

Lezione

PONTI E GRANDI STRUTTURE

Prof. Pier Paolo Rossi

Università degli Studi di Catania

Classificazione dei 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

Resistenze da usare

- Sempre i valori ultimi (non quelli di snervamento)

Bulloni: f_{ub}

Saldature:

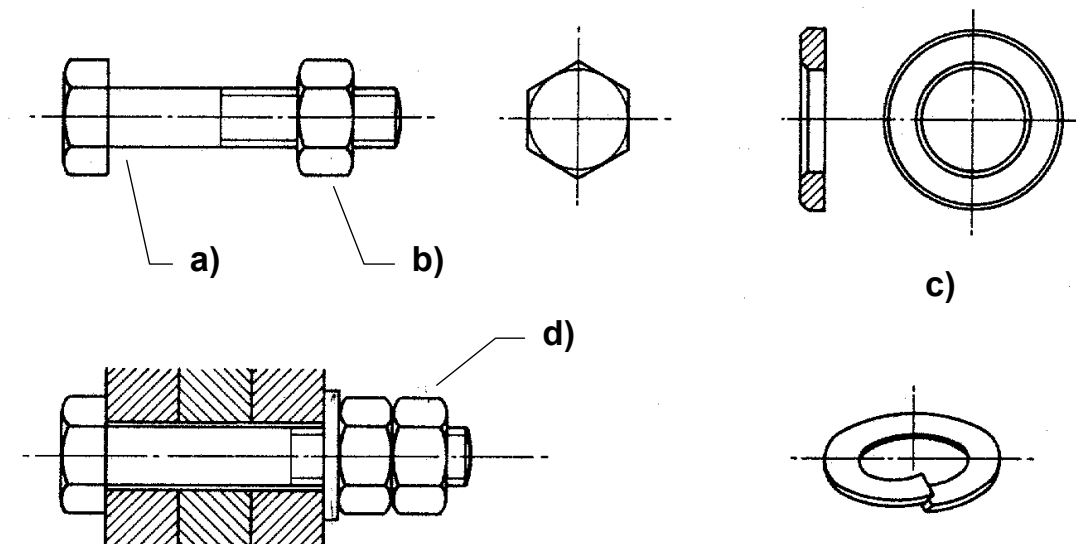
si dovrebbe usare f_{uw} (resistenza della saldatura);
per comodità la si riporta a f_u del materiale base

Collegamenti bullonati

I bulloni

Sono costituiti da:

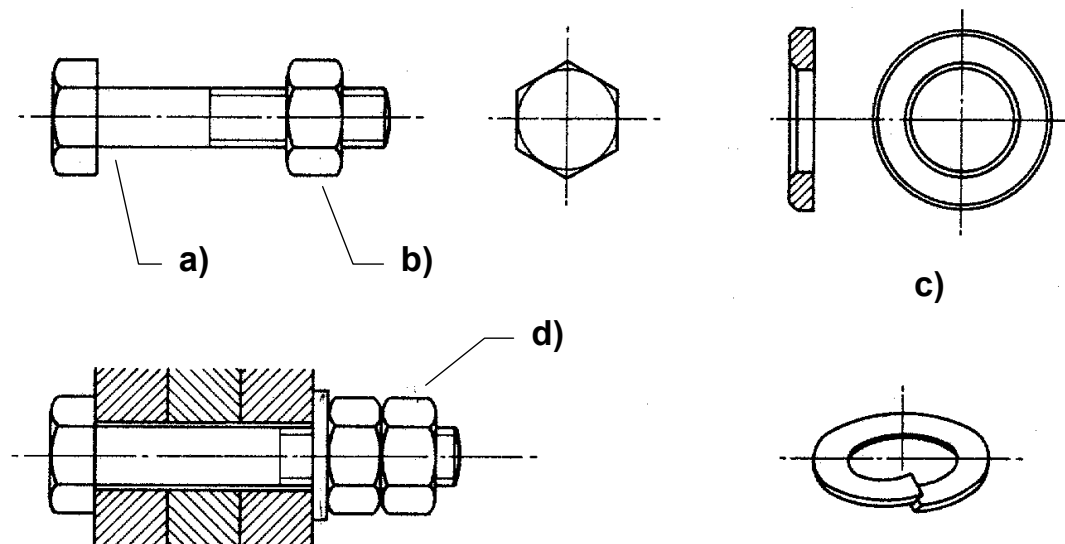
- a) vite con testa esagonale e gambo filettato in tutto o in parte
- b) dado di forma esagonale



I bulloni

Sono costituiti da:

- 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

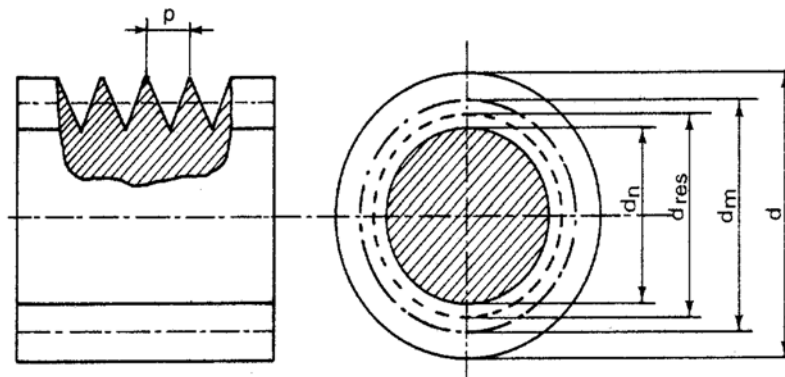
diámetro (mm)	12	14	16	18	20	22	24	27	30
sigla	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30

- 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 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

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

diámetro 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

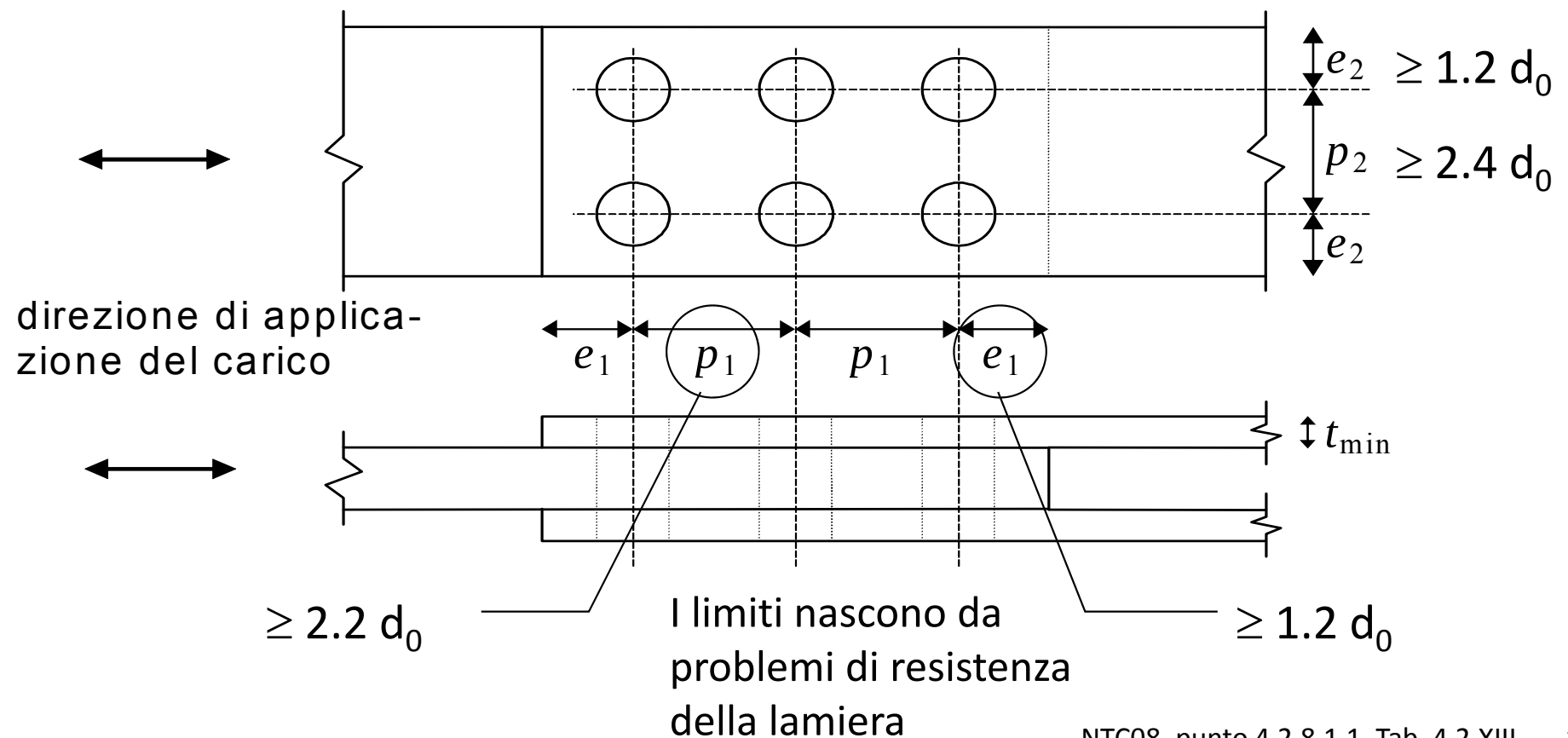
Valori massimi del gioco foro-bullone (mm)

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

I bulloni

Distanze tra fori e foro-bordo

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



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	$4 t + 40 \text{ mm}$	--
e_2	$4 t + 40 \text{ mm}$	--
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

I limiti nascono da problemi di durabilità e resistenza della lamiera

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

I bulloni

Serraggio

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

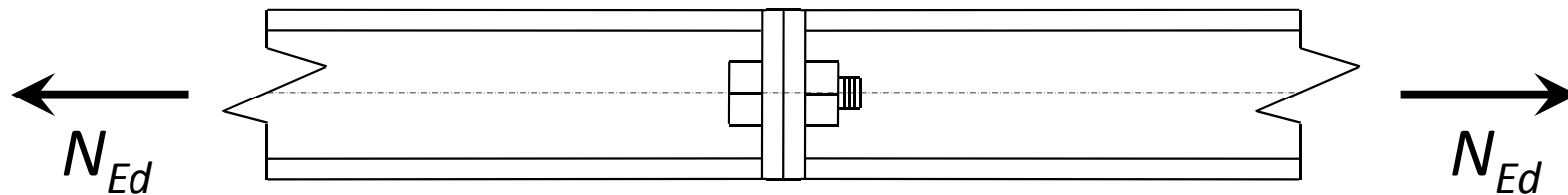
$$F_{p,Cd} = 0.7 \frac{f_{ub} A_{res}}{\gamma_{M7}}$$

$$\gamma_{M7} = 1.10$$

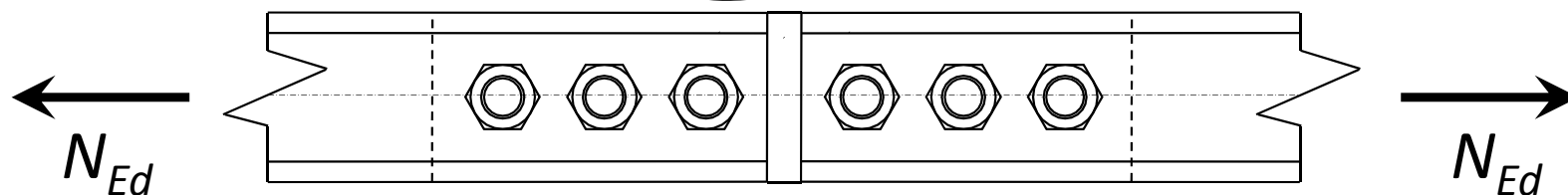
Collegamenti bullonati

Modalità di comportamento

1. Con bulloni sollecitati a trazione



2. Con bulloni sollecitati a taglio

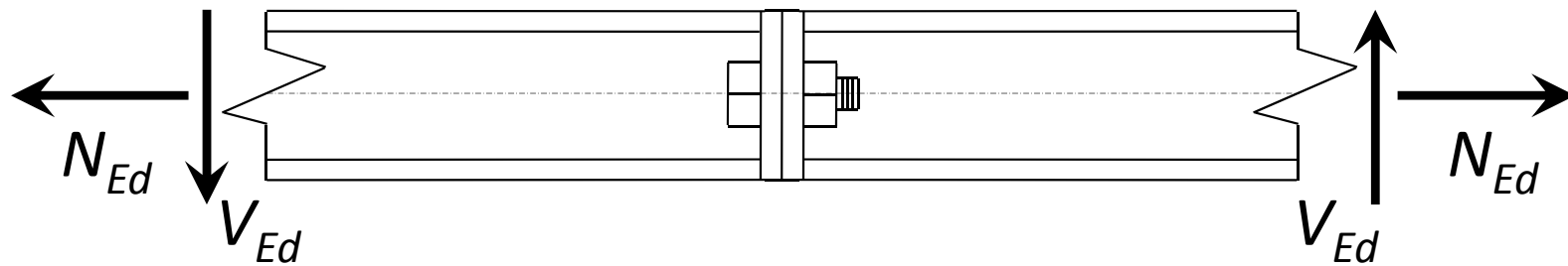


In alternativa:
ad attrito

Collegamenti bullonati

Modalità di comportamento

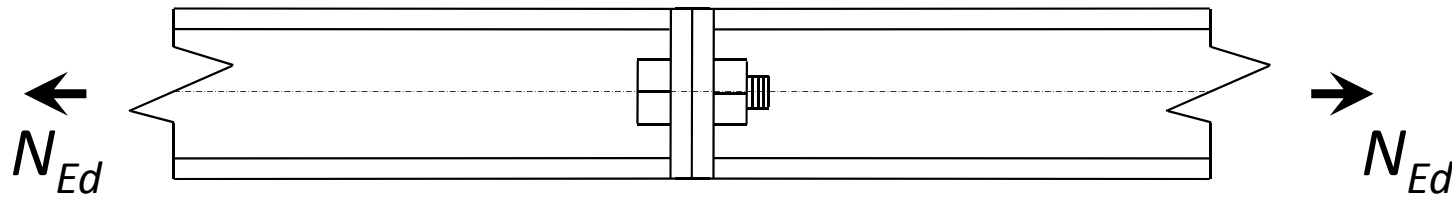
3. Con bulloni sollecitati a trazione e taglio



Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

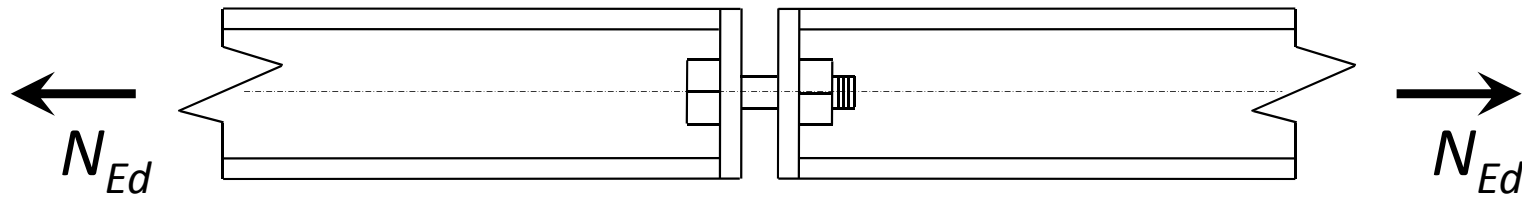
Meccanismi di rottura



Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

Meccanismi di rottura

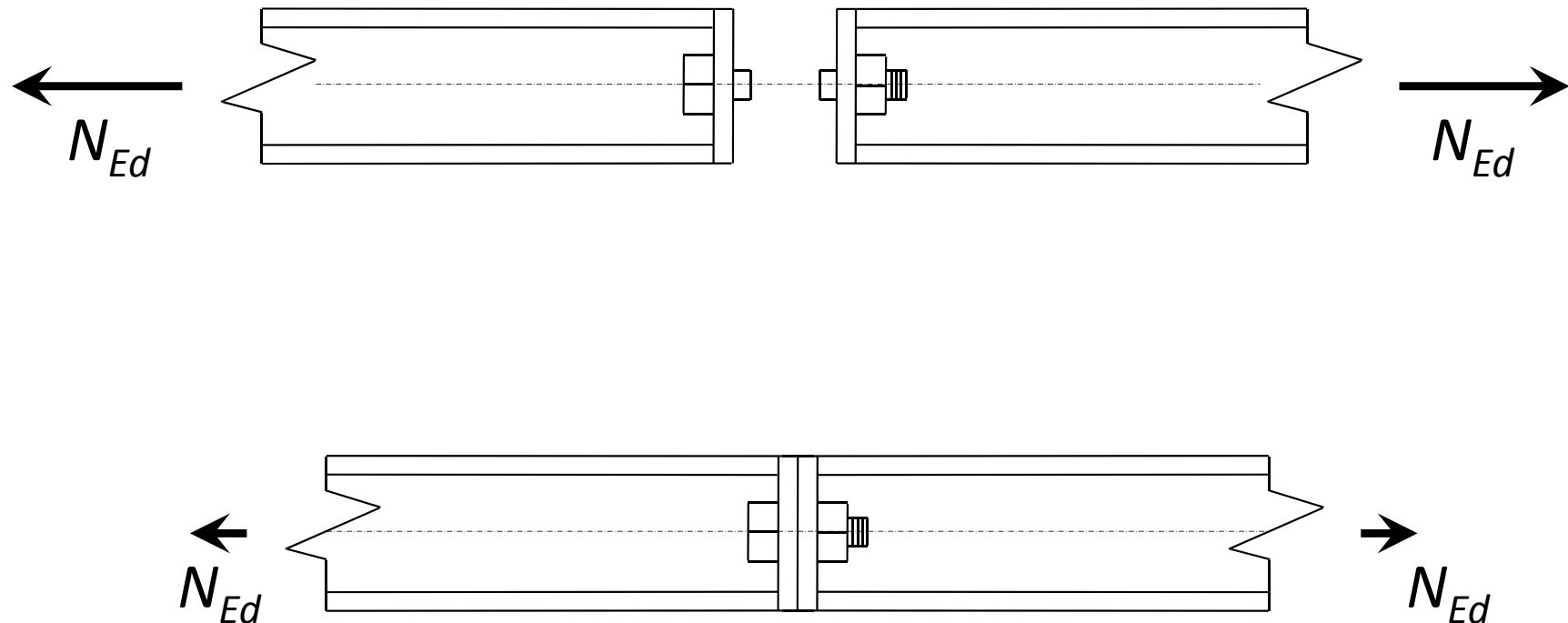


Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

Meccanismi di rottura

1. Rottura dei bulloni a trazione

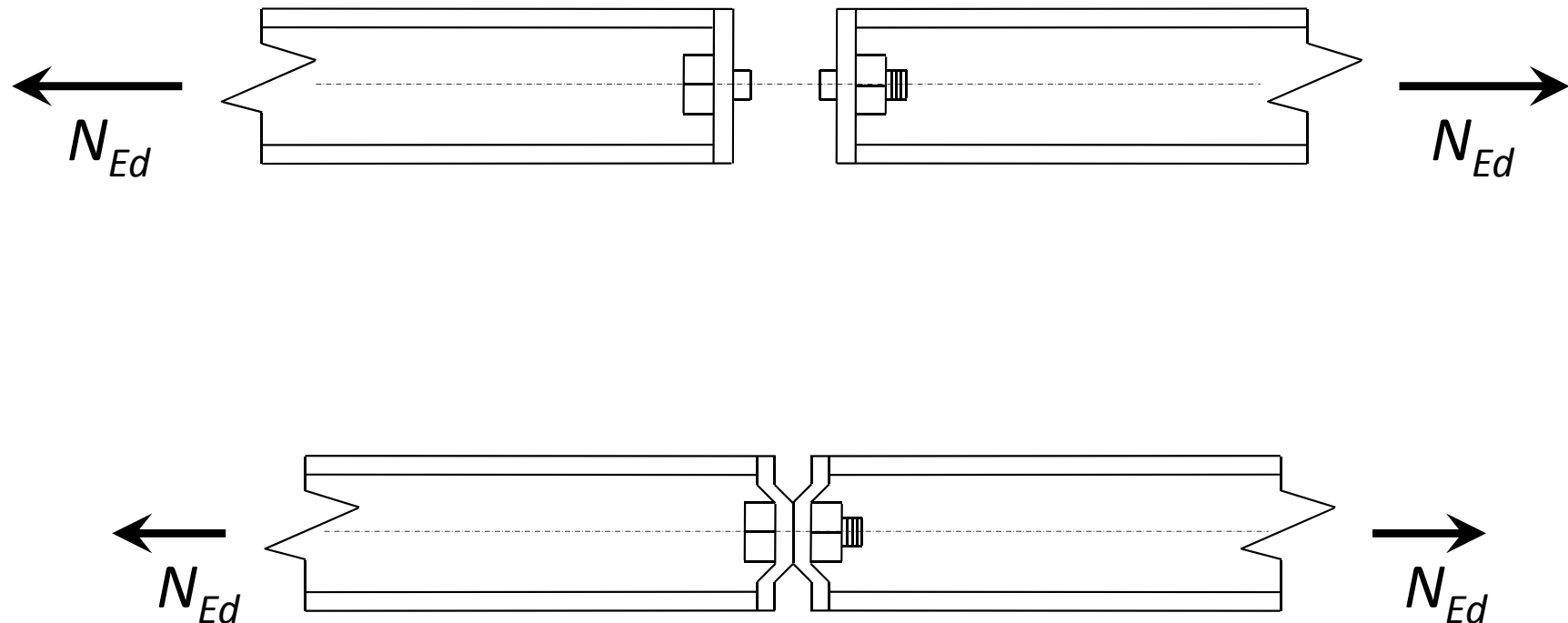


Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

Meccanismi di rottura

1. Rottura dei bulloni a trazione

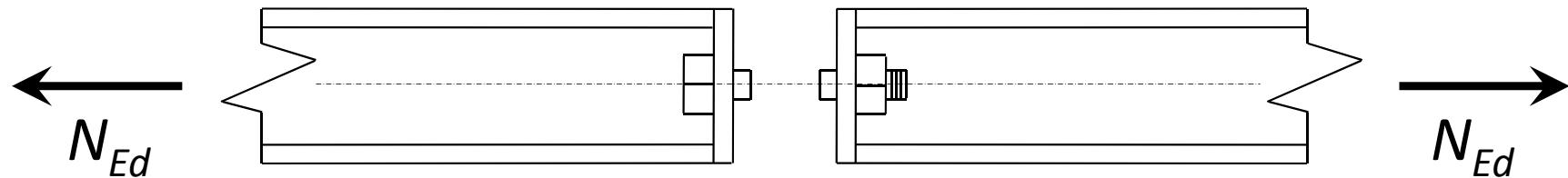


Collegamenti bullonati

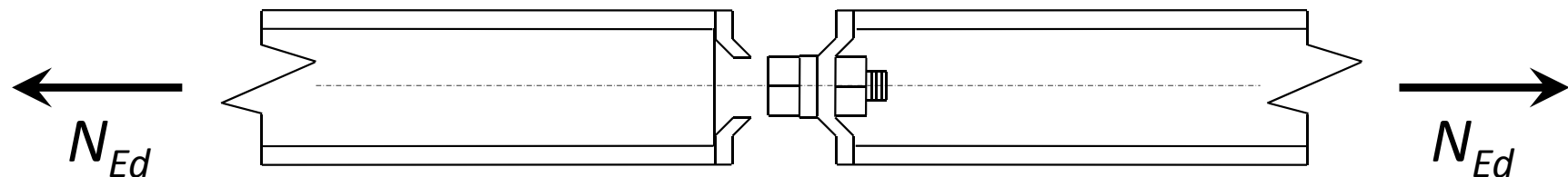
Bulloni sollecitati a trazione

Meccanismi di rottura

1. Rottura dei bulloni a trazione



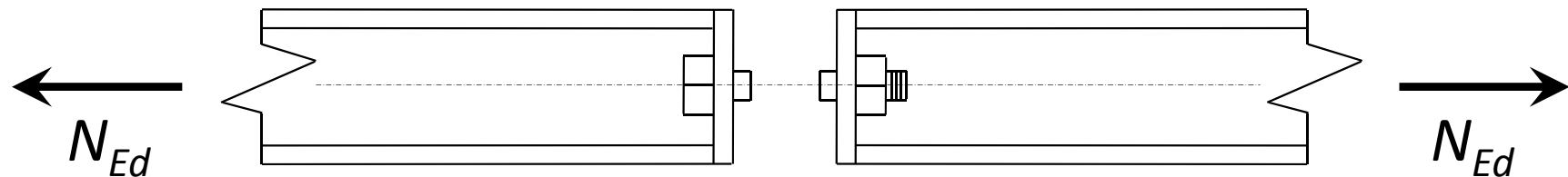
2. Punzonamento della piastra



Resistenza di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

1. Rottura dei bulloni a trazione



La tensione nel bullone
per effetto della forza F_t è uniforme

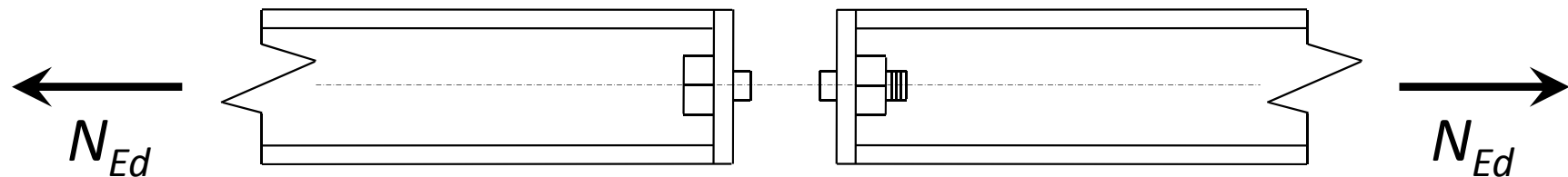
$$\sigma = \frac{F_t}{A_{res}}$$

A_{res} Area resistente del bullone

Resistenza di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

1. Rottura dei bulloni a trazione



Il bullone si rompe

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

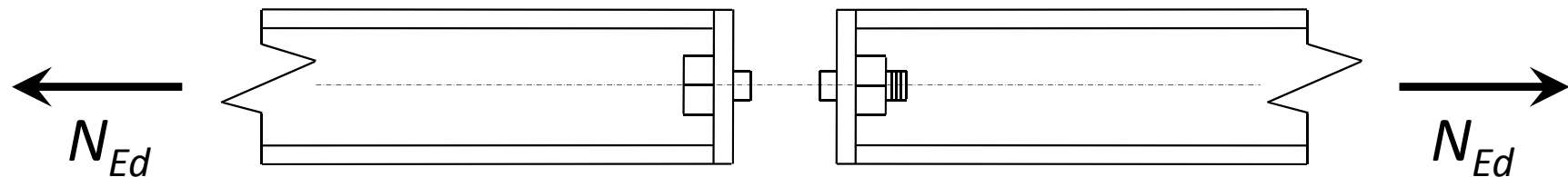
$$F_{t,max} = A_{res} f_{ub}$$

A_{res} Area resistente del bullone

Resistenza di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

1. Rottura dei bulloni a trazione



Il bullone si rompe

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

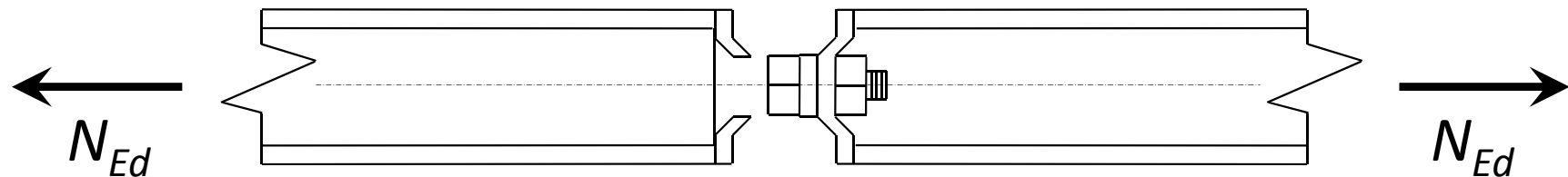
$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{M2}}$$

A_{res} Area resistente del bullone

Resistenza di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

2. Punzonamento della piastra



La superficie di rottura

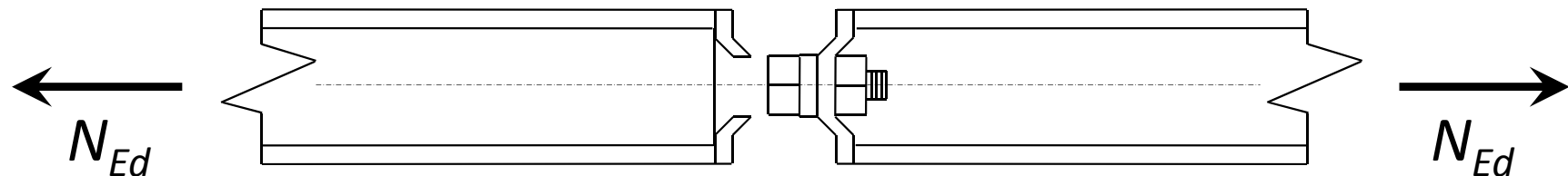
è cilindrica con altezza t_p e diametro d_m

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

Resistenza di collegamenti bullonati

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 :

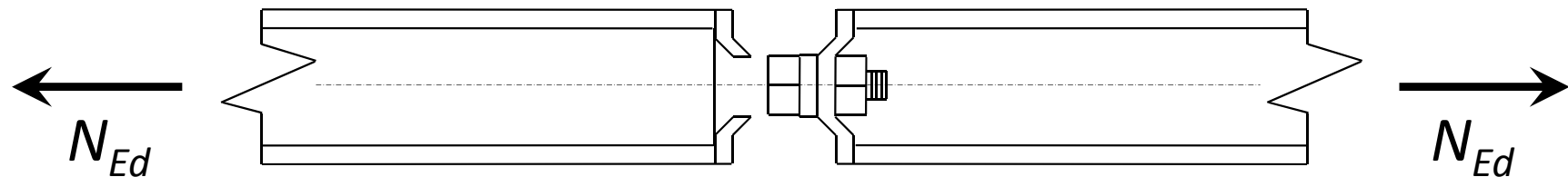
$$\sigma_{id} = \sqrt{(\sigma^2 + 3 \tau^2)} = \sqrt{3} \tau = f_u$$

ovvero...

Resistenza di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

2. Punzonamento della piastra



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

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

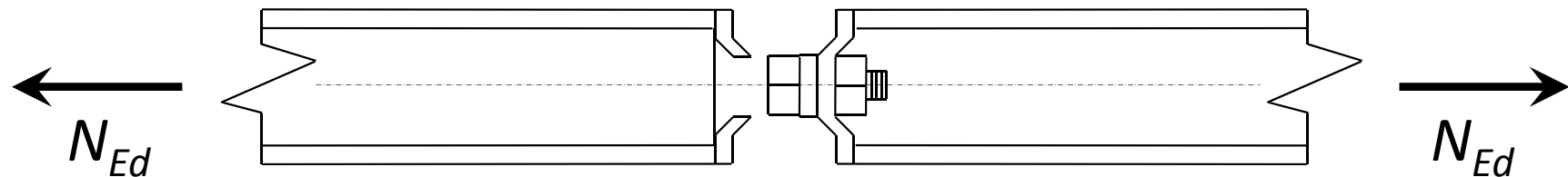
d_m Diametro della giacitura di rottura

t_p Spessore della piastra

Resistenza di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

2. Punzonamento della piastra



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

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

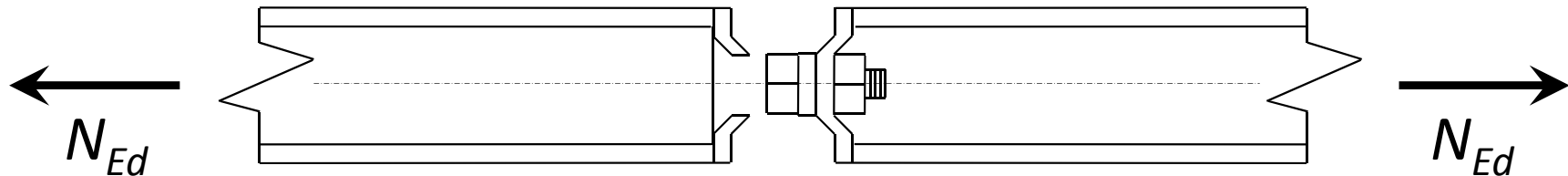
d_m Diametro della giacitura di rottura

t_p Spessore della piastra

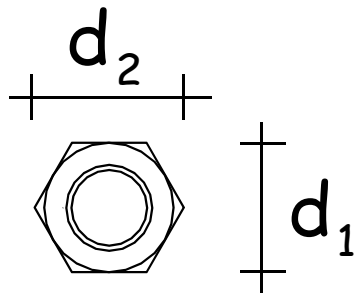
Resistenza di collegamenti bullonati

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

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

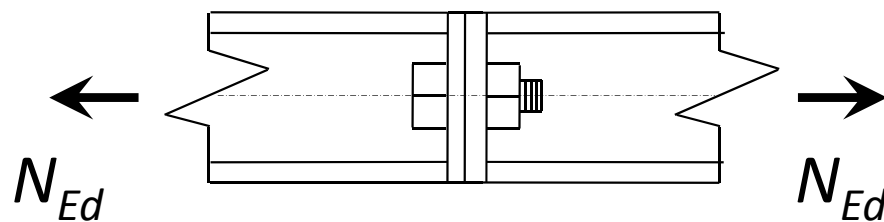
2. Punzonamento della piastra

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

d_m Diametro della giacitura di rottura
 t_p Spessore della piastra

Collegamento bullonato

Esempio



N_{Ed}

Acciaio

2 Bulloni

Piatto

100 kN

S235

M16 classe 5.6

$t_p = 5 \text{ mm}$

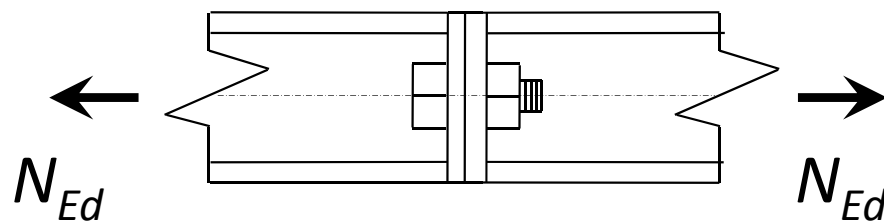
1. Determinazione di $F_{t,Rd}$

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

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

Collegamento bullonato

Esempio



N_{Ed}

100 kN

Acciaio

S235

2 Bulloni

M16 classe 5.6

Piatto

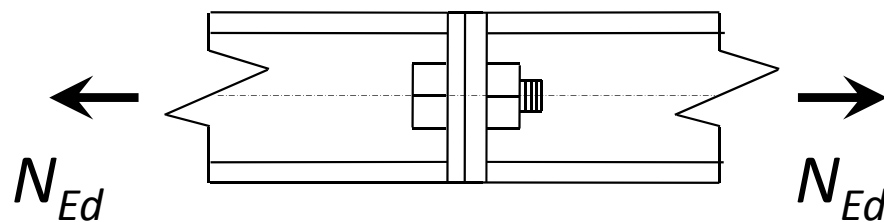
$t_p = 5 \text{ mm}$

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

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

Collegamento bullonato

Esempio



N_{Ed}

Acciaio

2 Bulloni

Piatto

100 kN

S235

M16 classe 5.6

$t_p = 5 \text{ mm}$

3. Verifica

$$F_{t,Rd} = 56.5 \text{ kN} \quad B_{p,Rd} = 67.9 \text{ kN}$$

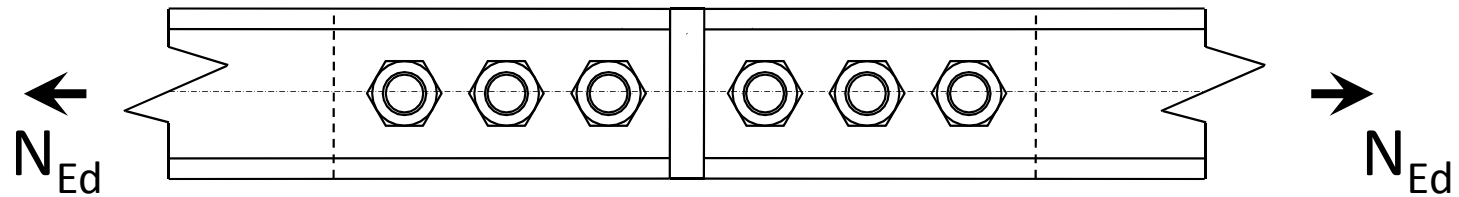
$$F_{t,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n_b} = \frac{100}{2} = 50.0 \text{ kN} \quad < F_{t,Rd} < B_{p,Rd}$$

Il collegamento è verificato

Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

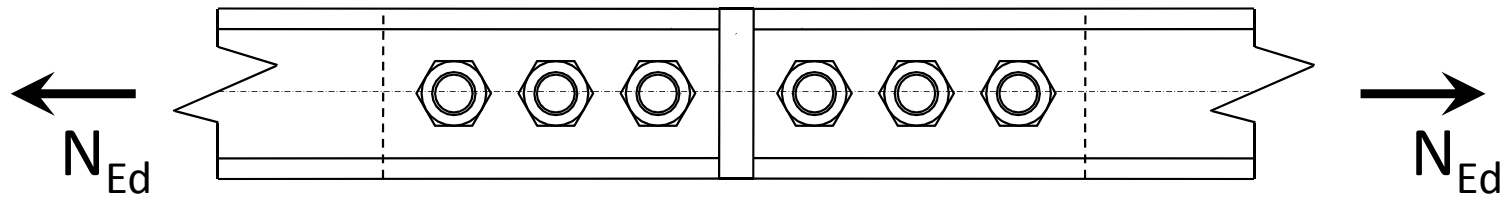
Meccanismi di rottura



Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

Meccanismi di rottura

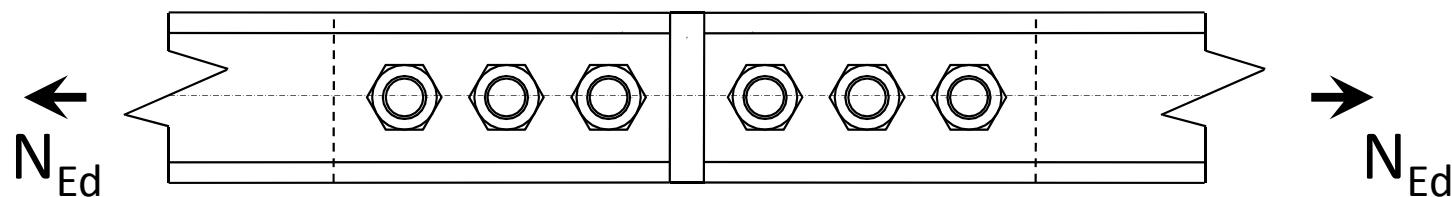
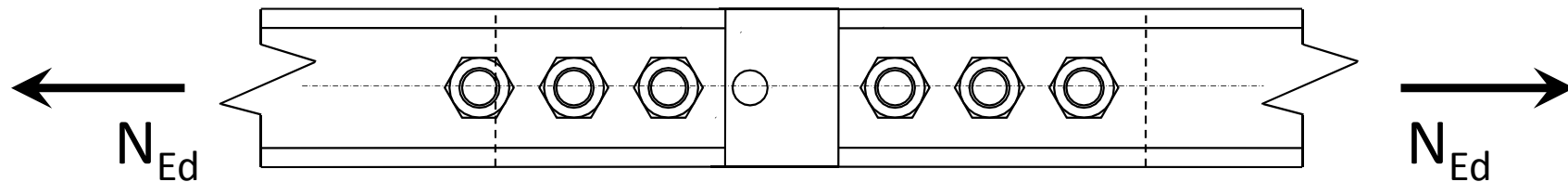


Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

Meccanismi di rottura

1. Rottura dei bulloni a taglio

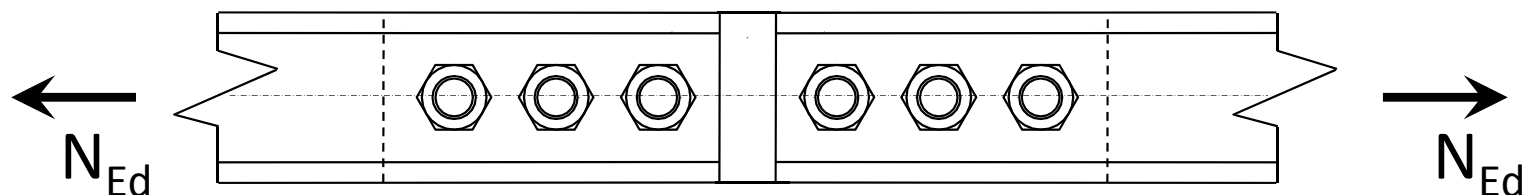
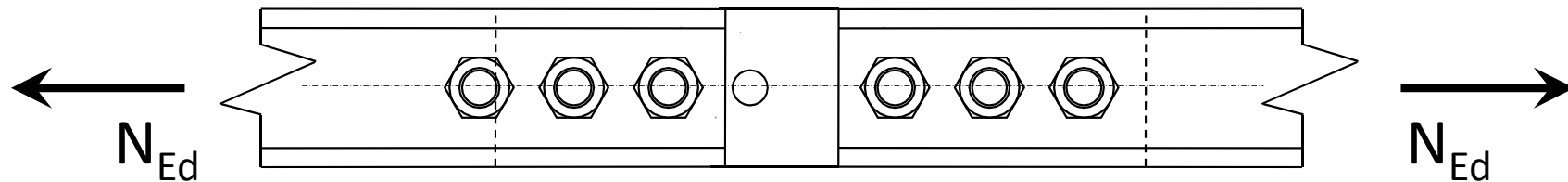


Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

Meccanismi di rottura

1. Rottura dei bulloni a taglio

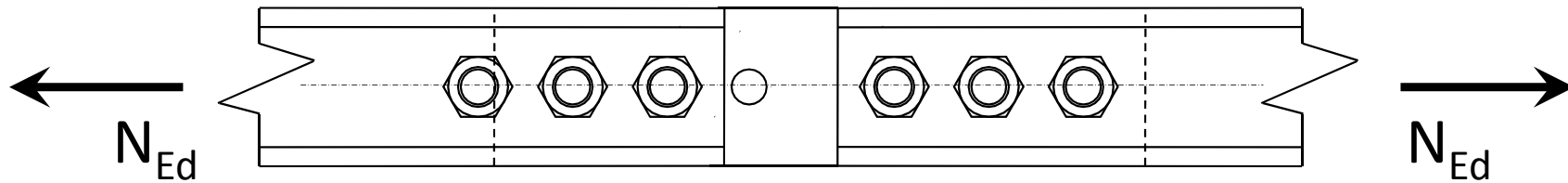


Collegamenti bullonati

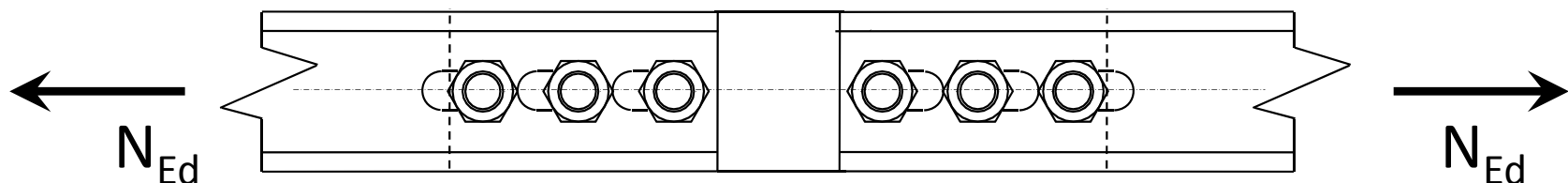
Bulloni sollecitati a taglio

Meccanismi di rottura

1. Rottura dei bulloni a taglio



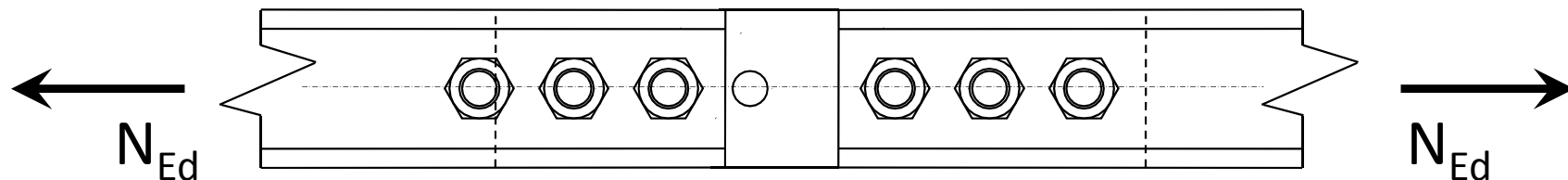
2. Rifollamento delle lamiere



Resistenza di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

1. Rottura dei bulloni a taglio



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

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

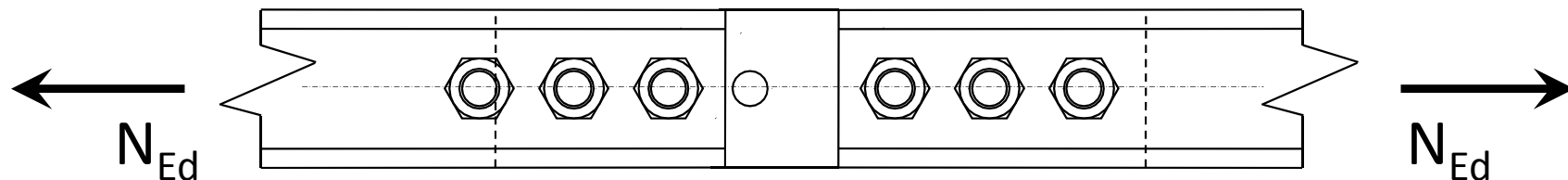
dove:

A Area nominale del bullone

Resistenza di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

1. Rottura dei bulloni a taglio



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

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

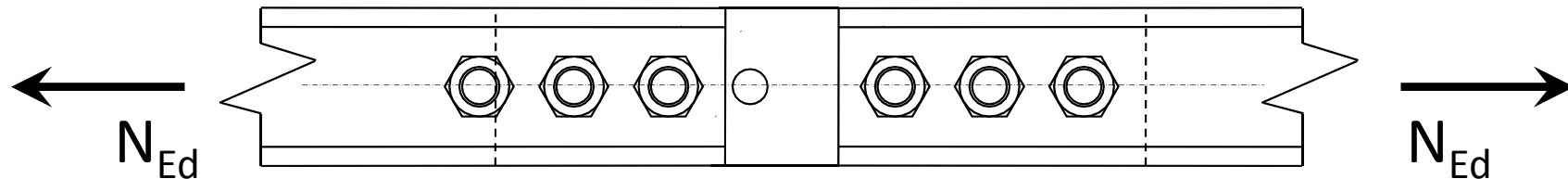
dove:

A Area nominale del bullone

Resistenza di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

1. Rottura dei bulloni a taglio



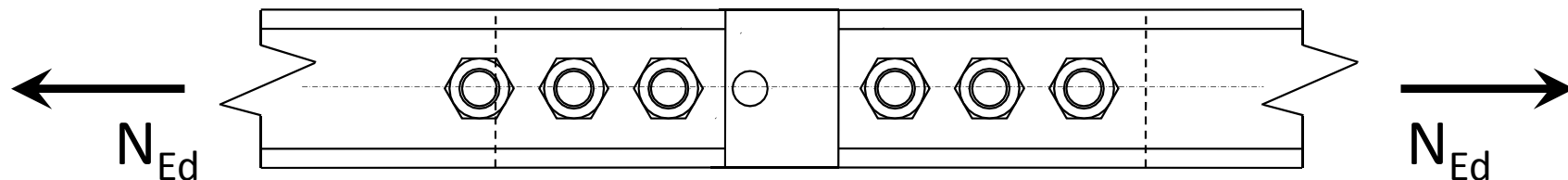
Se il piano di taglio
non attraversa la parte filettata del bullone:

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

Resistenza di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

1. Rottura dei bulloni a taglio



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

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

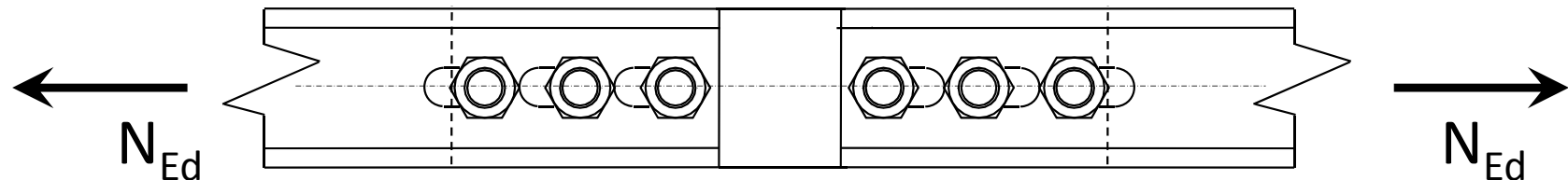
$$F_{v,Rd} = 0.5 A_{res} f_{ub} / \gamma_{M2} \quad (\text{bulloni di classe 6.8 e 10.9})$$

dove A_{res} e' l'area resistente del bullone

Resistenza di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

2. Rifollamento delle lamiere



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

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

dove:

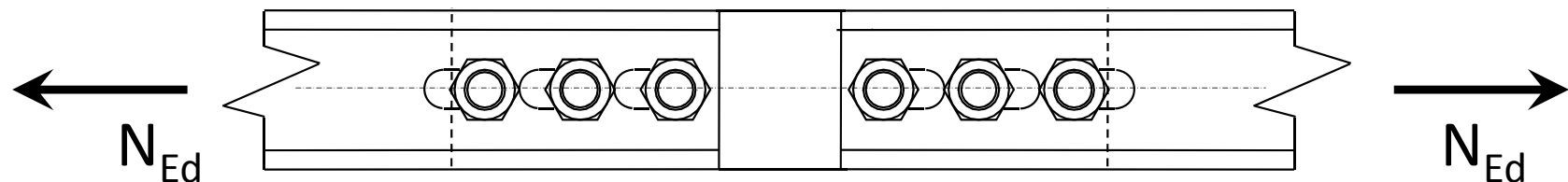
d Diametro del bullone

t_p Spessore della lamiera

Resistenza di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

2. Rifollamento delle lamiere



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

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

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

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

Verifica di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

1. Rottura dei bulloni a taglio

(rottura della sezione nominale)

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} = 0.6 A f_{ub} / \gamma_{M2}$$

(rottura della sezione filettata)

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} = 0.6 A_{res} f_{ub} / \gamma_{M2}$$

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} = 0.5 A_{res} f_{ub} / \gamma_{M2}$$

2. Rifollamento della lamiera

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

Bulloni
di bordo

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

interni

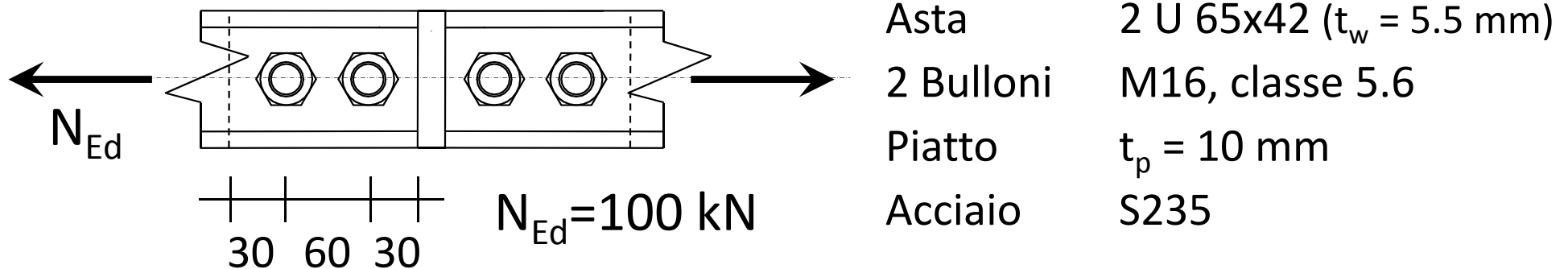
$$k = \min \left(\frac{1.4 p_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right)$$

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

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

Verifica di collegamento bullonato

Esempio



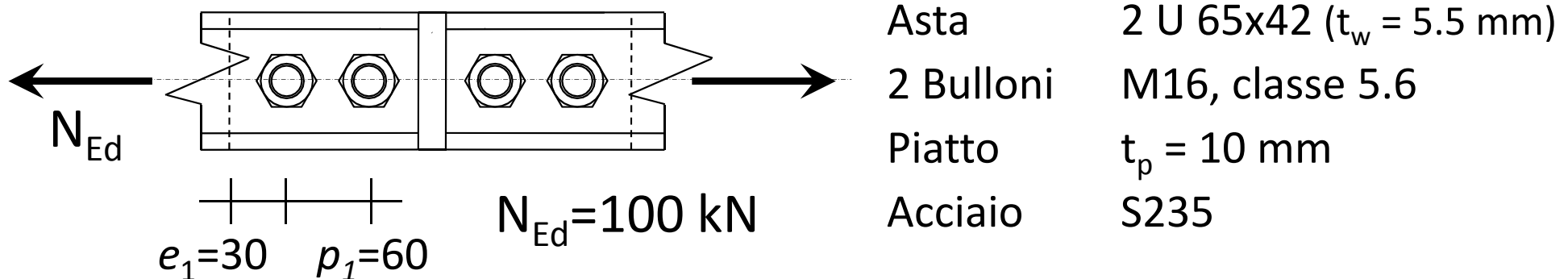
1. Determinazione di $F_{v,Rd}$

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

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

Verifica di collegamento bullonato

Esempio



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

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

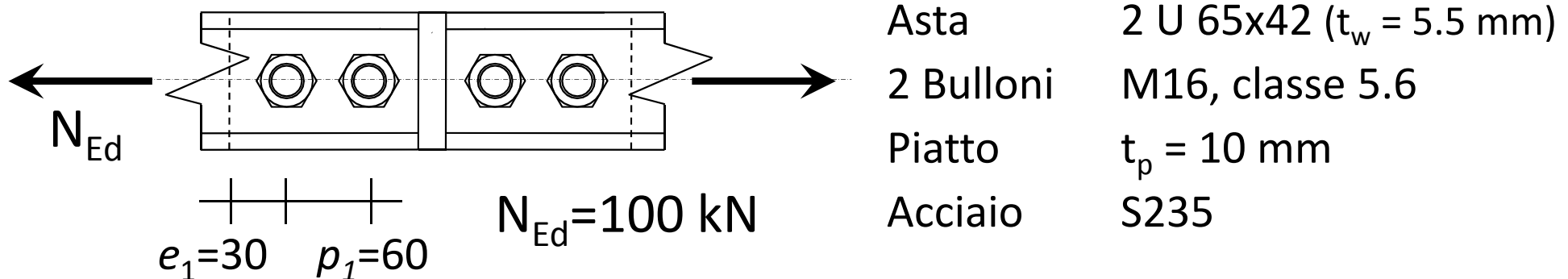
$$k = 2.5$$

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

Quasi sempre > 1

Verifica di collegamento bullonato

Esempio



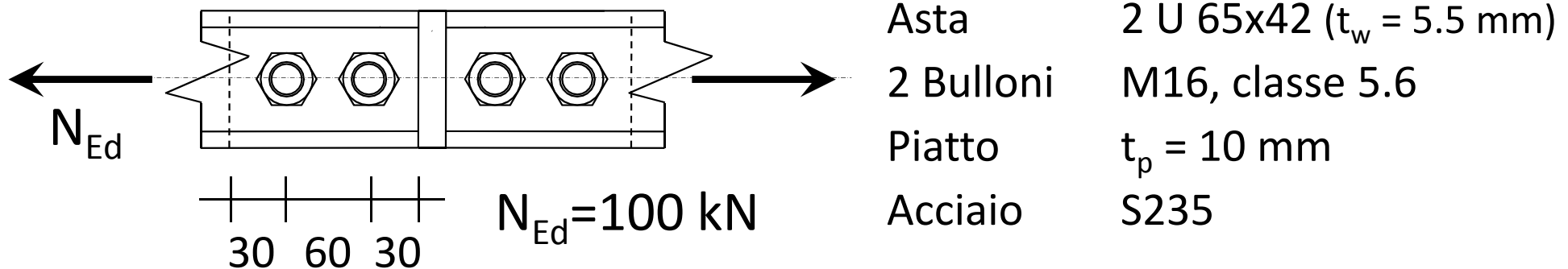
2. Determinazione di $F_{b,Rd}$ (del piatto)

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

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

Verifica di collegamento bullonato

Esempio



3. Verifica

Il collegamento è verificato

$$F_{v,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n_s n_b} = \frac{100}{4} = 25.0 \text{ kN} < F_{v,Rd} = 48.2 \text{ kN}$$

$$F_{b,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n_b} = \frac{100}{2} = 50.0 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 67.7 \text{ kN}$$

Collegamenti bullonati a taglio

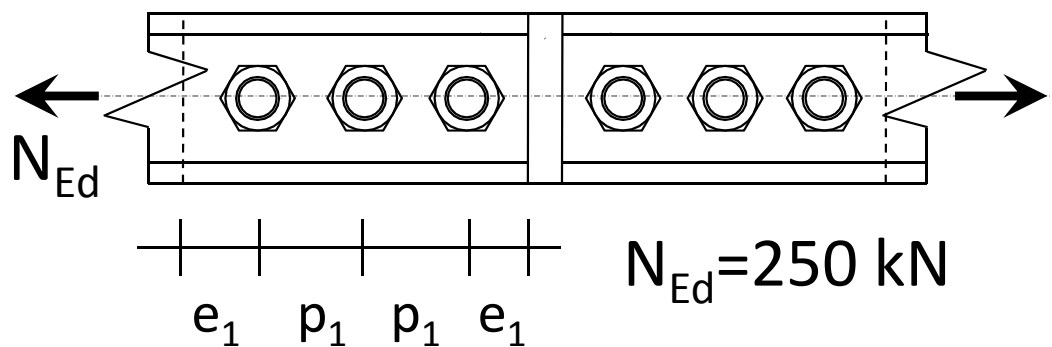
Suggerimento progettuale

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

Progetto di collegamento bullonato

Esempio



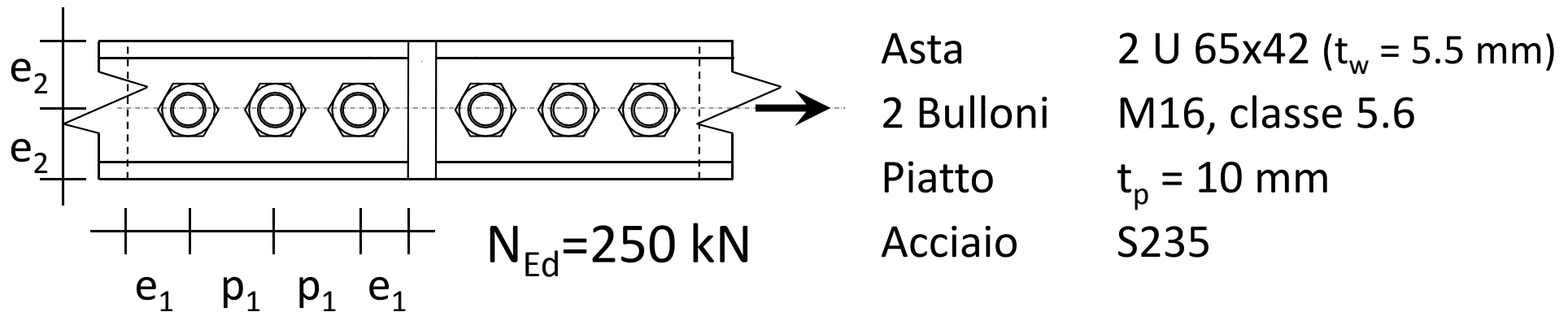
Asta 2 U 65x42 ($t_w = 5.5 \text{ mm}$)
2 Bulloni M16, classe 5.6
Piatto $t_p = 10 \text{ mm}$
Acciaio S235

1. Determinazione del numero di bulloni

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

Progetto di collegamento bullonato

Esempio

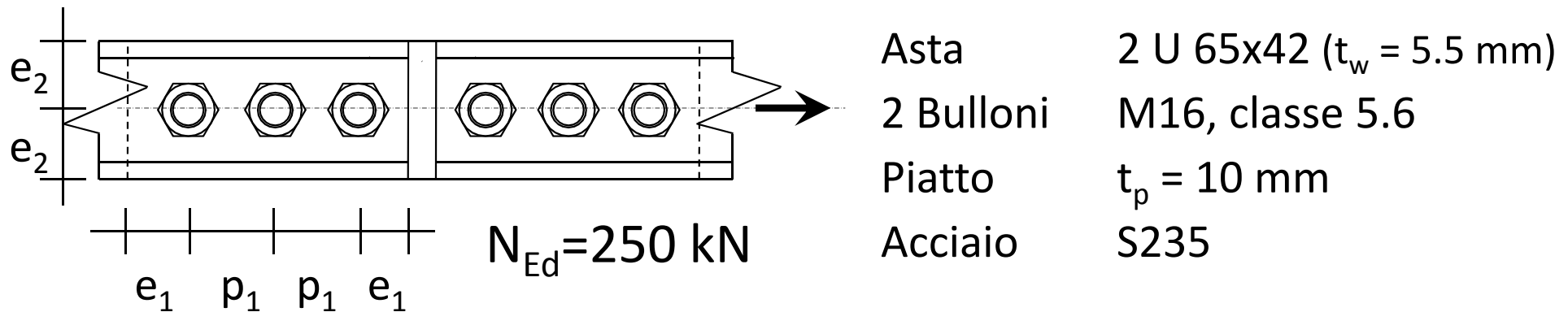


2. Determinazione delle distanze (calcolo k)

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

Progetto di collegamento bullonato

Esempio



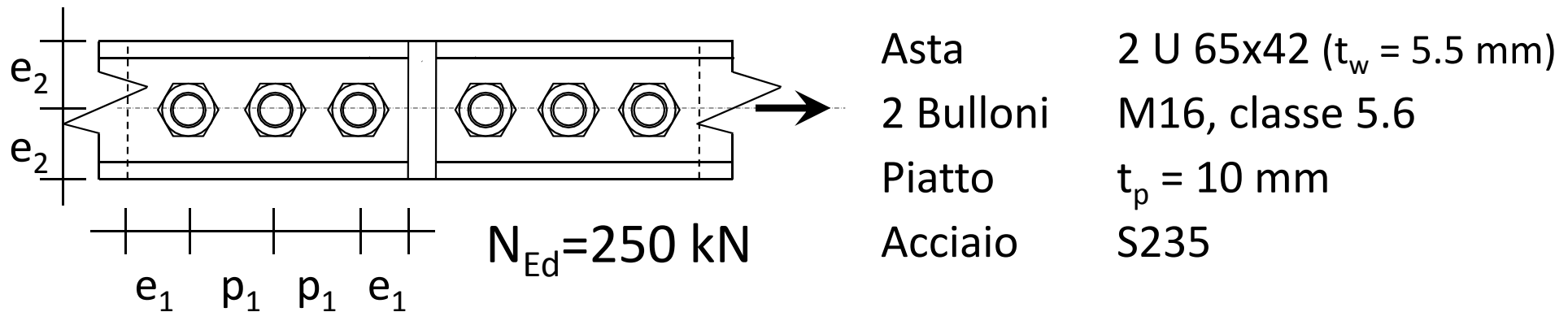
2. Determinazione delle distanze (calcolo α necessario)

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

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

Progetto di collegamento bullonato

Esempio



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

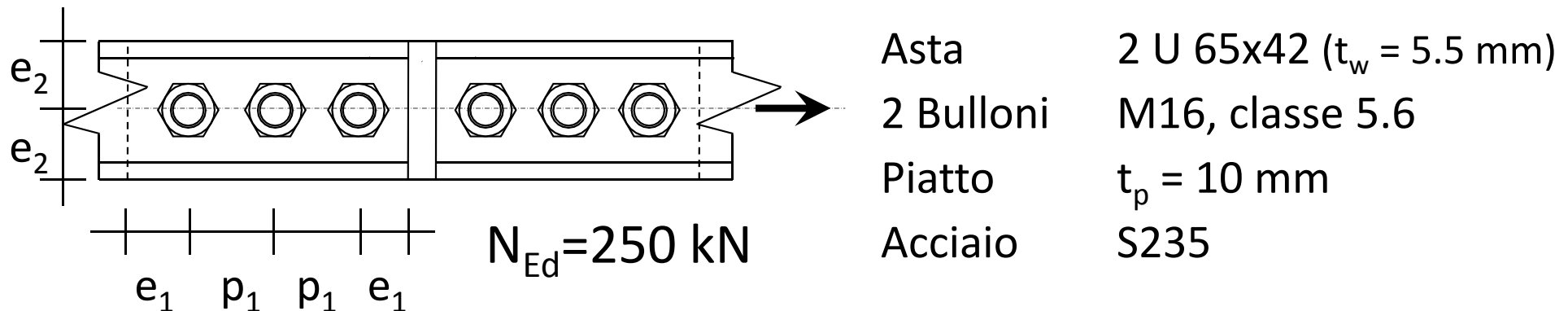
$$\alpha = \min \left(\frac{e_1}{3 d_0}, \frac{p_1}{3 d_0} - 0.25, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$$

$$e_1 = 37 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{e_1}{3 d_0} \Rightarrow e_1 = 3 \alpha d_0 = 3 \times 0.723 \times 17 = 36.9 \text{ mm}$$

Progetto di collegamento bullonato

Esempio



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

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

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

$$\alpha = \frac{p_1}{3 d_0} - 0.25 \Rightarrow p_1 = 3 (\alpha + 0.25) d_0 = 49.6 \text{ mm}$$

Verifica di collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio e trazione

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

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

dove:

$F_{v,Ed}, F_{t,Ed}$ 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:

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

dove:

$F_{p,C}$ 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

FINE