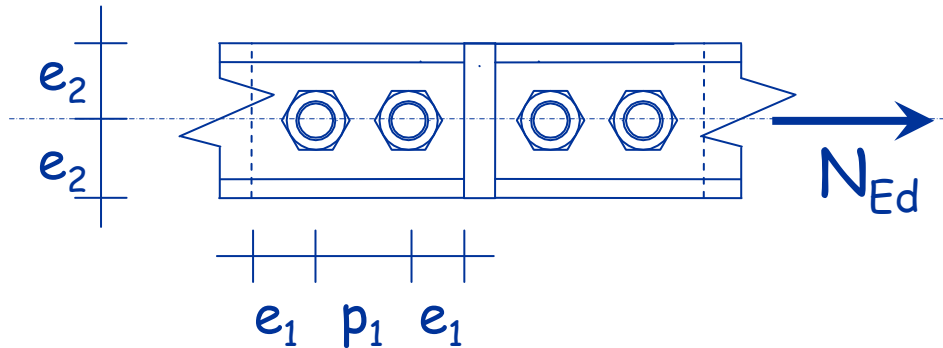
1 - Determinazione del numero di bulloni

$$n_b = \frac{N_{Ed}}{2 F_{v,Rd}} = \frac{250}{2 \times 48.2} = \cancel{2.59} \quad \text{Uso 3 bulloni}$$

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

Esempio

Dati:



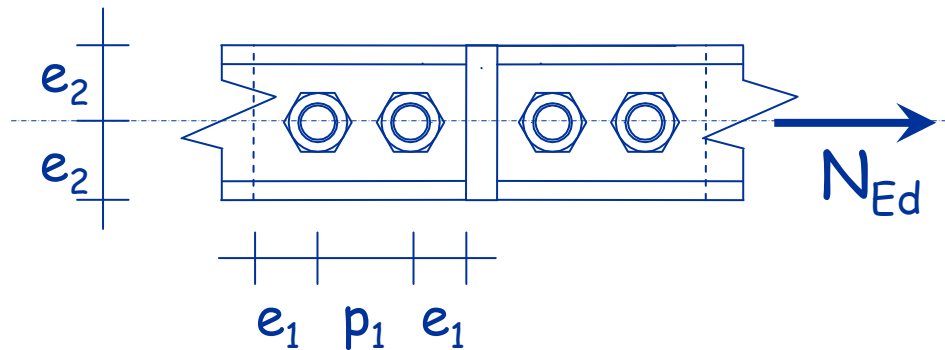
N_{Ed}	250 kN
Acciaio	S235
Asta	2 U 65x42
	$t_w = 5.5 \text{ mm}$
Bulloni	M16, classe 5.6
Piatto	$t_p = 10 \text{ mm}$

2 - Determinazione delle distanze (calcolo k)

$$\frac{e_2}{d_0} = \frac{65/2}{17} = 1.91 \geq 1.5 \quad \Rightarrow \quad k = 2.5$$

Esempio

Dati:



N_{Ed}	250 kN
Acciaio	S235
Asta	2 U 65x42
	$t_w = 5.5 \text{ mm}$
Bulloni	M16, classe 5.6
Piatto	$t_p = 10 \text{ mm}$

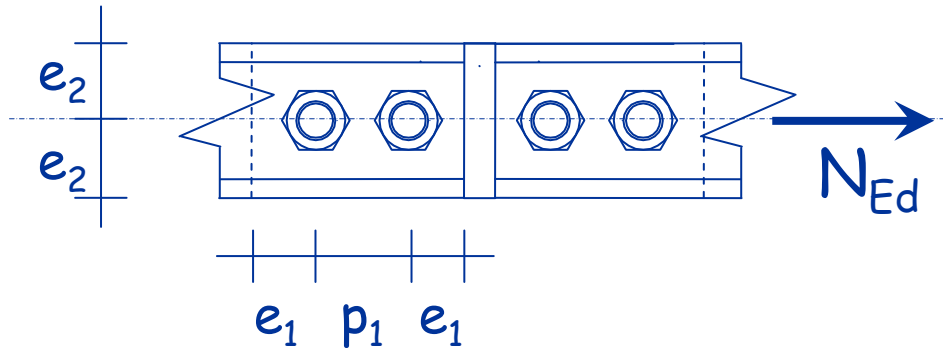
2 - Determinazione delle distanze (calcolo α necessario)

$$F_{b,Rd} = \frac{N_{Ed}}{n_b} = \frac{250}{3} = 83.3 \text{ kN}$$

$$\alpha = \frac{\gamma_{M2} (N_{Ed} / 3)}{k d t_p f_u} = \frac{1.25 \times 83.3 \times 10^3}{2.5 \times 16 \times 10 \times 360} = 0.723$$

Esempio

Dati:



N_{Ed}	250 kN
Acciaio	S235
Asta	2 U 65x42
	$t_w = 5.5 \text{ mm}$
Bulloni	M16, classe 5.6
Piatto	$t_p = 10 \text{ mm}$

2 - Determinazione della distanza e_1 per $\alpha = 0.723$

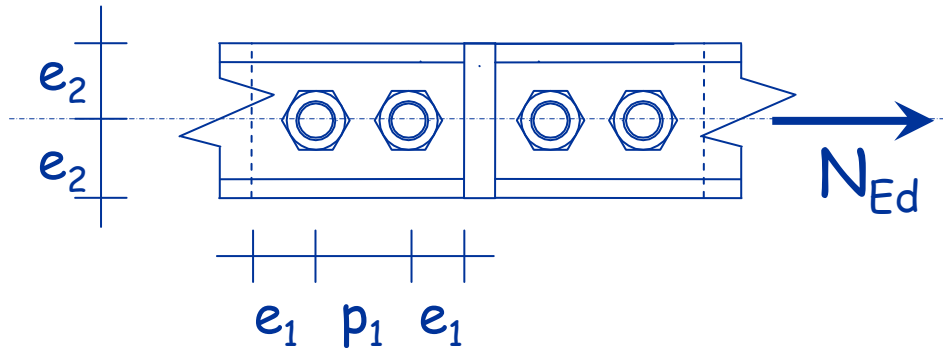
$$\alpha = \min\left(\frac{e_1}{3 d_0}, \frac{p_1}{3 d_0} - 0.25, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1\right)$$

$$e_1 = 35 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{e_1}{3 d_0} \Rightarrow e_1 = 3 \alpha d_0 = 3 \times 0.723 \times 16 = 34.7 \text{ mm}$$

Esempio

Dati:



N_{Ed}	250 kN
Acciaio	S235
Asta	2 U 65x42
	$t_w = 5.5$ mm
Bulloni	M16, classe 5.6
Piatto	$t_p = 10$ mm

2 - Determinazione della distanza p_1 per $\alpha = 0.723$

$$\alpha = \min\left(\frac{e_1}{3 d_0}, \frac{p_1}{3 d_0} - 0.25, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1\right)$$

$$p_1 = 50 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{p_1}{3 d_0} - 0.25 \Rightarrow p_1 = 3 (\alpha + 0.25) d_0 = 46.7 \text{ mm}$$

Verifica di collegamenti bullonati con bulloni sollecitati a taglio e trazione

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

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

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

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

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

Collegamenti bullonati ad attrito

- Tutti i bulloni prima di lavorare a taglio devono superare la resistenza ad attrito
In genere ciò avviene per carichi bassi ed è quindi trascurato
- Lo scorrimento dovuto al gioco foro-bullone provoca deformazioni nella struttura
In genere queste sono accettabili, ma devono essere comunque verificate
- Se si vogliono evitare queste deformazioni si può progettare il collegamento in modo che non superi la resistenza di attrito
 - solo per SLE
 - anche per SLU

Collegamenti bullonati ad attrito

- Si usano in genere bulloni ad alta resistenza
- Resistenza ad attrito:

$$F_{s,Rd} = \frac{n \mu F_{p,C}}{\gamma_{M3}}$$

$F_{p,C}$ forza di precarico

μ coefficiente di attrito

- $\mu = 0.45$ giunzioni sabbiolate e protette
- $\mu = 0.30$ negli altri casi

n numero di superfici di contatto

NTC08, punto 4.2.8.1.1