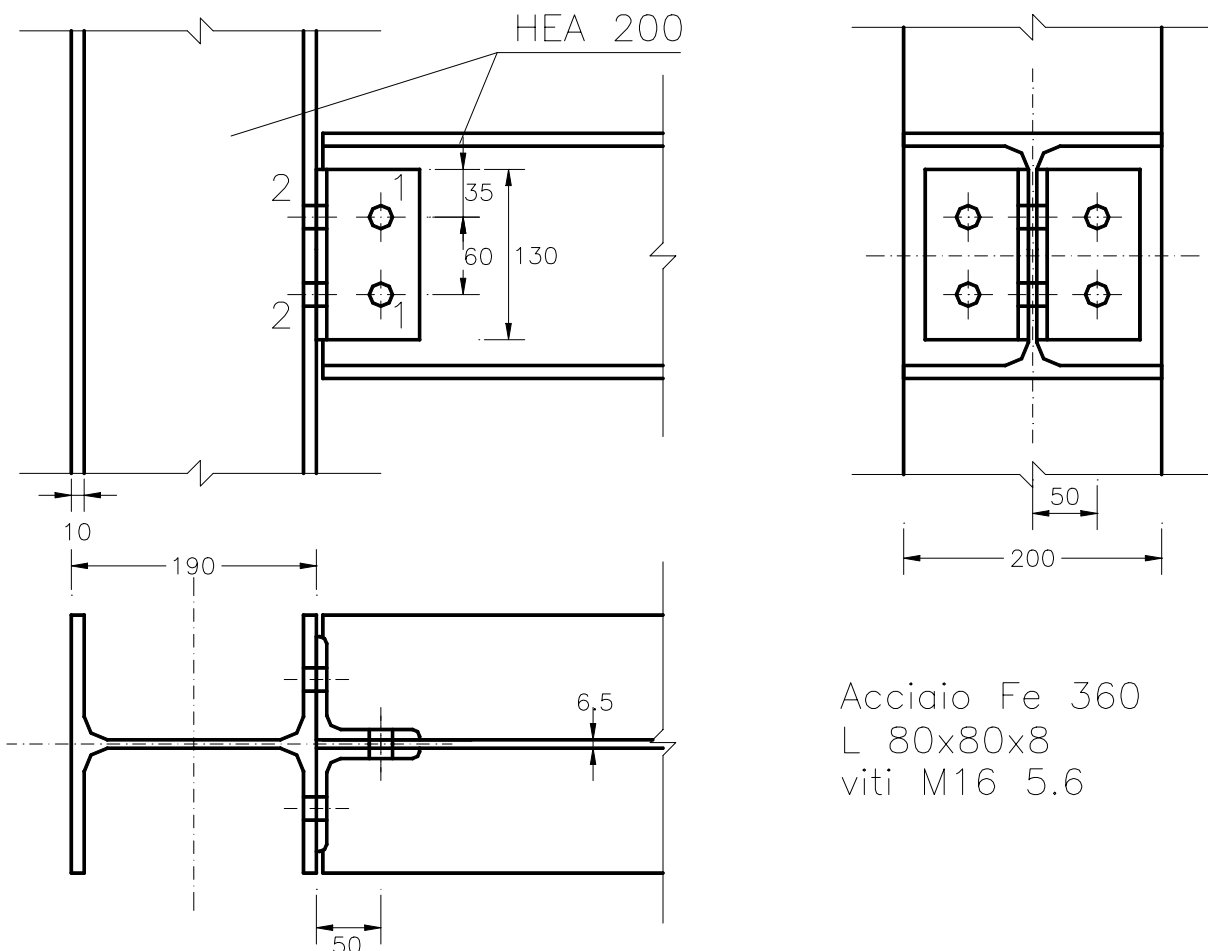
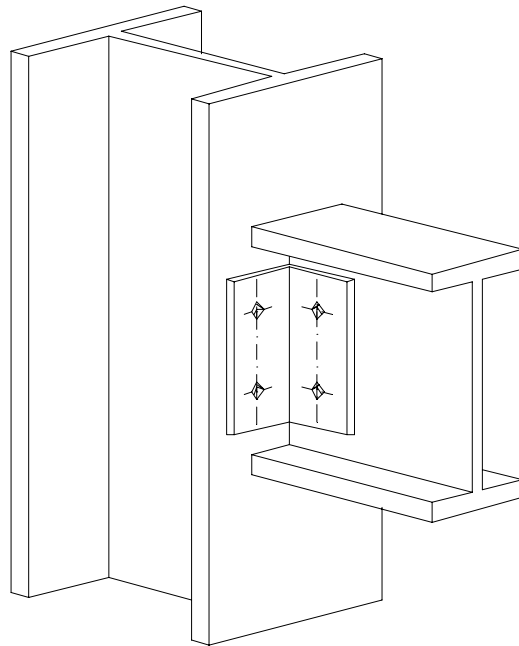
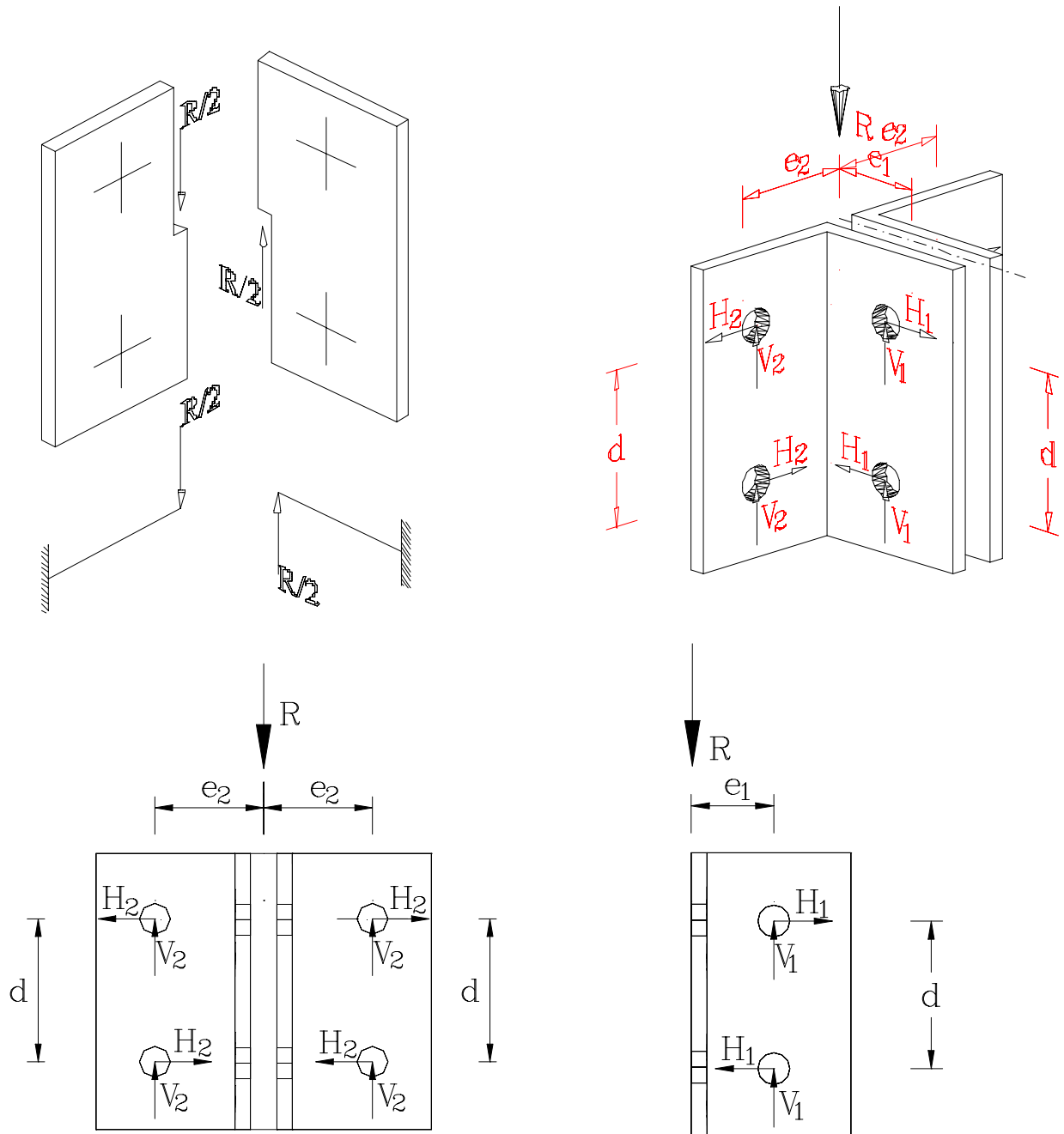


## ESEMPIO 1: giunto a cerniera con squadrette d'anima

Si determini la massima reazione che il giunto a cerniera mostrato in figura è in grado di sopportare. Si illustrano tre soluzioni equilibrate poiché il giunto può essere studiato con diverse posizioni della cerniera. La soluzione più usata è quella indicata con a).



- **Soluzione a):** cerniera in corrispondenza dell'intersezione del piano verticale di simmetria della trave con l'ala della colonna. Questa soluzione è la più usata ed è caratterizzata da bulloni che lavorano solo a taglio.



Nella figura sono mostrate le azioni equilibranti dei bulloni.

La reazione d'appoggio  $R$  della trave si distribuisce in parti uguali sulle due:

Taglio	$R/2$
Momento torcente	$R/2 e$

Quindi:

$$V_1 = \frac{R}{4} \quad H_1 = \frac{R}{2} \cdot \frac{e_1}{d} \quad \text{sulla bullonatura 1-1}$$

$$V_2 = \frac{R}{4} \quad H_2 = \frac{R}{2} \cdot \frac{e_2}{d} \quad \text{sulla bullonatura 2-2}$$

Nel nostro caso:  $e_1=e_2=50\text{mm}$

La sezione del singolo bullone è quindi soggetta alle componenti

$$V_1 = V_2 = R / 4 \quad H_1 = H_2 = \frac{R}{2} \cdot \frac{50}{60}$$

di risultante:  $F_1 = F_2 = \sqrt{H_1^2 + V_1^2} = 0.486 \cdot R$

Secondo EC3 [#6.5.3.1], trattandosi di bulloni di classe 5.6, la bullonatura non può che essere di categoria A (a taglio). La verifica allo stato limite ultimo va quindi eseguita in base a:

1. resistenza di progetto a taglio dei bulloni
2. resistenza di progetto a rifollamento
3. resistenza delle sezioni nette

1. Resistenza di progetto a taglio dei bulloni [EC3 prospetto 6.5.3]

$$F_{V,Rd} = \frac{0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}} = 37.68 \text{ kN}$$

con  $f_{ub}=500 \text{ N/mm}^2$

$A_s=157$  area resistente M16

$\gamma_{Mb}=1.25$  coeff. di sicurezza delle unioni bullonate

La forza che sollecita il bullone deve essere minore della resistenza:

$$F_1 = 0.486 \cdot R \leq 37.68 \text{ kN} \Rightarrow R \leq 77.53 \text{ kN}$$

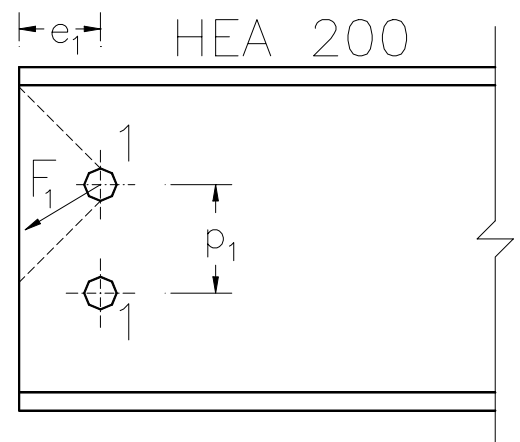
2. Resistenza di progetto a rifollamento [EC3 prospetto 6.5.3]

Il punto più debole è costituito dall'anima della trave che ha uno spessore minore (6,5mm) ed è soggetta alla forza di rifollamento maggiore, pari a  $2F_1$ .

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{Mb}} = 62.4 \text{ kN}$$

con  $f_u=360 \text{ N/mm}^2$  resistenza ultima della trave  
 $d=16 \text{ mm}$  diametro del bullone  
 $t=6.5 \text{ mm}$  spessore dell'anima della trave

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{45}{3 \cdot 18} = 0.833 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = \frac{60}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 0.86 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{360} = 1.39 \\ 1 \end{array} \right.$$



essendo:  $d_0=16+2=18 \text{ mm}$  diametro del foro

$p_1=60 \text{ mm}$  interasse fra i bulloni

$e_1=45 \text{ mm}$  distanza dal centro del foro all'estremità dell'anima nella direzione della forza ( $>1.2d_0$  EC3 #6.5.1.2.).

Si noti che per  $e_1$  si è utilizzata la distanza dal bordo in direzione orizzontale invece della distanza nella direzione della forza perché la rottura avviene comunque secondo le linee tratteggiate. Più discutibile è l'assunzione di  $p_1$ , che comunque non governa in questo caso la verifica.

Si ricava quindi il valore massimo della reazione R che il giunto può trasmettere:

$$2 \cdot F_1 \leq F_{b,Rd} \quad 2 \cdot 0.486 \cdot R \leq 62.4 \text{ kN} \quad \Rightarrow \quad \boxed{R \leq 64.2 \text{ kN}}$$

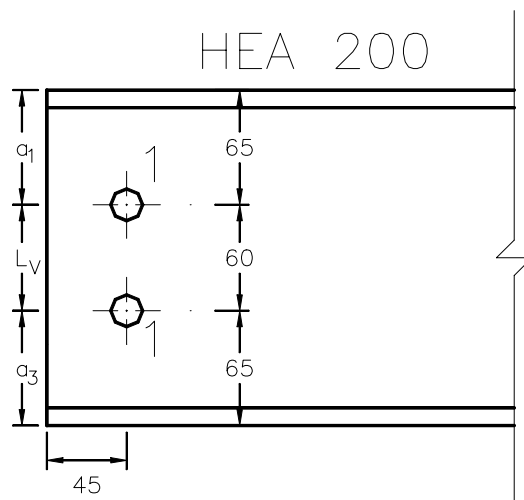
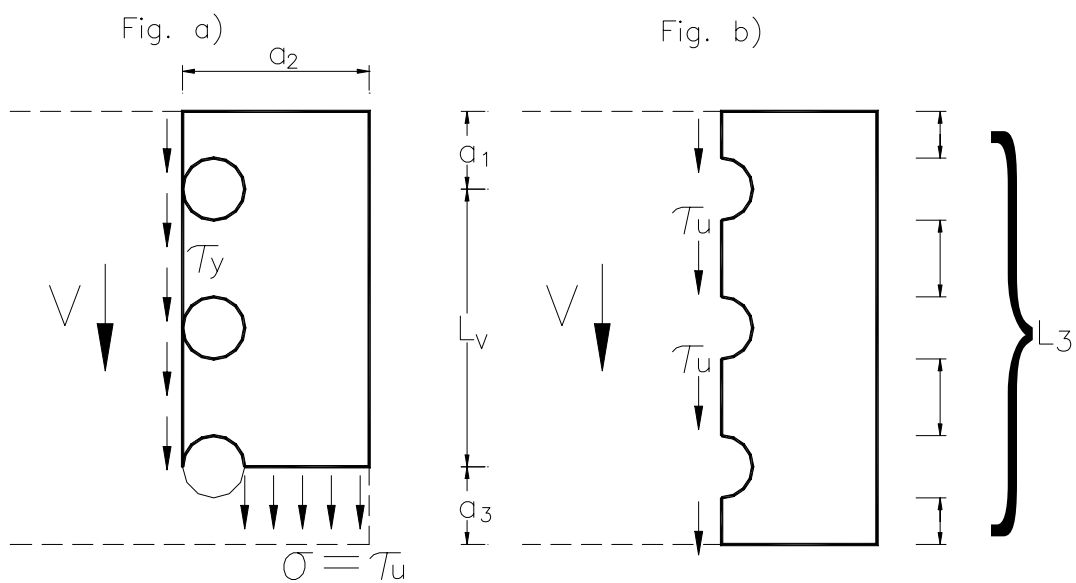
### 3. Resistenza delle sezioni nette

Come per la resistenza a rifollamento si verifica l'anima della trave che ha lo spessore minore e la forza di taglio maggiore pari a R.

Si deve valutare la resistenza a taglio secondo il meccanismo di collasso “*block shear*” [EC3 #6.5.2.2], che è caratterizzato da due possibili modalità di crisi:

a) rottura a trazione lungo la linea dei fori e in uno snervamento a taglio della sezione nella sezione lorda (fig. a),

b) rottura a taglio della sezione netta (fig. b).



Si valuta la resistenza a taglio dell'area efficace  $A_{v,eff}$ :

$$V_{eff.Rd} = \frac{(f_y / \sqrt{3}) \cdot A_{v,eff}}{\gamma_{M0}}$$

con:  $f_y=235 \text{ N/mm}^2$  resistenza a snervamento per Fe360

$\gamma_{M0}=1.1$  coeff. di sicurezza dell'acciaio

$A_{V,eff}$  area efficace a taglio nel meccanismo "block shear"

$$A_{V,eff} = t \cdot L_{V,eff}$$

$$L_{V,eff} = L_V + L_1 + L_2 \leq L_3$$

$$L_1 = a_1 = 65\text{mm} \leq 5 \cdot d_0 = 90\text{mm}$$

$$L_2 = (a_2 - k \cdot d_0) \frac{f_u}{f_y} = (45 - 0.5 \cdot 18) \frac{360}{235} = 55\text{mm}$$

con  $k=0.5$  per una fila di bulloni

$$L_{V,eff} = 60 + 65 + 55 = 180\text{mm}$$

$$L_3 = (L_V + a_1 + a_3 - n \cdot d_0) \frac{f_u}{f_y} = (60 + 65 + 65 - 2 \cdot 18) \frac{360}{235} = 235\text{mm}$$

$$A_{V,eff} = t \cdot L_{V,eff} = 6.5 \cdot 180 = 1170\text{mm}^2$$

Si noti che qualora  $L_3$  risulti minore di  $L_{V,eff}$  il meccanismo di collasso si ha per una rottura a taglio della sezione netta.

Quindi risulta che:

$$V_{eff,Rd} = 144.31\text{kN} \geq R$$

La condizione più restrittiva è la verifica a rifollamento dell'anima della trave, e quindi la reazione massima all'appoggio risulta:

$$R_{s,d} \leq 63.94\text{kN}$$

Se il coefficiente di sicurezza della azioni vale 1.5 la reazione ammissibile in esercizio vale

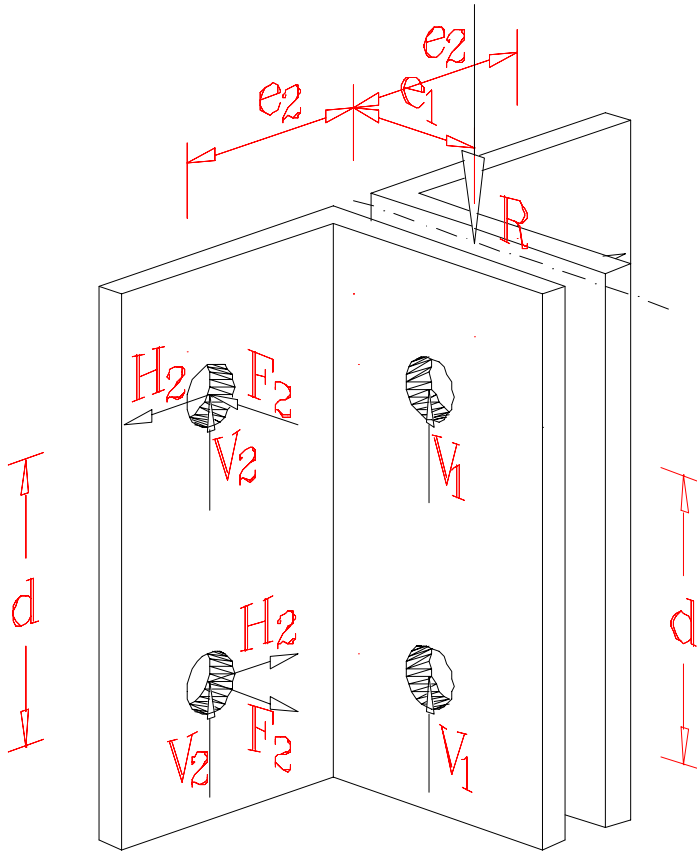
$$R \leq 63.94\text{kN}/1.5 = 42.63\text{kN}$$

Poiché è condizionante la verifica a rifollamento dell'anima della trave, potrebbe essere conveniente adottare un diverso modello di calcolo, con cerniera in corrispondenza della bullonatura 1-1 (schema b e c).

- **Soluzione b):** cerniera in corrispondenza della bullonatura 1-1.

Bullonatura 1-1: soggetta a taglio

Bullonatura 2-2: soggetta a taglio, torsione e flessione



Azioni su ciascuna squadretta:

Taglio  $V=R/2$  (bull. 1-1 e 2-2)

Torsione  $M_t=V e_2$  (bull. 2-2)

Flessione  $M_f=V e_1$  (bull. 2-2)

Quindi:

$$V_1 = V_2 = \frac{R}{4}$$

$$H_2 = \frac{M_t}{d} = \frac{R}{2} \cdot \frac{e_2}{d}$$

$$F_2 = \frac{M_f}{d} = \frac{R}{2} \cdot \frac{e_1}{d}$$

La verifica del giunto non è più governata come nel caso a) dal rifollamento

dell'anima della trave, ma dalla verifica a trazione e taglio dei bulloni 2-2.

Infatti i bulloni 2-2 sono sollecitati da una forza di taglio uguale al caso precedente dovuta da una combinazione di taglio e torsione (schema statico a)) e da una trazione  $F_2$  associata all'azione flettente.

La sezione del singolo bullone 2 è quindi soggetta alle componenti di taglio

$$V_2 = R / 4 \qquad H_2 = \frac{R}{2} \cdot \frac{50}{60}$$

di risultante:  $F_{v.s.d} = \sqrt{H_2^2 + V_2^2} = 0.486 \cdot R$

La trazione è pari a  $H_2$ , essendo  $e_1=e_2$

$$F_{t.s.d} = \frac{R}{2} \cdot \frac{e_1}{d} = \frac{R}{2} \cdot \frac{50}{60}$$

Utilizzando la relazione proposta dall'EC3 per azione combinata di taglio e trazione [EC3 #6.5.5]:

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

con  $F_{v,Rd} = \frac{0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}} = 37.68 \text{ kN}$  resistenza a taglio M20 classe 5.6

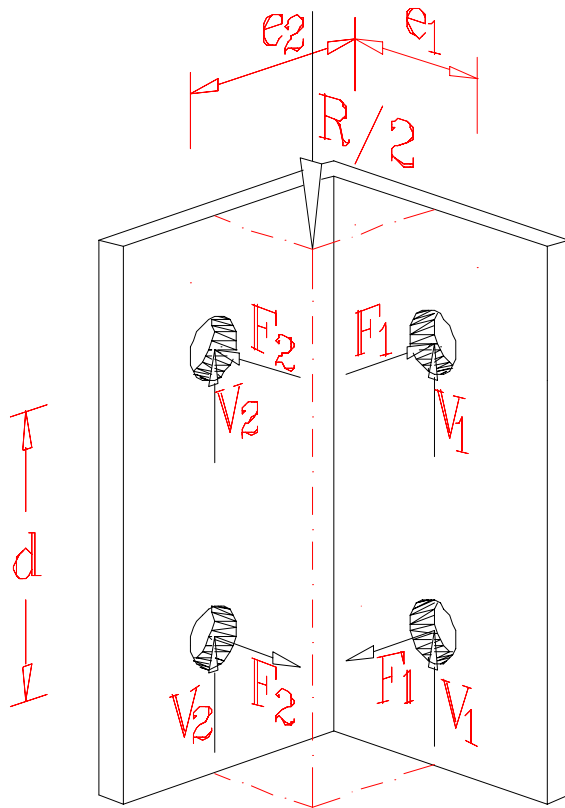
$F_{v,Rd} = \frac{0.9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}} = 56.52 \text{ kN}$  resistenza a trazione M20 classe 5.6

risulta che  $R \leq 55 \text{ kN}$

In ogni caso è meglio utilizzare il modello a), poiché in questo e nel successivo (schema b e c) si genera un momento torcente che sollecita le due squadrette.



**Soluzione c):** cerniera come in figura



Entrambe le bullonature sono soggette a taglio e flessione.

$$V_1 = V_2 = \frac{R}{4}$$

$$F_1 = \frac{R}{2} \cdot \frac{e_2}{d}$$

$$F_2 = \frac{R}{2} \cdot \frac{e_1}{d}$$

Nel nostro caso:  $e_1 = e_2$

$\Rightarrow$  stessa sollecitazione per le bullonature 1-1 e 2-2

Utilizzando la relazione proposta dall'EC3 per azione combinata di taglio e trazione [EC3 #6.5.5]:

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

con  $F_{v.Rd} = \frac{0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}} = 37.68 \text{ kN}$  resistenza a taglio M20 classe 5.6

$F_{v.Rd} = \frac{0.9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}} = 56.52 \text{ kN}$  resistenza a trazione M20 classe 5.6

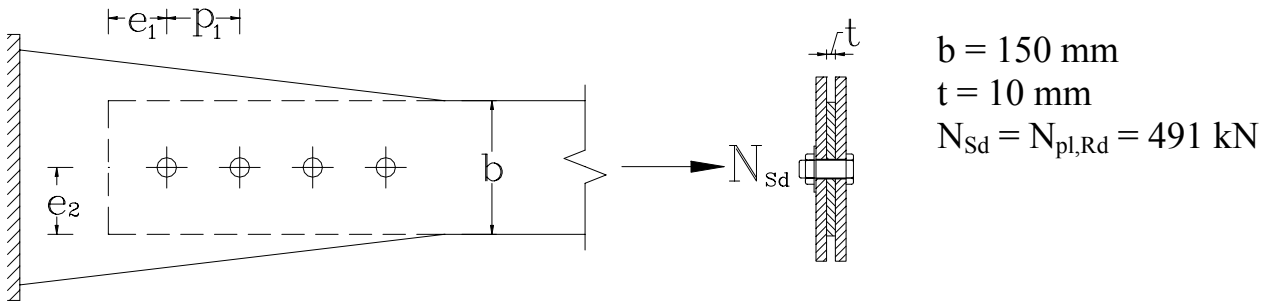
$F_{v.Sd} = \frac{R}{4}$  taglio sul singolo bullone

$F_{t.Sd} = \frac{R}{2} \cdot \frac{50}{60}$  trazione sul singolo bullone

risulta:  $R \leq 84 \text{ kN}$

## ESEMPIO 2: CONTROLLO DELLA DUTTILITA'

Progettare un giunto bullonato a completo ripristino per un'asta tesa in acciaio Fe360 con sezione 150x10mm



### 1. Giunzione a taglio

Affinché il giunto sia a completo ripristino è necessario che la resistenza ultima di progetto della sezione netta in corrispondenza dei fori sia maggiore della resistenza plastica di progetto della sezione lorda [EC3 #5.4.3].

$$N_{u,Rd} = 0.9 \cdot A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2} \geq N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

con  $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$

$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

$\gamma_{M0} = 1.1$

coeff. di sicurezza delle sezioni di classe 1, 2 e 3

$\gamma_{M2} = 1.25$

coeff. di sicurezza delle sezioni nette in corrispondenza dei fori per le bullonature

Per cui risulta che:

$$\frac{A_{net}}{A} \geq \frac{f_y}{f_u} \frac{\gamma_{M2}}{0.9 \cdot \gamma_{M0}} = 0.824$$

Indicando con  $d_0$  il diametro del foro e con  $b$  la larghezza della sezione, deve essere:

$$\frac{b - d_0}{b} \geq 0.824 \quad \Rightarrow \quad d_0 \leq 0.176 \cdot b = 26 \text{ mm}$$

Il diametro del foro deve rispettare anche la condizione  $d_0 = d + 2 \text{ mm} \leq 26 \text{ mm}$  [EC3 #7.5.2].

Si sceglie un bullone M20 di classe 5.6. Per evitare il pericolo di rottura fragile per taglio del bullone, è opportuno che la resistenza a taglio del bullone  $F_{V,Rd}$  sia maggiore della resistenza a rifollamento  $F_{b,Rd}$ .

Per cui se i piani di taglio non attraversano la filettatura dei bulloni, si ha:

$$F_{V,Rd} = 2 \frac{0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_b}{\gamma_{Mb}} \quad \text{due piani di taglio}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{Mb}} \quad \text{assumendo } \alpha \text{ pari a } 1$$

$$\frac{A_b}{d \cdot t} \geq \frac{2.5}{2 \cdot 0.6} \cdot \frac{f_u}{f_{ub}}$$

ed essendo  $A_b = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$  risulta:

$$\frac{d}{t} = 2 \geq 2.65 \frac{f_u}{f_{ub}} = 1.91$$

Il numero dei bulloni va calcolato in modo che la resistenza della giunzione sia maggiore della resistenza plastica  $N_{pl,Rd}$ .

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} = 150 \cdot 10 \cdot 360 / 1.1 = 491 \text{ KN}$$

La resistenza di ciascun bullone è governata dalla resistenza a rifollamento che risulta

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{Mb}} = \frac{2.5 \cdot 1 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 10}{1.25} = 144 \text{ KN}$$

Si definisce la posizione dei bulloni affinché il coefficiente  $\alpha$  della resistenza di progetto a rifollamento sia pari all'unità.

$$\alpha = \min \begin{cases} \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{3 \cdot d_0}{3 \cdot d_0} = 1 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = \frac{3.75 \cdot d_0}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = 1 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{360} = 1.39 \\ 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} e_1 = 3 \cdot d_0 = 3 \cdot 22 = 66 \text{ mm} \\ p_1 = 3.75 \cdot d_0 = 82.5 \text{ mm} \end{cases}$$

Sono quindi necessari 4M20 di classe 5.6 (ultimamente la classe più impiegata è la 8.8).

Controllo del posizionamento dei fori [EC3 #6.5.1]

- distanze minime

$$e_2 = 75 > 1.5 \cdot d_0 = 33 \text{ mm}$$

- distanze massime

elementi esposti alla corrosione

$$e_2 = 75 < 40 \text{ mm} + 4 \cdot t = 80 \text{ mm}$$

Si noti che il problema è governato dal rifollamento e che non si può scendere a tre bulloni. La classe del bullone è meno importante perché il costo varia poco.

Si riporta nella figura il calcolo della resistenza del bullone eseguito con il programma profili (<http://civserv.ing.unibs.it/utenti/gelfi/>).

**Resistenza di progetto dei bulloni - EC3 #6.5.5.**

Classe bullone: 5,6    diametro d: 20     $f_{yb}$ : 300     $f_{ub}$ : 500    N/mm<sup>2</sup>

Sezione filettata  
 Sezione lorda    Area: 314,2    mm<sup>2</sup>

Resistenza a taglio (per piano di taglio)  $F_{v,Rd}$ : 75,4    kN  
 Resistenza a trazione  $F_{t,Rd}$ : 88,2    kN

Taglio e Trazione - EC3 #6.5.5.(5)

$F_{v,Sd}$ : 0     $F_{t,Sd}$ : 0    kN

$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1.4 F_{t,Rd}} = 0 + 0 = 0$     **OK**

---

**Rifollamento**

Acciaio: S235 (Fe360)     $f_u$ : 360    N/mm<sup>2</sup>

spessore t: 10    mm  
 diametro foro  $d_0$ : 22    mm  
 distanze bordo  $e_1$ : 66     $e_2$ : 33  
 passo  $p_1$ : 82,5     $p_2$ : 66

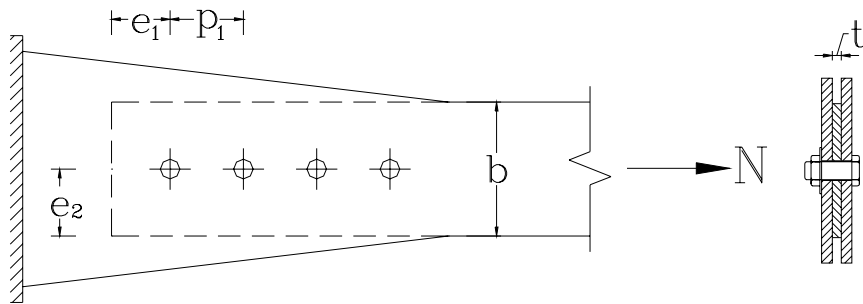
$\alpha$ : 1

Resistenza a rifollamento  $F_{b,Rd}$ : 144    kN    **Osservazioni**

Diagramma: Direzione carico →. Dimensioni:  $p_1$ ,  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $p_2$ ,  $d_0$ .

## 2. Giunzione ad attrito

Si progetta un collegamento di classe B (EC3 [#6.5.3.1]), per il quale non si deve avere scorrimento allo stato limite di servizio. Per le giunzioni ad attrito si usano solo bulloni di classe 8.8 e 10.9 ad alto limite di snervamento, per evitare perdite di carico per rilassamento del bullone.



Dati progettuali:

- a completo ripristino
- superfici di classe C, ovvero pulite mediante spazzolatura ( $\mu=0.3$ ; EC3 #6.5.8.3)
- M20 classe 10.9
- sollecitazione allo S.L.U.  $N_{pl.Rd} = 491 \text{ KN}$
- sollecitazione allo S.L.S.  $N_{Sd} = N_{pl.Rd} / 1.5 = 327 \text{ KN}$

Allo stato limite di servizio la resistenza di progetto allo scorrimento di un bullone [EC3 #6.5.8.1] risulta:

$$F_{s.Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{Ms}} F_{p.Cd} = 93.5 \text{ KN}$$

con $n=2$	numero delle superfici di scorrimento
$\mu=0.3$	coeff. d'attrito (superfici di classe C)
$k_s=1$	gioco foro-bullone normale
$F_{p.Cd} = 0.7 \cdot f_{ub} \cdot A_s = 171.5 \text{ KN}$	forza di progetto di precarico
$f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$	
$A_s = 245 \text{ mm}^2$	area resistente M20

$$\gamma_{MS}=1.1$$

coeff. di sicurezza per lo S.L.S.

Sono necessari 4 bulloni M20:

$$4 \cdot F_{s,Rd} = 374 \text{ KN} > N_{S,d} = 327 \text{ KN}$$

Si noti che la classe 8.8 non sarebbe sufficiente. Le verifiche allo stato limite ultimo (resistenza a taglio e a rifollamento), già soddisfatte con bulloni classe 5.6, lo sono a maggior ragione con la classe 10.9.