

# Lezione

TECNICA DELLE COSTRUZIONI

*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);

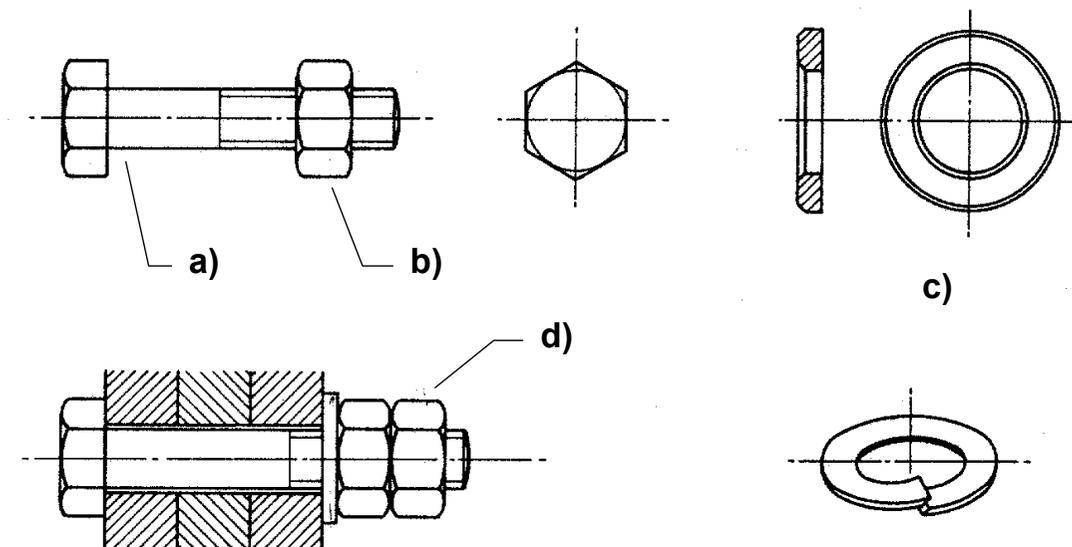
per comodità la si riporta a  $f_u$  del materiale base

# Collegamenti bullonati

# I bulloni

Sono costituiti da:

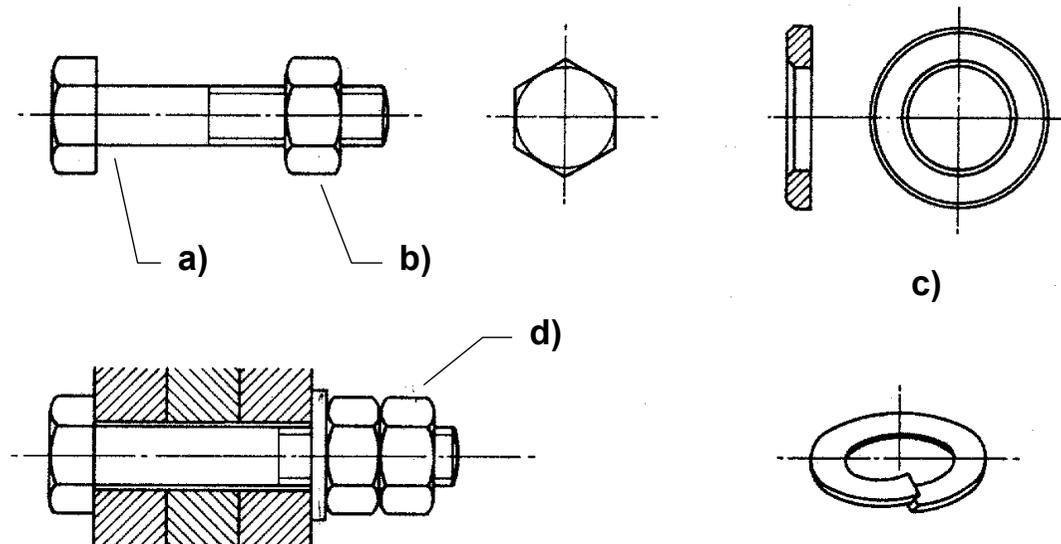
- a) vite con testa esagonale e gambo filettato in tutto o in parte
- b) dado di forma esagonale



# 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

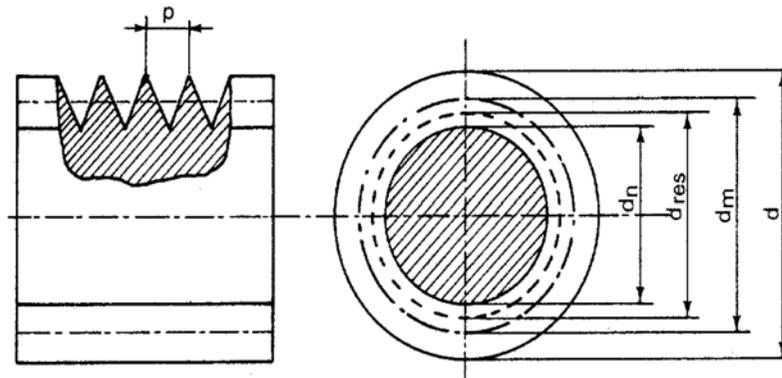
diámetro (mm)	12	14	16	18	20	22	24	27	30
sigla	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30

- 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
$A$ (mm <sup>2</sup> )	113	154	201	254	314	380	452	573	707
$A_{res}$ (mm <sup>2</sup> )	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

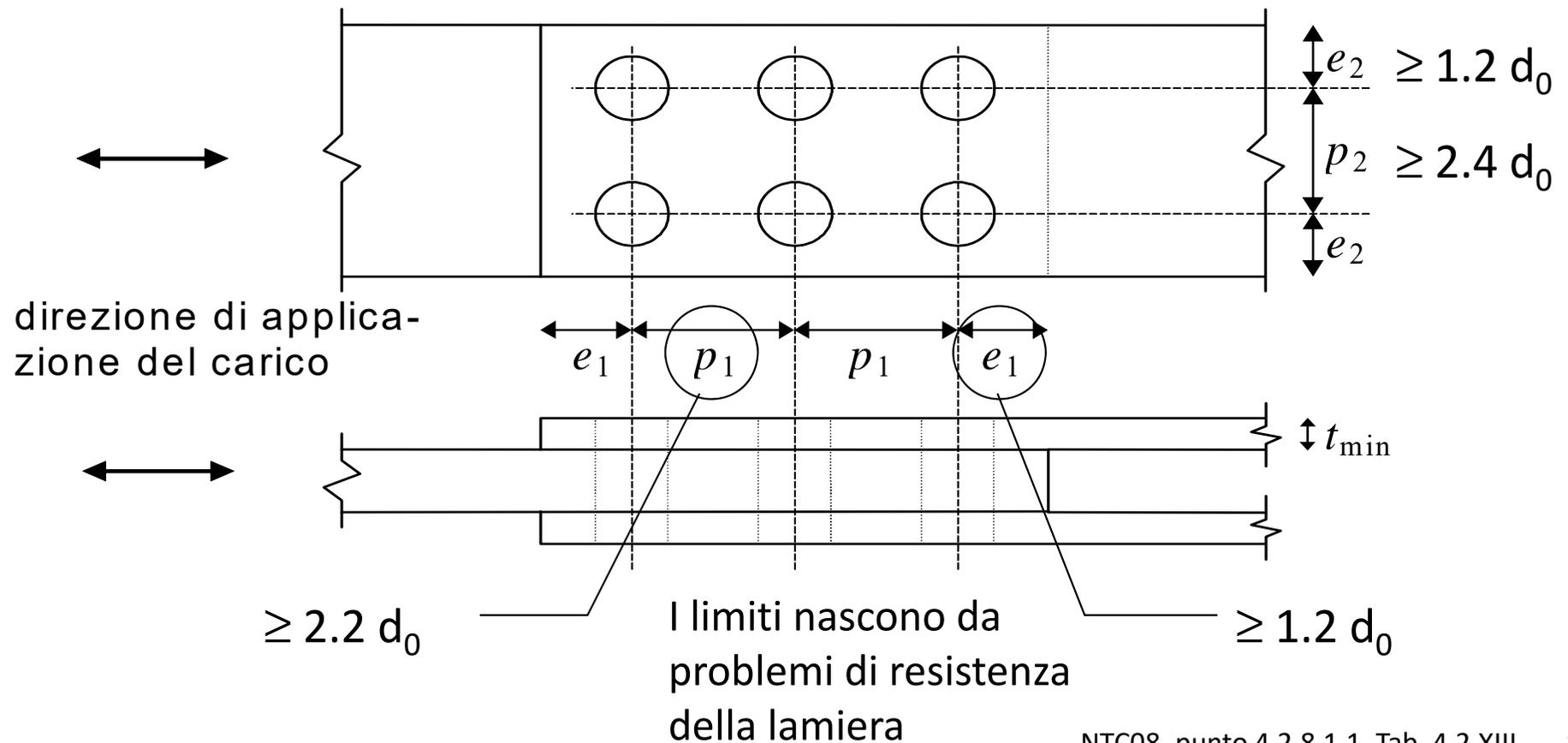
Valori massimi del gioco foro-bullone (mm)

- fori calibrati:                       $d-d_0 \leq 0.3$  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:

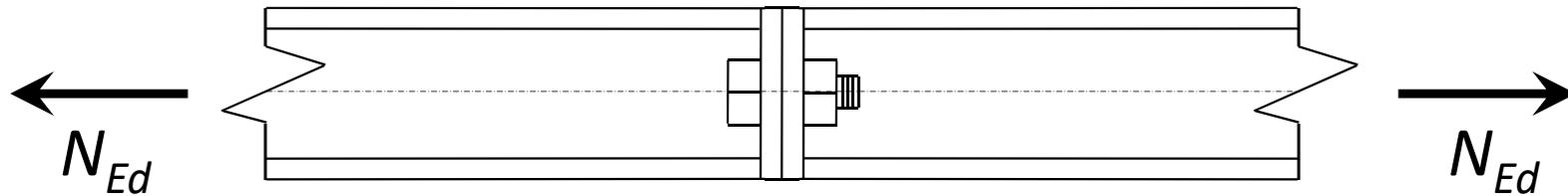
$$F_{p,Cd} = 0.7 \frac{f_{ub} A_{res}}{\gamma_{M7}}$$

$$\gamma_{M7} = 1.10$$

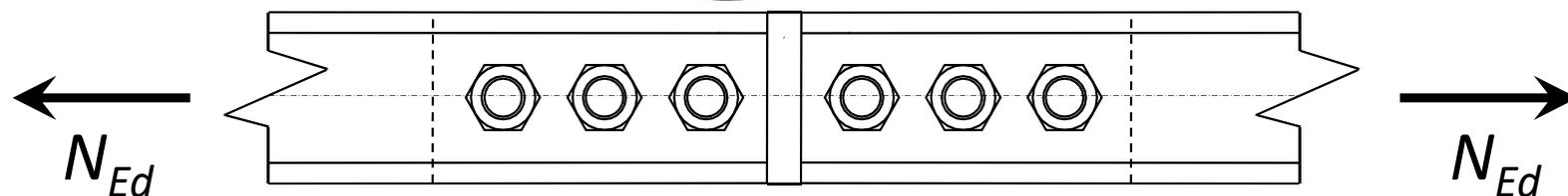
# Collegamenti bullonati

## Modalità di comportamento

### 1. Con bulloni sollecitati a trazione



### 2. Con bulloni sollecitati a taglio

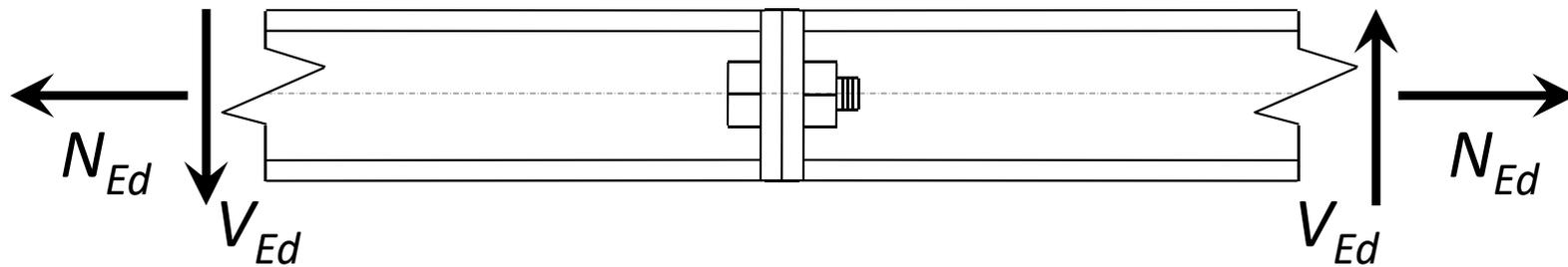


In alternativa:  
ad attrito

# Collegamenti bullonati

## Modalità di comportamento

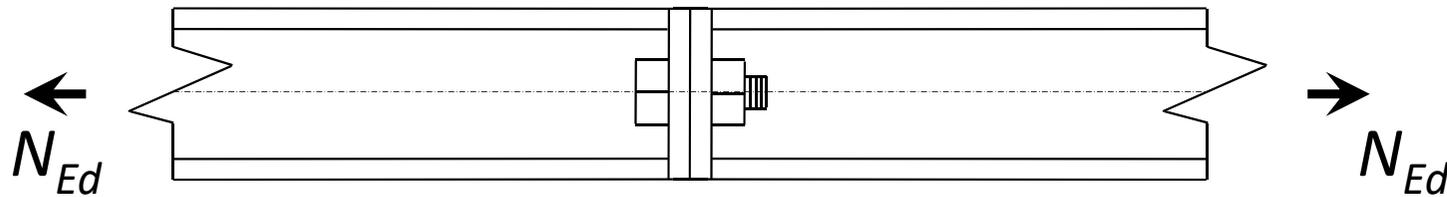
### 3. Con bulloni sollecitati a trazione e taglio



# Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

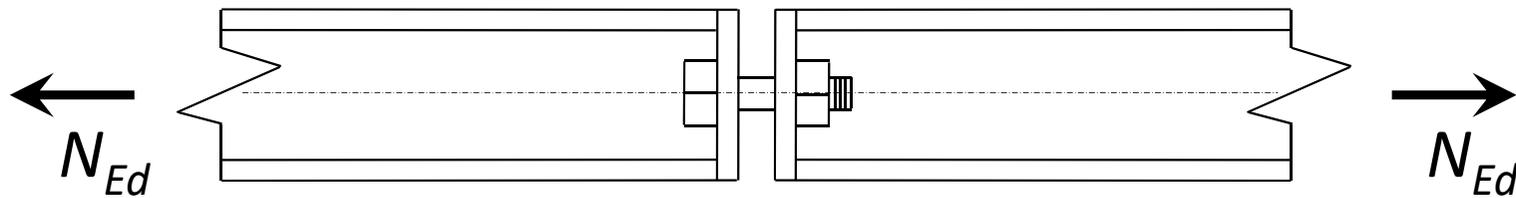
## Meccanismi di rottura



# Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

## Meccanismi di rottura

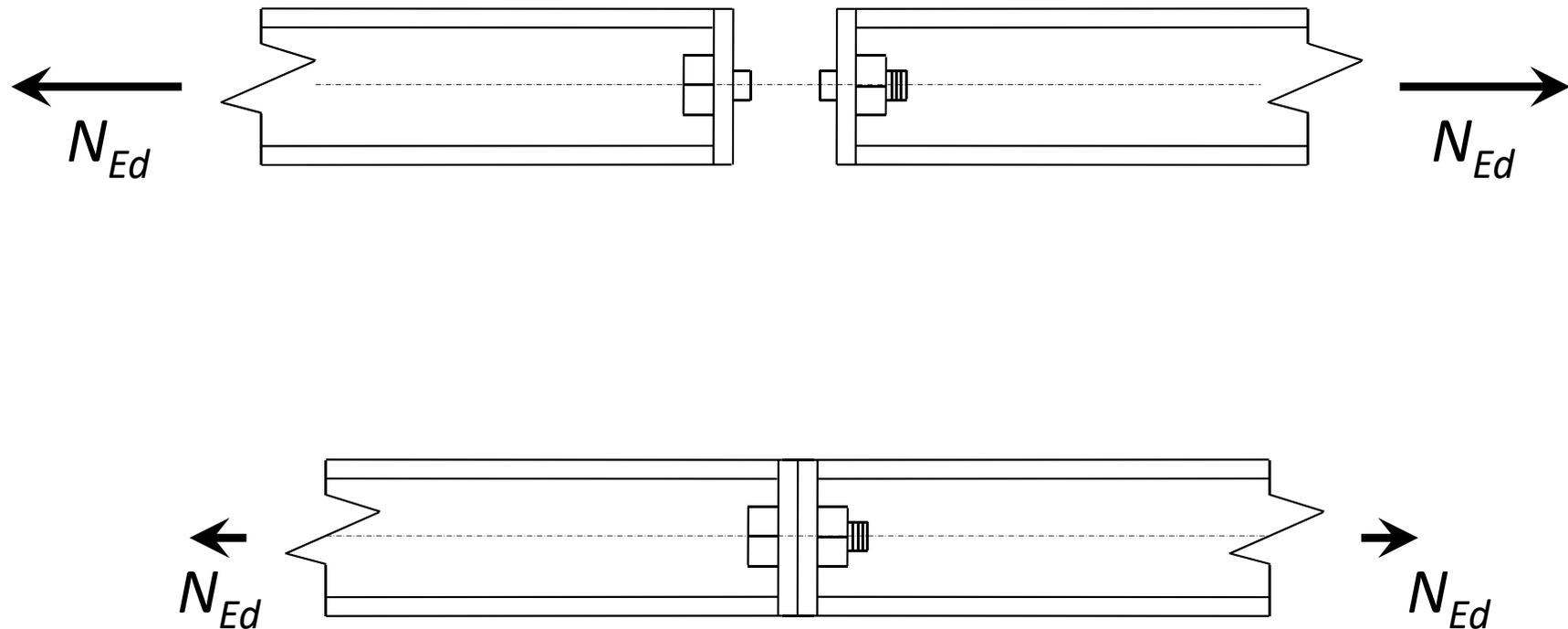


# Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

## Meccanismi di rottura

### 1. Rottura dei bulloni a trazione

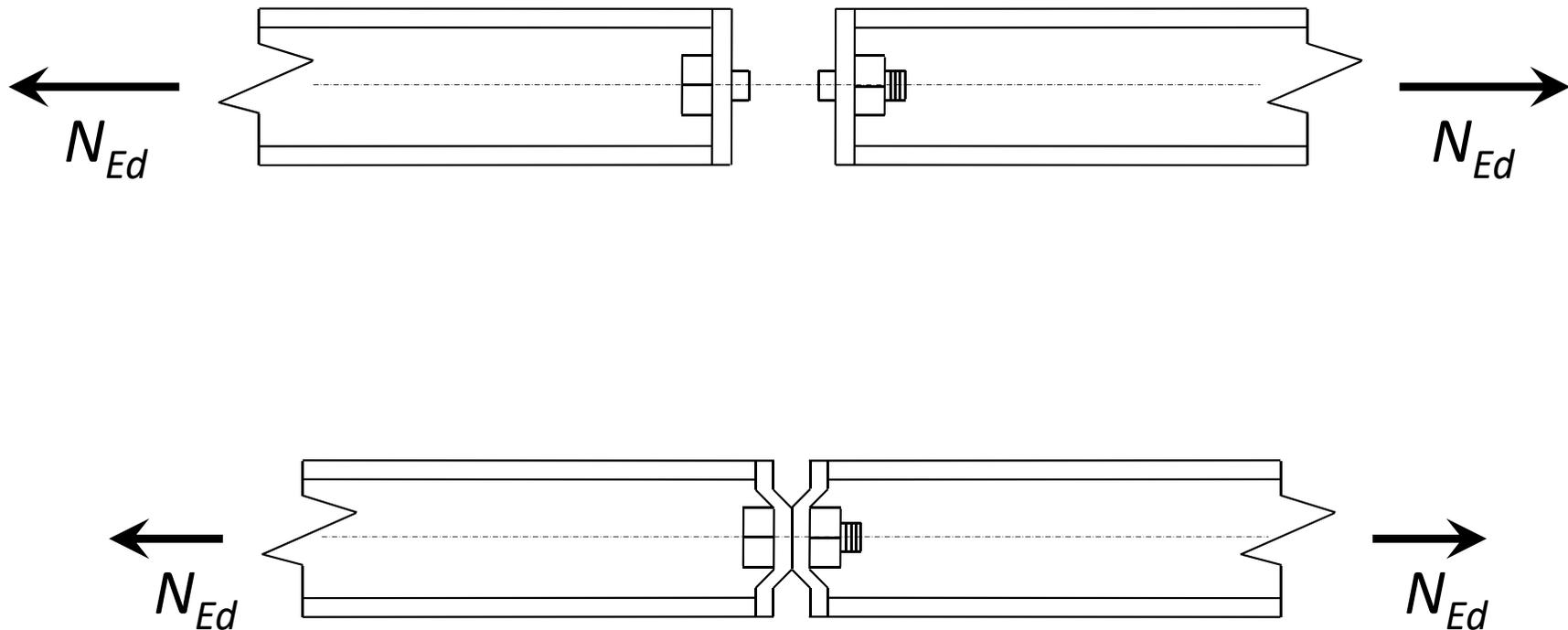


# Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a trazione

## Meccanismi di rottura

### 1. Rottura dei bulloni a trazione

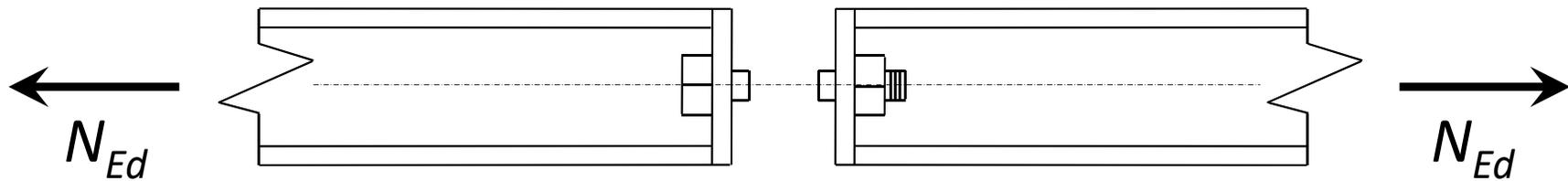


# Collegamenti bullonati

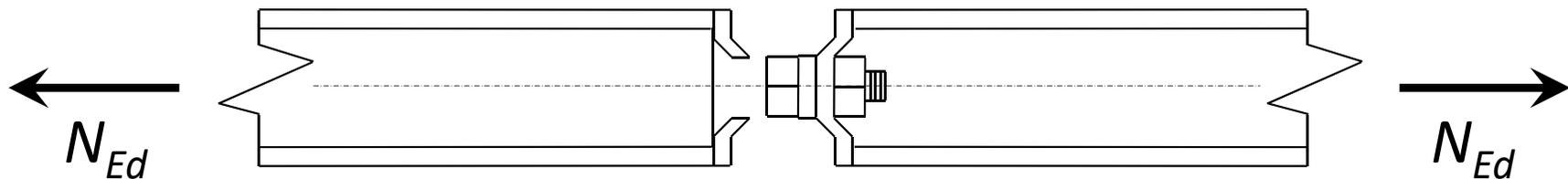
## Bulloni sollecitati a trazione

### Meccanismi di rottura

#### 1. Rottura dei bulloni a trazione



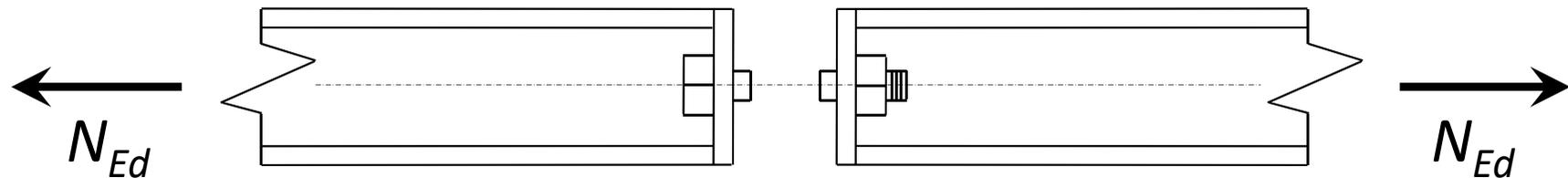
#### 2. Punzonamento della piastra



# 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

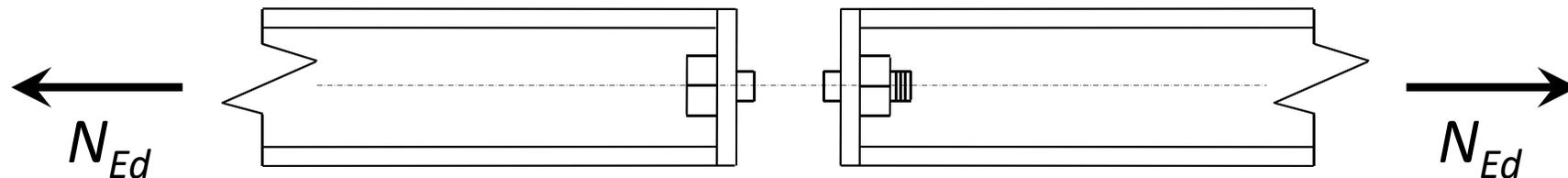
$$\sigma = \frac{F_t}{A_{res}}$$

$A_{res}$  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  $f_{ub}$

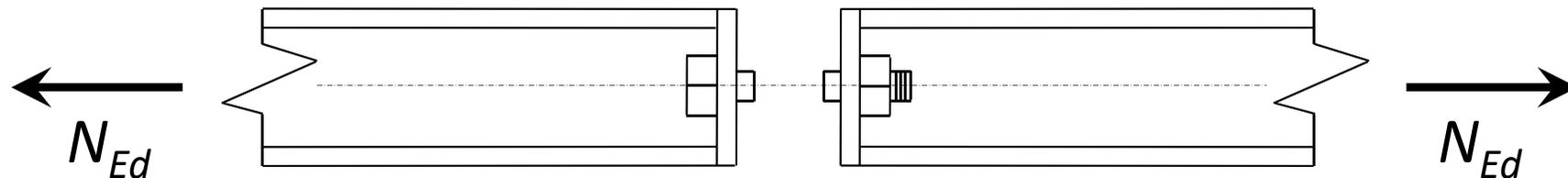
$$F_{t,max} = A_{res} f_{ub}$$

$A_{res}$  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  $f_{ub}$

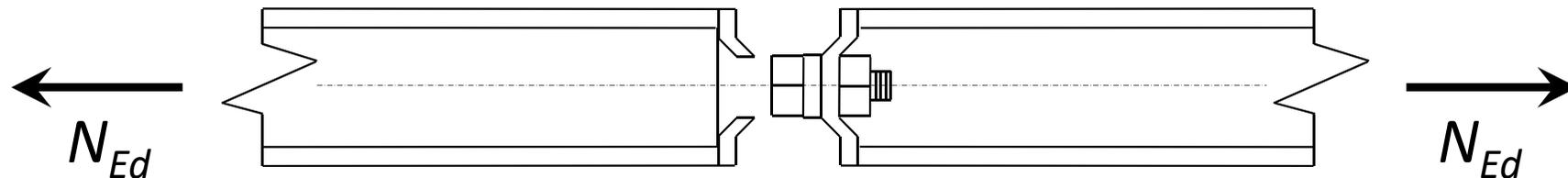
$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 A_{res} f_{ub}}{\gamma_{M2}}$$

$A_{res}$  Area resistente del bullone

# Resistenza di collegamenti bullonati

## Bulloni sollecitati a trazione

### 2. Punzonamento della piastra



La superficie di rottura

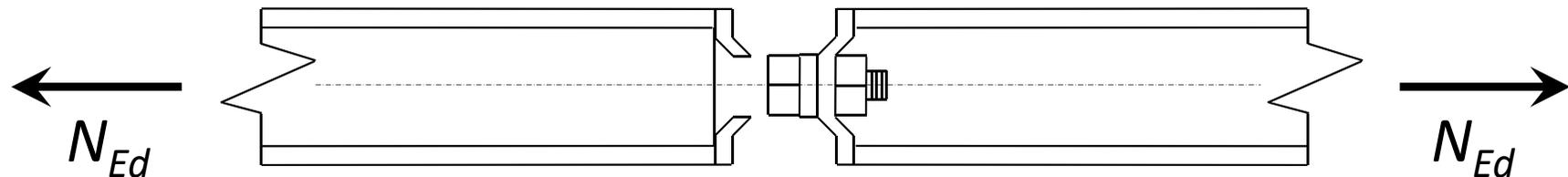
è cilindrica con altezza  $t_p$  e diametro  $d_m$

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

# 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 :

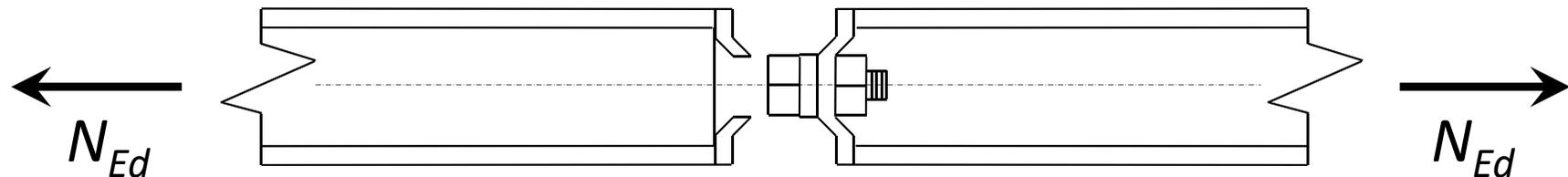
$$\sigma_{id} = \sqrt{(\sigma^2 + 3 \tau^2)} = \sqrt{3} \tau = f_u$$

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

$$f_u / \sqrt{3}$$

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

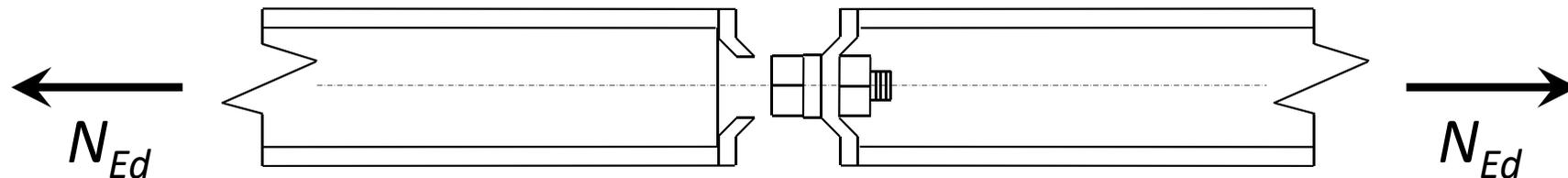
$d_m$       Diametro della giacitura di rottura

$t_p$       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  $f_u / \sqrt{3}$

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

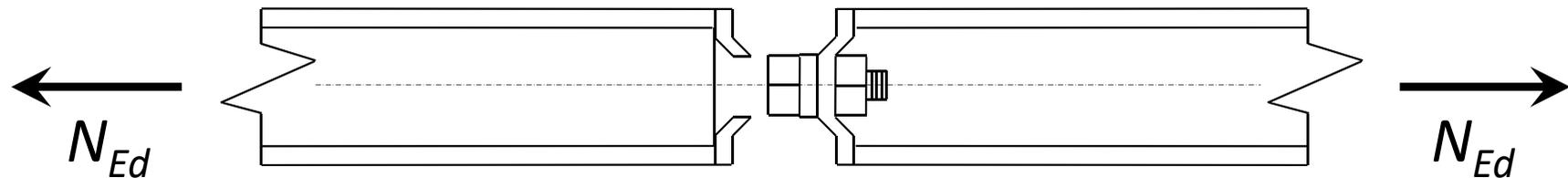
$d_m$       Diametro della giacitura di rottura

$t_p$       Spessore della piastra

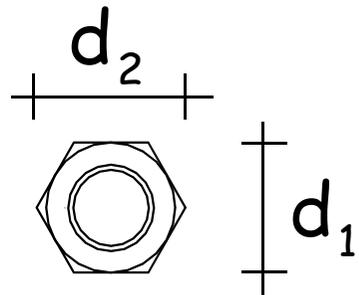
# Resistenza di collegamenti bullonati

## 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

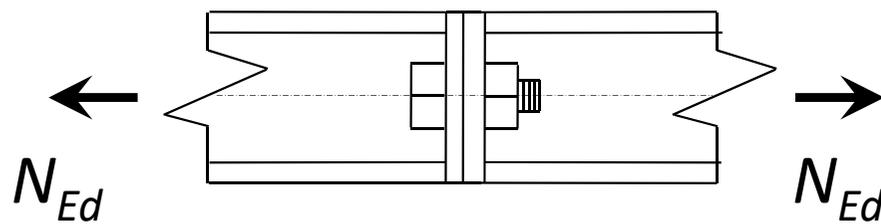
$$F_{t,Ed} \leq B_{p,Rb} = \frac{0.6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}}$$

$d_m$  Diametro della giacitura di rottura

$t_p$  Spessore della piastra

# Collegamento bullonato

## Esempio



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

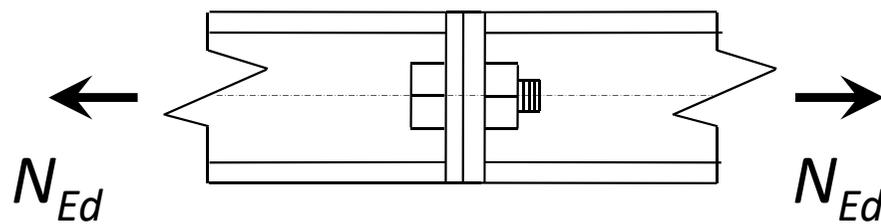
### 1. Determinazione di $F_{t,Rd}$

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

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

# Collegamento bullonato

## Esempio



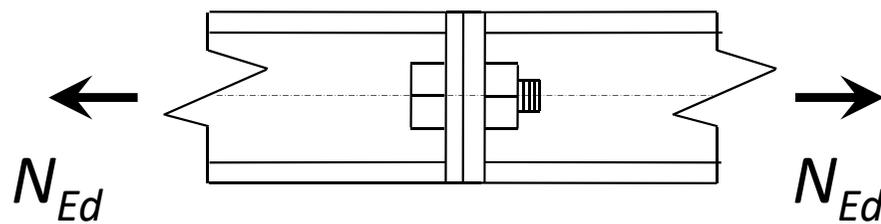
$N_{Ed}$	100 kN
Acciaio	S235
2 Bulloni	M16 classe 5.6
Piatto	$t_p = 5$ mm

## 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



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

### 3. Verifica

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

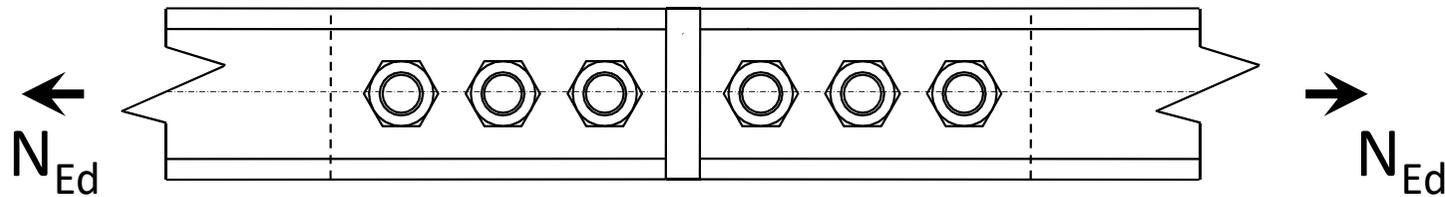
$$F_{t,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n_b} = \frac{100}{2} = 50.0 \text{ kN} \quad < F_{t,Rd} < B_{p,Rd}$$

Il collegamento è verificato

# Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

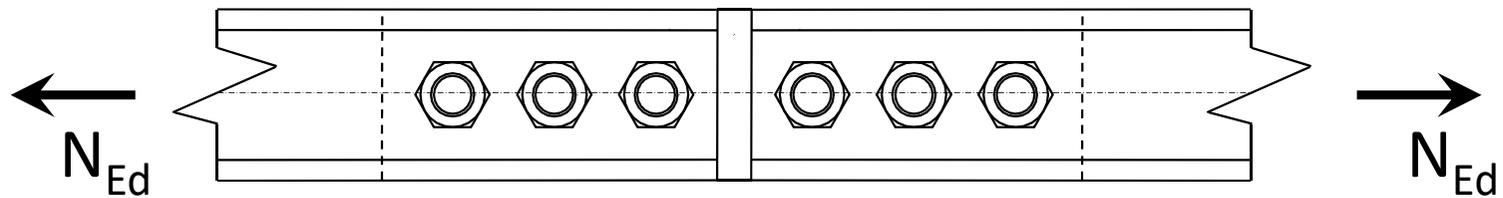
## Meccanismi di rottura



# Collegamenti bullonati

Bulloni sollecitati a taglio

## Meccanismi di rottura

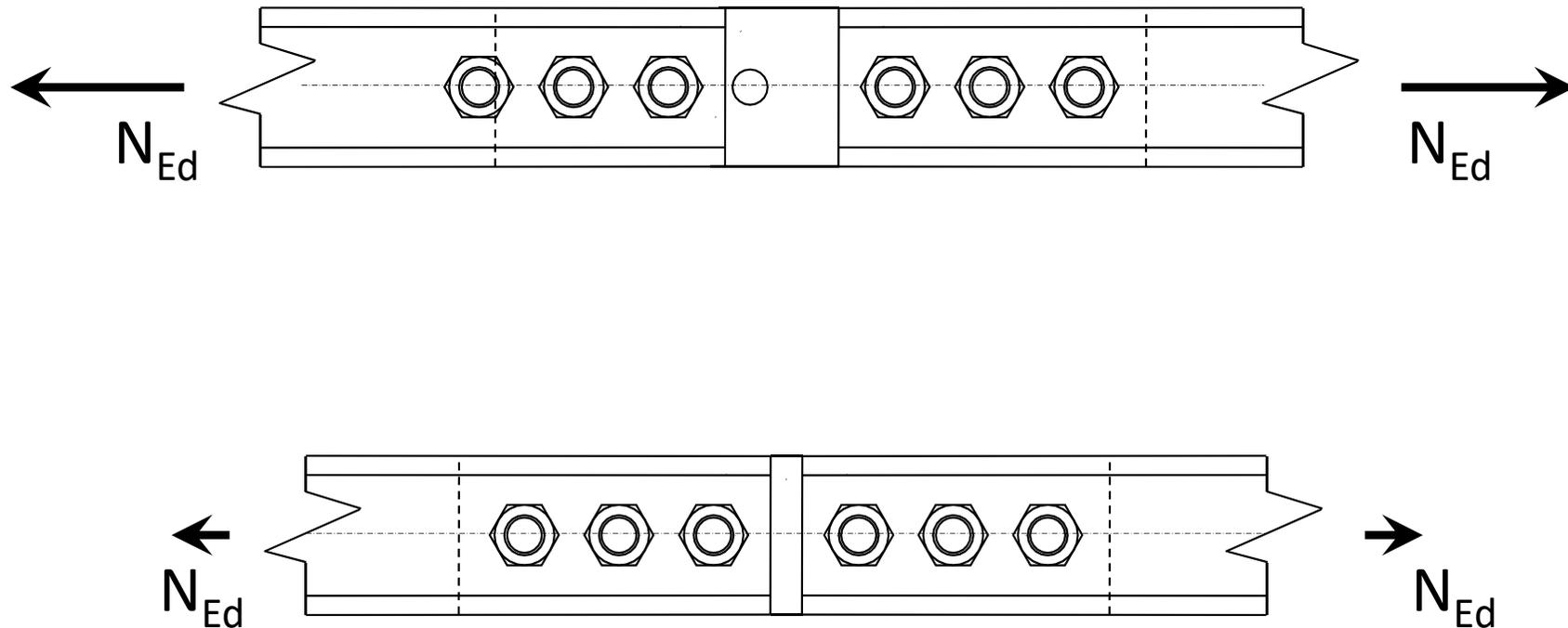


# Collegamenti bullonati

## Bulloni sollecitati a taglio

### Meccanismi di rottura

#### 1. Rottura dei bulloni a taglio

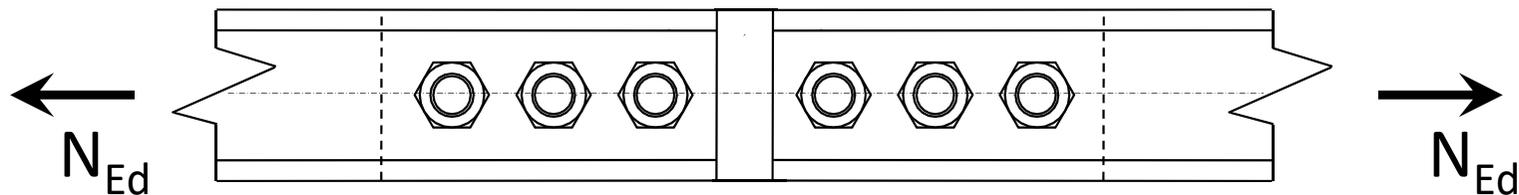
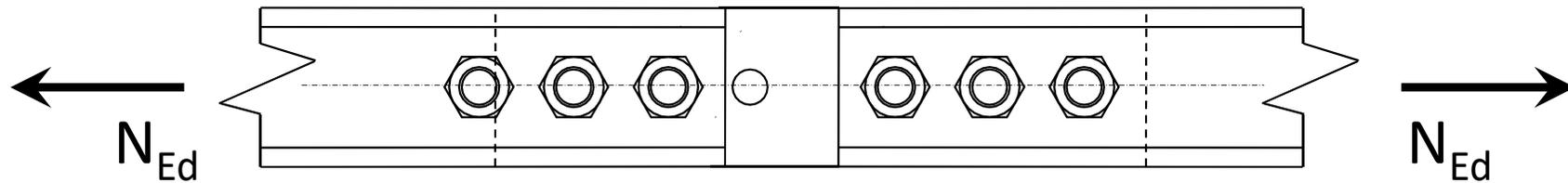


# Collegamenti bullonati

## Bulloni sollecitati a taglio

### Meccanismi di rottura

#### 1. Rottura dei bulloni a taglio

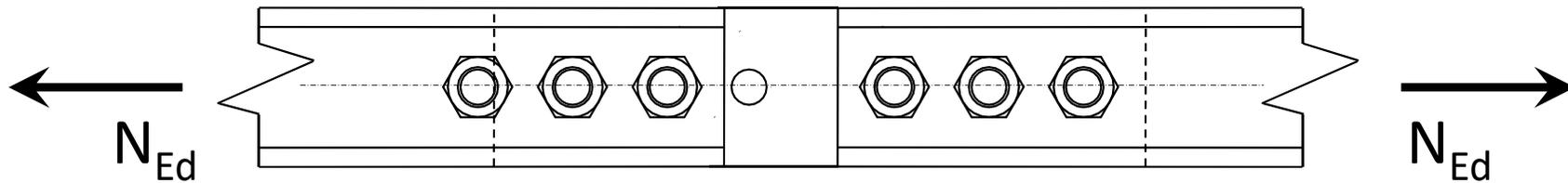


# Collegamenti bullonati

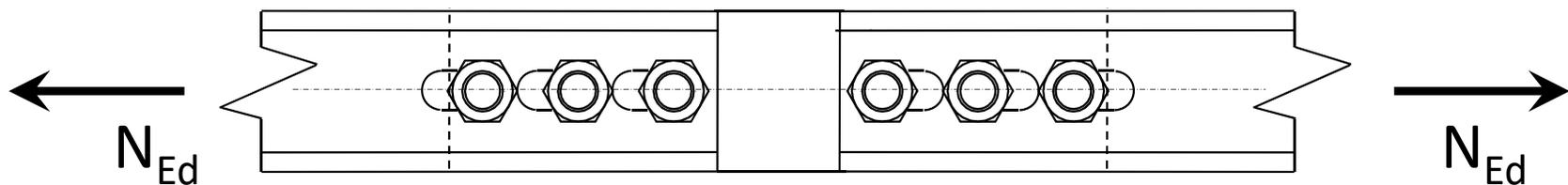
## Bulloni sollecitati a taglio

### Meccanismi di rottura

#### 1. Rottura dei bulloni a taglio



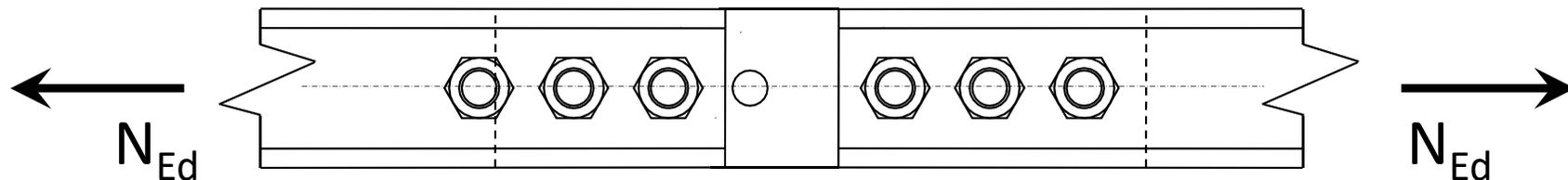
#### 2. Rifollamento delle lamiere



# 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  $f_{ub} / \sqrt{3}$

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

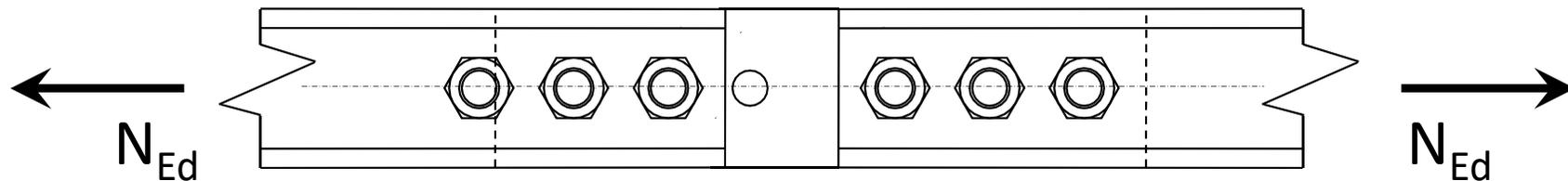
dove:

**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  $f_{ub} / \sqrt{3}$

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

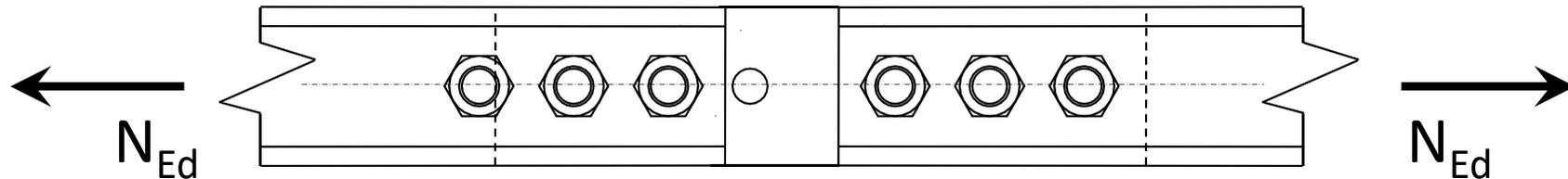
dove:

**A** Area nominale del bullone

# Resistenza di collegamenti bullonati

## Bulloni sollecitati a taglio

### 1. Rottura dei bulloni a taglio



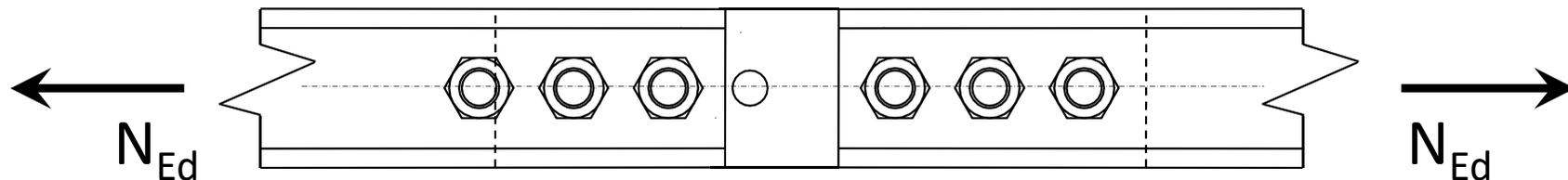
Se il piano di taglio  
non attraversa la parte filettata del bullone:

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

# 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:

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

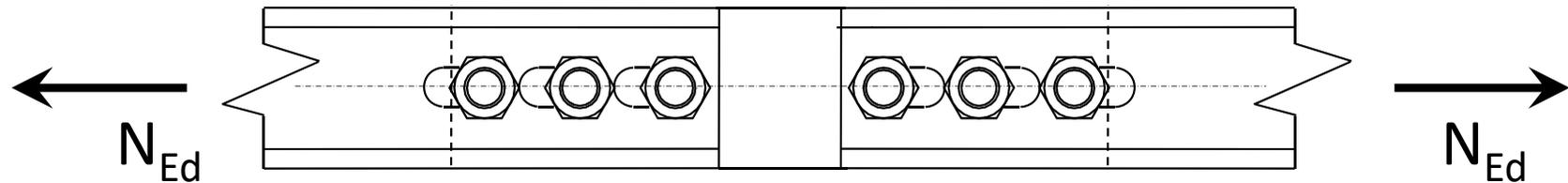
$$F_{v,Rd} = 0.5 A_{res} f_{ub} / \gamma_{M2} \quad (\text{bulloni di classe 6.8 e 10.9})$$

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:

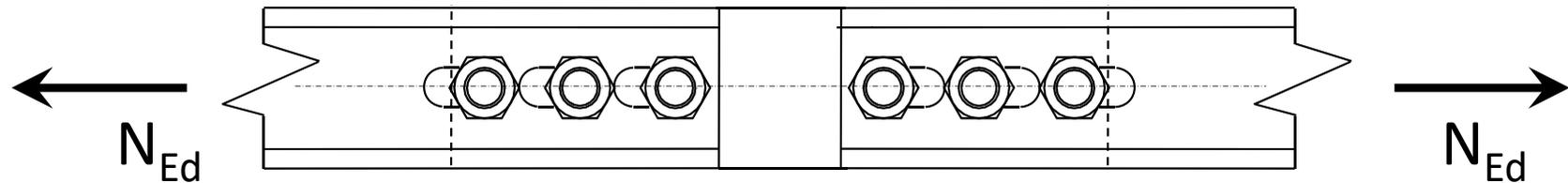
$d$       Diametro del bullone

$t_p$      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

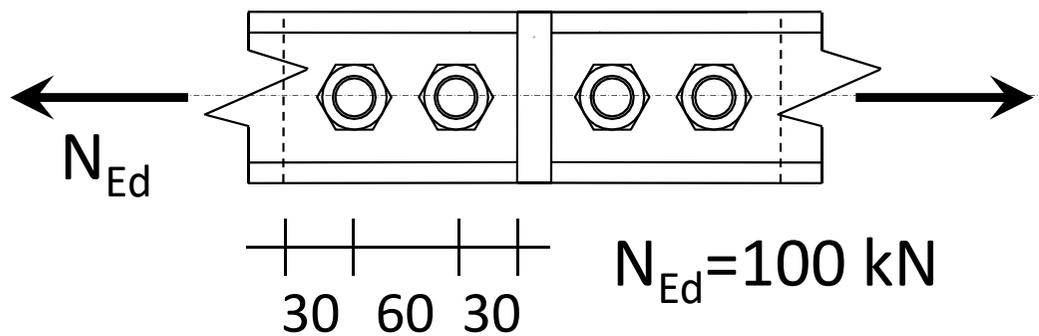
$$k = \min\left(\frac{1.4 p_2}{d_0} - 1.7, 2.5\right)$$

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

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

# Verifica di collegamento bullonato

## Esempio



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

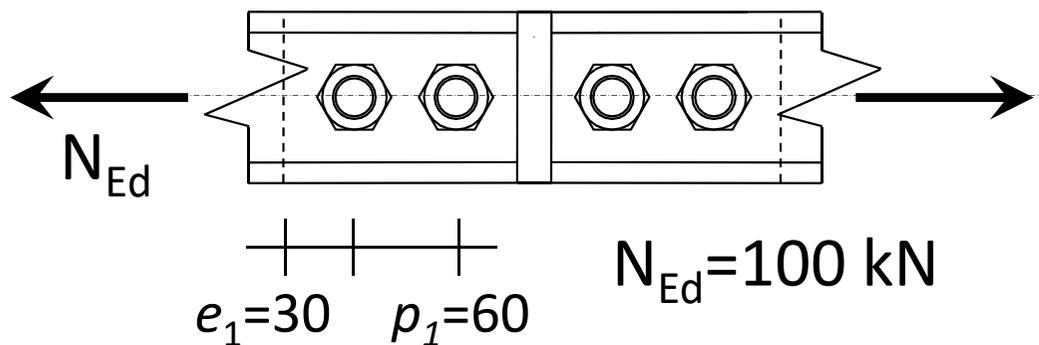
### 1. Determinazione di $F_{v,Rd}$

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

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

# Verifica di collegamento bullonato

## Esempio



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

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

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

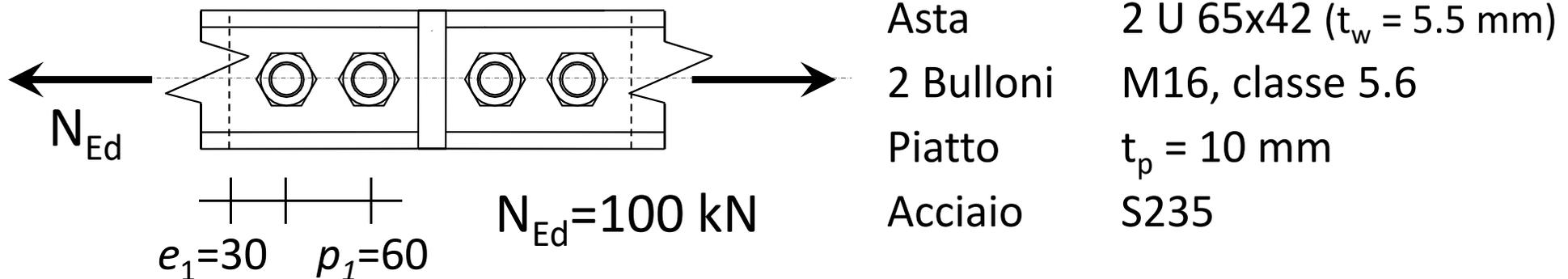
$$k = 2.5$$

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

Quasi sempre  $> 1$

# Verifica di collegamento bullonato

## Esempio



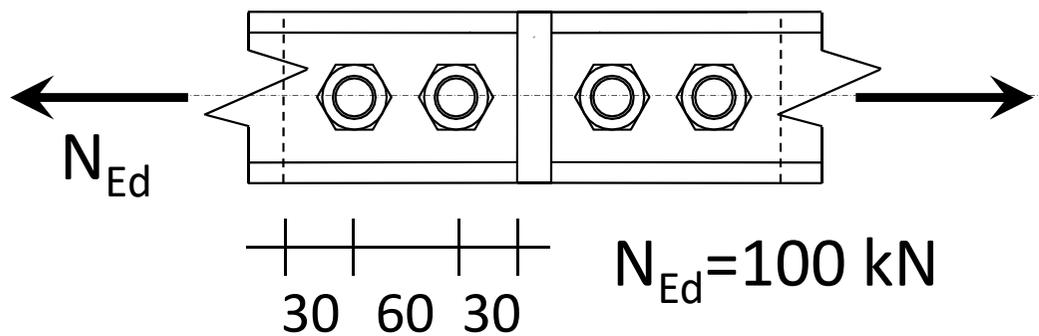
## 2. Determinazione di $F_{b,Rd}$ (del piatto)

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

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

# Verifica di collegamento bullonato

## Esempio



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

### 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

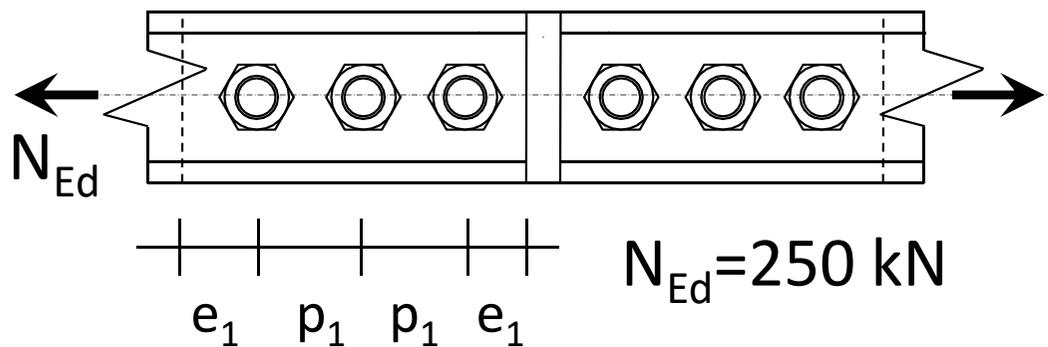
## Suggerimento progettuale

### **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

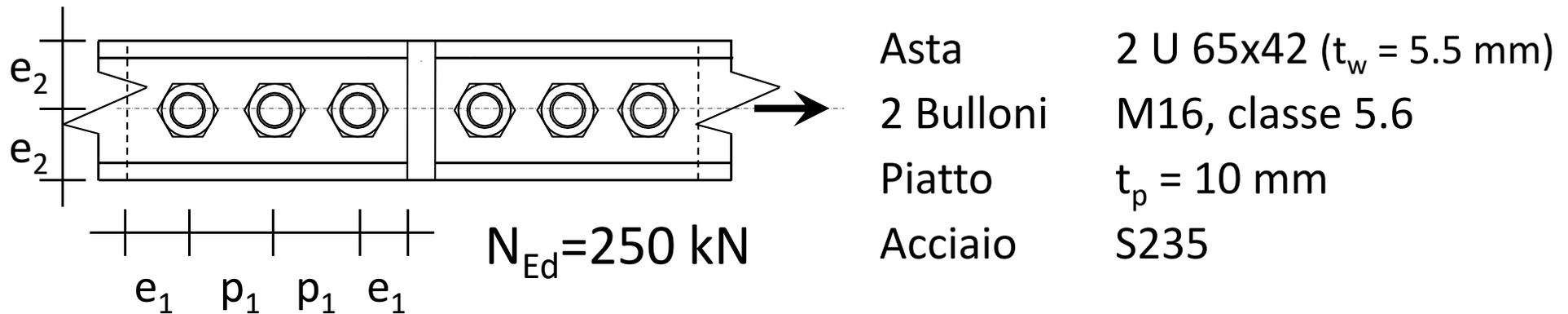
### 1. Determinazione del numero di bulloni

$$n_b = \frac{N_{Ed}}{2 F_{v,Rd}} = \frac{250}{2 \times 48.2} = \cancel{2.59}$$

Uso 3 bulloni

# Progetto di collegamento bullonato

## Esempio

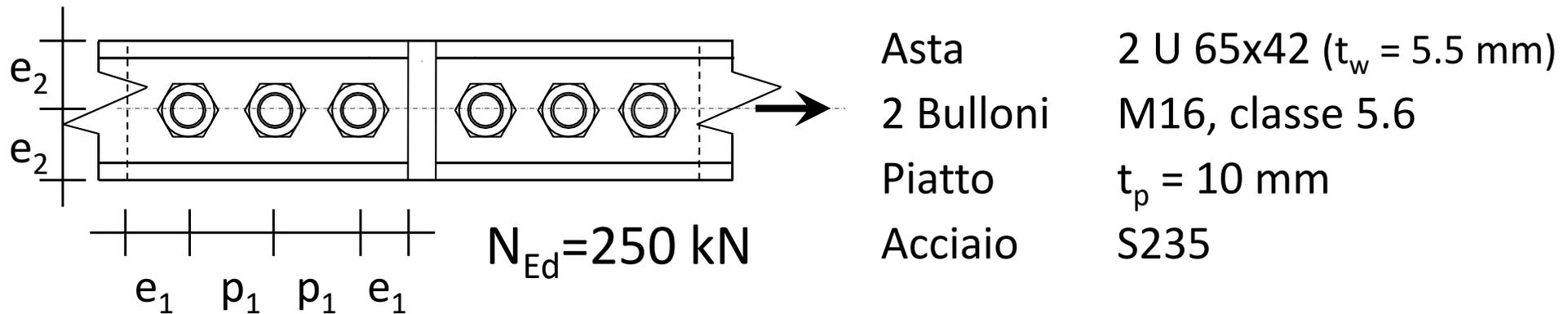


## 2. Determinazione delle distanze (calcolo k)

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

# Progetto di collegamento bullonato

## Esempio



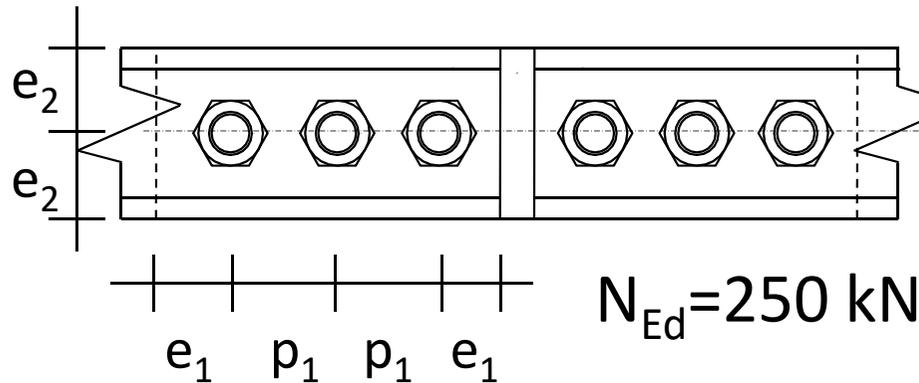
## 2. Determinazione delle distanze (calcolo $\alpha$ necessario)

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

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

# Progetto di collegamento bullonato

## Esempio



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

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

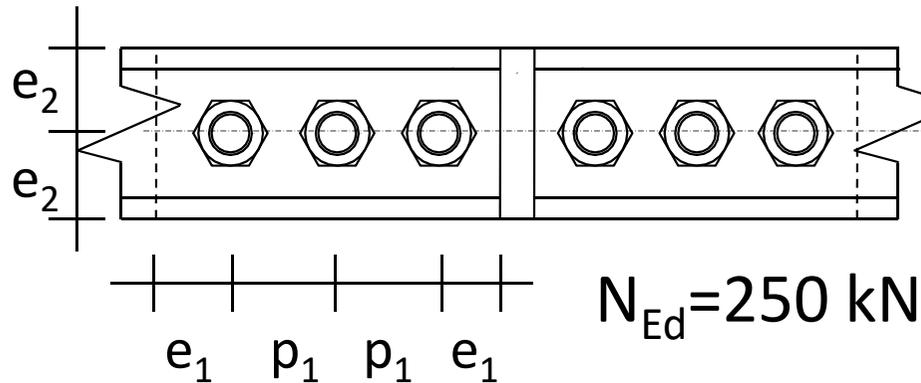
$$\alpha = \min \left( \frac{e_1}{3 d_0}, \frac{p_1}{3 d_0} - 0.25, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$$

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

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

# 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

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

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

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

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

# 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

$\mu$  coefficiente di attrito

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

$n$  numero di superfici di contatto

FINE