QUADERNI DI PROGETTAZIONE STRUTTURALE

4: COLLEGAMENTI BULLONATI NEI NODI TRAVE – COLONNA

Fondazione
Promozione Acciaio

CRESCE L'ACCIAIO, CRESCE IL PAESE.

COLLEGAMENTI BULLONATI NEI NODI TRAVE - COLONNA

I collegamenti bullonati rappresentano uno dei modi con cui di solito vengono realizzate le unioni tra elementi strutturali in acciaio. In generale, vengono utilizzati principalmente per:

- prolungare le membrature tramite giunzioni (*beam splice, column splice*)
- collegare membrature tipologicamente differenti (*beam-to-column joint*)
- collegare le colonne alle fondazioni (*column base)*

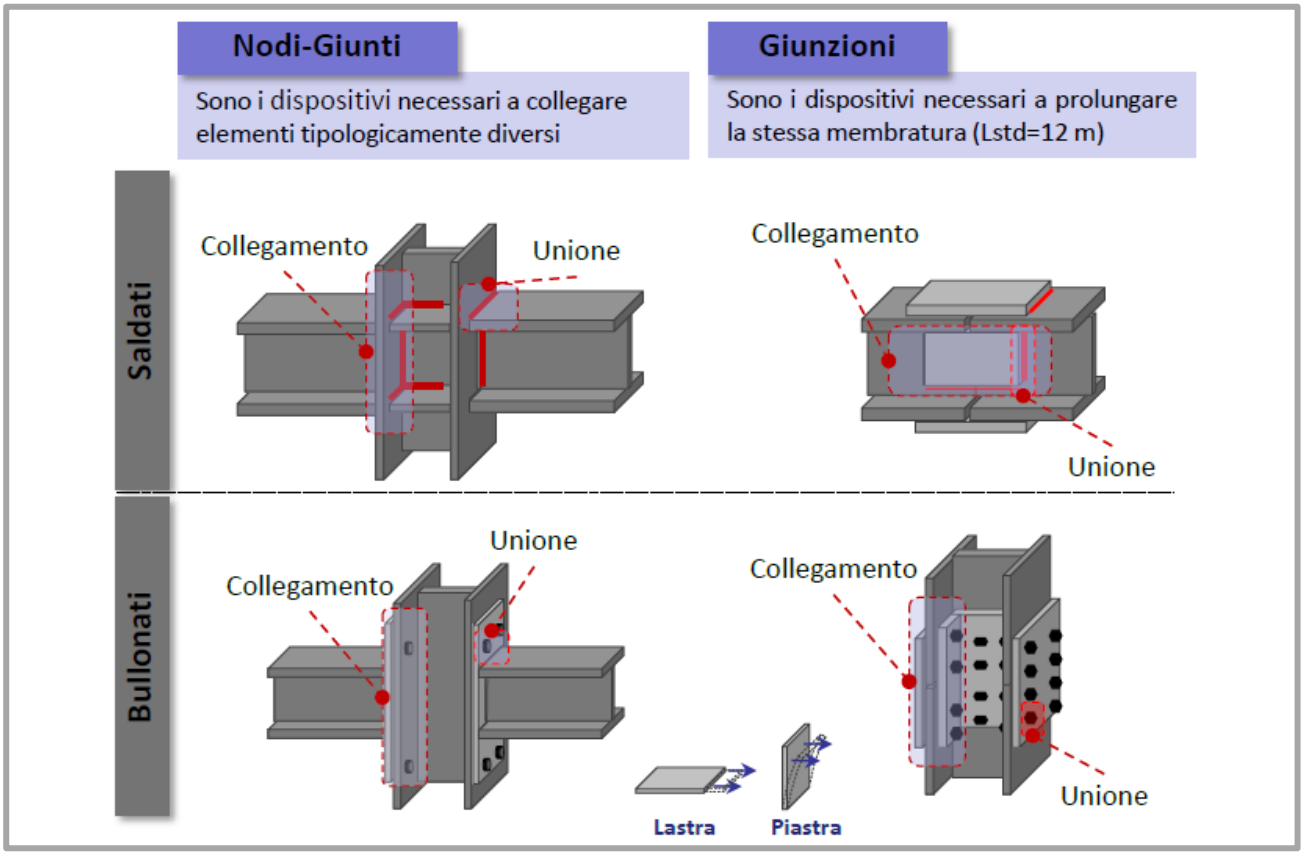


Fig.1 – Nomenclatura per i collegamenti in acciaio

Tramite i collegamenti è possibile dunque trasmettere le caratteristiche di sollecitazione tra le varie membrature collegate. In questo quaderno si farà riferimento ai collegamenti bullonati per i **nodi trave-colonna**.

Riferimenti normativi

Le normative da seguire per la progettazione delle unioni bullonate sono:

- D.M. 14/01/2008: Norme tecniche per le costruzioni, dal 22/03/2018 il nuovo riferimento normativo italiano è il DM 17/01/2018 Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni")
- UNI EN 1993-1-8 (Eurocodice 3): Progettazione delle strutture di acciaio – Parte 1-8: Progettazione dei collegamenti.

INFLUENZA NELL'ANALISI DELLA RIGIDEZZA DEI COLLEGAMENTI TRAVE-COLONNA

Classificazione in base al tipo di vincolo

A seconda del tipo di connessione fra le membrature l'Eurocodice 3 individua, dal punto di vista statico, la seguente classificazione (*EN 1993-1-8:2005 – 5 Analysis, classification and modelling*):

- collegamenti a cerniera (collegamenti semplici)
- collegamenti rigidi e a completo ripristino di resistenza (collegamenti continui)
- collegamenti semirigidi e a parziale o completo ripristino di resistenza (collegamenti semi-continui)

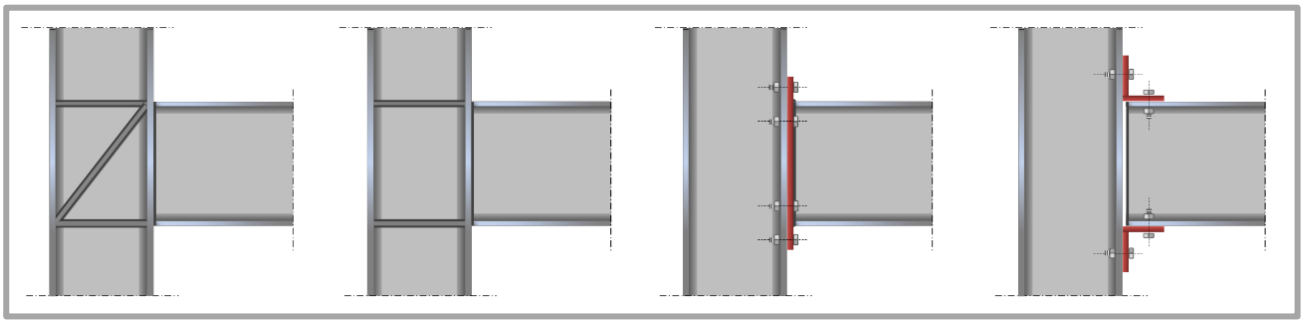


Fig.2 – Esempi tipici di nodi trave-colonna in acciaio

Contributo alla deformazione del collegamento

La configurazione e le proprietà dei collegamenti giocano un ruolo fondamentale nel comportamento del nodo in termini di distribuzione delle sollecitazioni interne. Analizzando la configurazione deformata di un telaio generico sottoposto all'azione di forze orizzontali, è possibile concepire lo spostamento verticale ***v*** della trave in campata, attraverso un'equivalenza cinematica, come se fosse prodotto da una forza verticale ***F*** applicata nello stesso punto. Di tale spostamento è pertanto possibile individuarne i contributi in funzione delle rispettive proprietà delle membrature (trave e colonna) e del nodo (pannello d'anima della colonna e componenti del collegamento),

$$v = v_b + v_c + v_j$$

dove:

v_b è il contributo della trave
v_c è il contributo della colonna
$v_j = v_{wp} + v_{conn}$ è il contributo del nodo, fortemente variabile a seconda delle caratteristiche geometriche e meccaniche del nodo

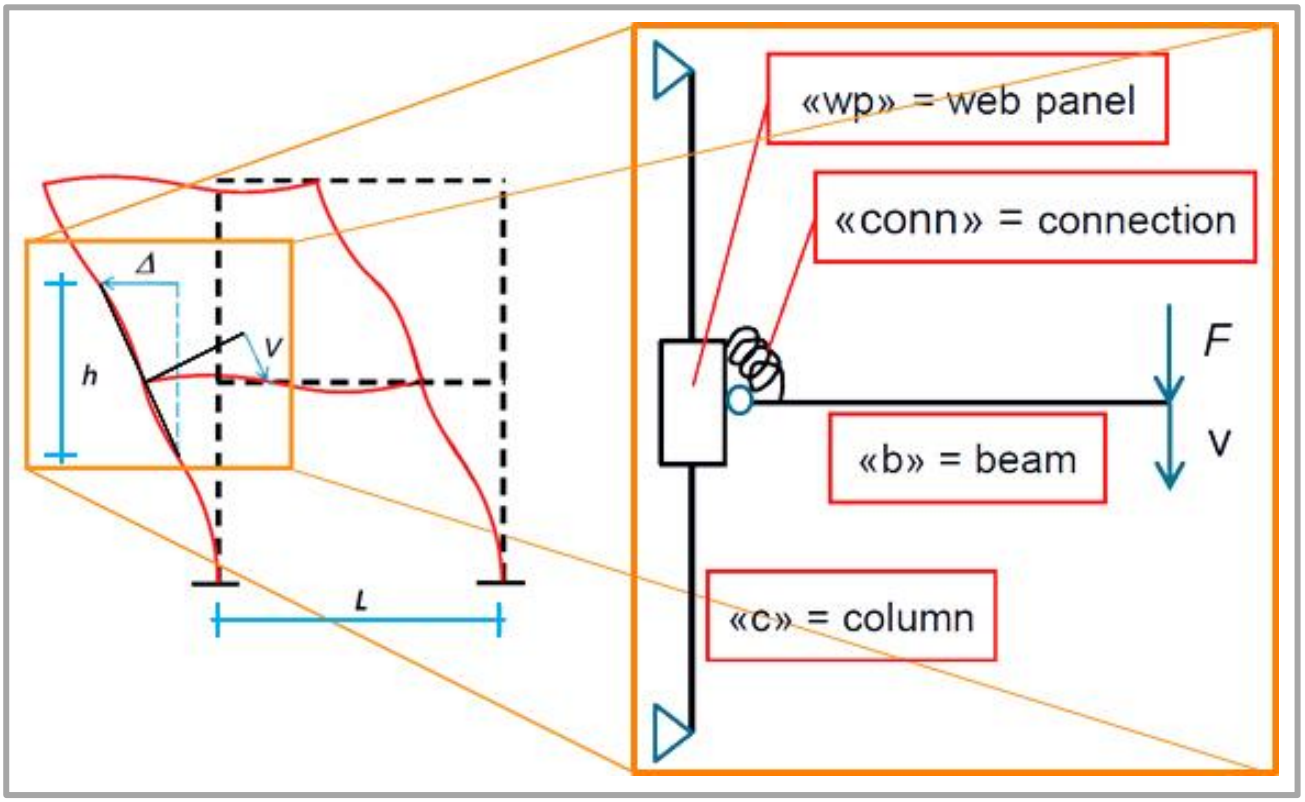


Fig.4 – Modellazione cinematica equivalente di un nodo trave-colonna all'interno di un telaio

Classificazione dei nodi in base alla rigidezza

Rigidi e a **completo ripristino** di resistenza	$v \approx v_b + v_c$ sia in campo elastico che plastico (v_j è sempre trascurabile)
Rigido e a **parziale ripristino** di resistenza	$v \approx v_b + v_c$ in campo elastico, ma non plastico (v_j è trascurabile in campo elastico)
Semi-rigidi e a **completo ripristino** di resistenza	$v \approx v_b + v_c$ in campo plastico, ma non elastico (v_j è trascurabile in campo plastico)
Semi-rigidi e a **parziale ripristino** di resistenza	$v > v_b + v_c$ sia in campo elastico che plastico (v_j non è mai trascurabile)

L'andamento forza-deformazione per le suddette tipologie di nodi è schematizzabile secondo il seguente grafico.

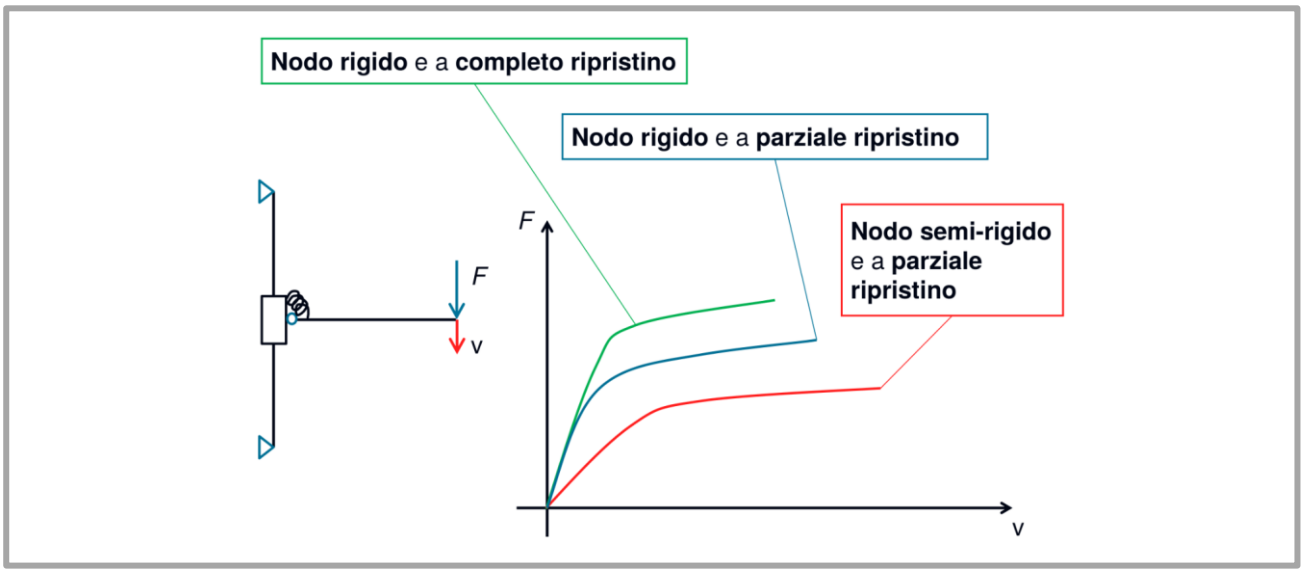


Fig.5 – Legame Forza-Spostamento al variare della rigidezza del collegamento

Un **telaio** può dirsi a **nodi rigidi** se il moltiplicatore critico elastico α_{cr} non è significativamente influenzato dalla semi-rigidezza dei nodi, potendo dunque trascurare gli effetti del secondo ordine. Secondo il DM 14/01/2008 (cap. 4.2.3.4 Effetti delle deformazioni) è infatti possibile effettuare l'analisi del primo ordine, imponendo l'equilibrio sulla configurazione iniziale della struttura, nei casi in cui possano ritenersi trascurabili gli effetti delle deformazioni sull'entità delle sollecitazioni, sui fenomeni di instabilità e su qualsiasi altro parametro di risposta della struttura. Tale condizione si può assumere verificata se risulta soddisfatta la relazione (4.2.2):

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \text{ per l'analisi elastica}$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15 \text{ per l'analisi plastica}$$

dove:

F_{ed} è il valore dei carichi di progetto
F_{cr} è il valore critico instabilizzante calcolato considerando la rigidezza iniziale elastica della struttura.

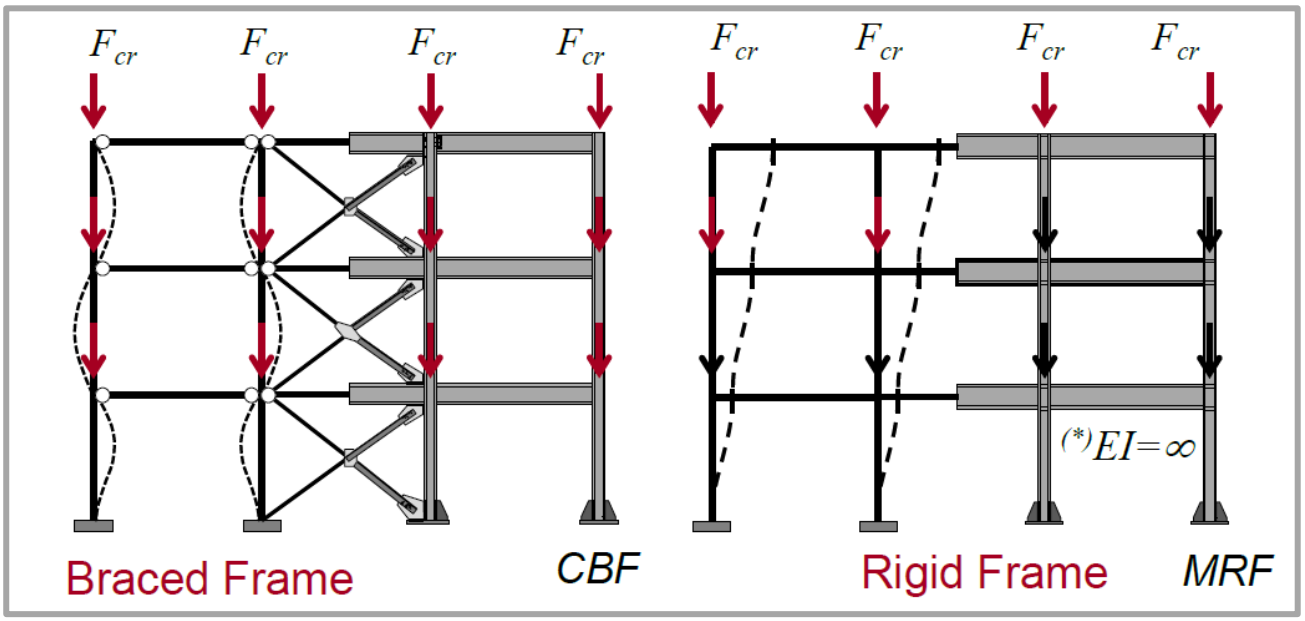


Fig.6 – Carico critico instabilizzante per strutture controventate e strutture intelaiate

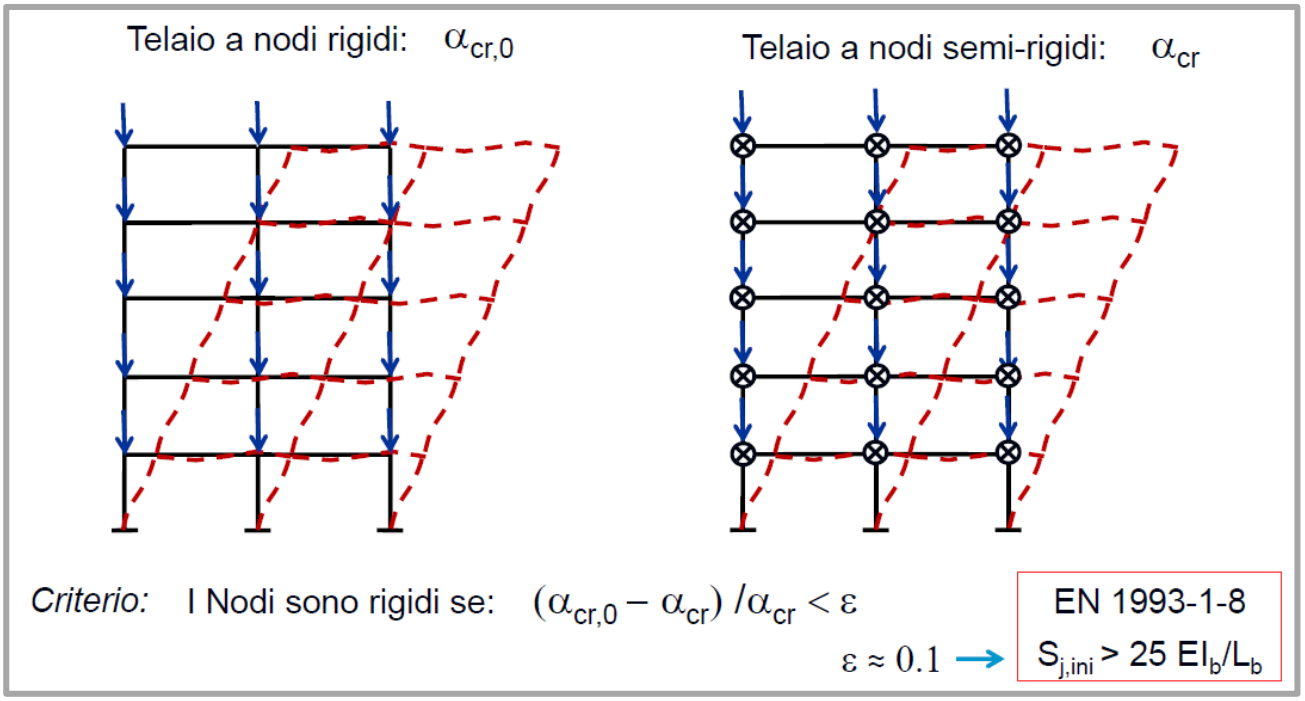
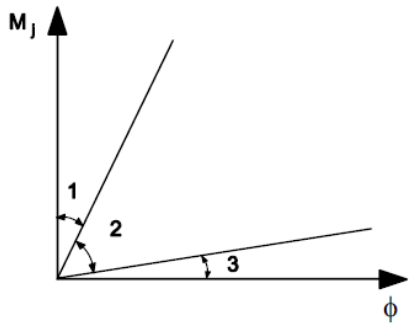


Fig.7 – Moltiplicatore critico per telai a nodi rigidi e telai a nodi semi-rigidi

Gli effetti del secondo ordine posso essere più o meno rilevanti a seconda della rigidezza dei collegamenti, la quale gioca quindi un ruolo fondamentale, al pari della resistenza, nella risposta dell'intera struttura. Al paragrafo 5.2.2.5 la EN-1993-1-8 stabilisce i limiti per la classificazione dei nodi diversi da quelli alla base delle colonne, facendo riferimento alla seguente figura.

Per il calcolo della rigidezza rotazionale $S_{j,ini}$ per nodi che connettono sezioni ad I e H, è necessario fare riferimento alla formula (6.27) presente al paragrafo 6.3 della EN-1993-1-8.

EN 1993-1-8 : 2005 (E)



Zone 1: rigid, if $S_{j,ini} \geq k_b EI_b / L_b$

where:

$k_b = 8$ for frames where the bracing system reduces the horizontal displacement by at least 80 %

$k_b = 25$ for other frames, provided that in every storey $K_b/K_c \geq 0{,}1$ *)

Zone 2: semi-rigid

All joints in zone 2 should be classified as semi-rigid. Joints in zones 1 or 3 may optionally also be treated as semi-rigid.

Zone 3: nominally pinned, if $S_{j,ini} \leq 0{,}5\, EI_b / L_b$

*) For frames where $K_b/K_c < 0{,}1$ the joints should be classified as semi-rigid.

Key:

K_b	is	the mean value of I_b/L_b for all the beams at the top of that storey;
K_c	is	the mean value of I_c/L_c for all the columns in that storey;
I_b	is	the second moment of area of a beam;
I_c	is	the second moment of area of a column;
L_b	is	the span of a beam (centre-to-centre of columns);
L_c	is	the storey height of a column.

Figure 5.4: Classification of joints by stiffness

Fig.8 – Classificazione dei nodi in base alla rigidezza (rotazionale)

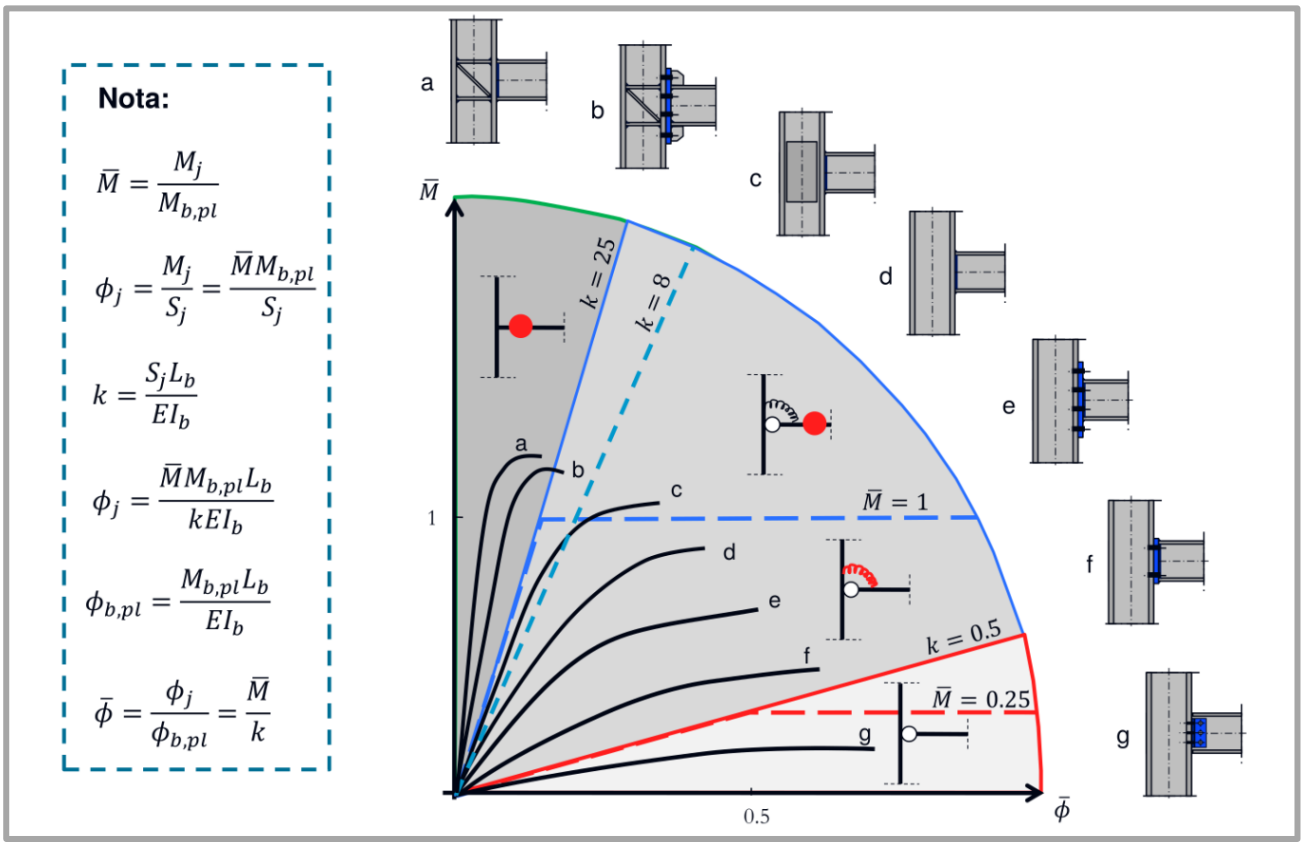


Fig.9 – Legame Momento-Rotazione per tipici esempi di nodi trave-colonna in acciaio

A seconda del tipo di collegamento trave-colonna, i nodi possono essere rappresentati dalle relazioni momento-rotazione visibili nel grafico precedente, dove:

M_j è il momento agente nel nodo
ϕ_j è la rotazione del nodo
S_j è la rigidezza rotazionale del nodo
L_b è la luce della campata calcolata fra gli interassi delle colonne
I_b è il momento d'inerzia della sezione della trave
$M_{b,pl}$ è il momento resistente plastico della trave

Per i casi in cui il momento trasmesso dal nodo risulti ridotto, il comportamento del collegamento trave-colonna è assimilabile a quello di tipo a cerniera. È importante notare che il momento trasmesso si mantiene piccolo solo se non avviene il contatto fra l'ala inferiore e la colonna e che si verifichi pertanto la seguente condizione:

$$\Phi_{\mathrm{req}} \leq \Phi_{\mathrm{av}}$$

dove:

$\Phi_{\mathrm{req}} = \frac{\mathrm{qL}^3}{24\mathrm{EI}}$ è la rotazione richiesta

$\Phi_{\mathrm{av}} = \frac{\mathrm{t}_p}{\mathrm{h}_e}$ è la rotazione consentita dalla geometria del collegamento

t_p è la distanza fra l'ala inferiore della trave e la colonna
h_e è la distanza fra il bordo inferiore della piastra frontale e il bordo inferiore dell'ala inferiore della trave

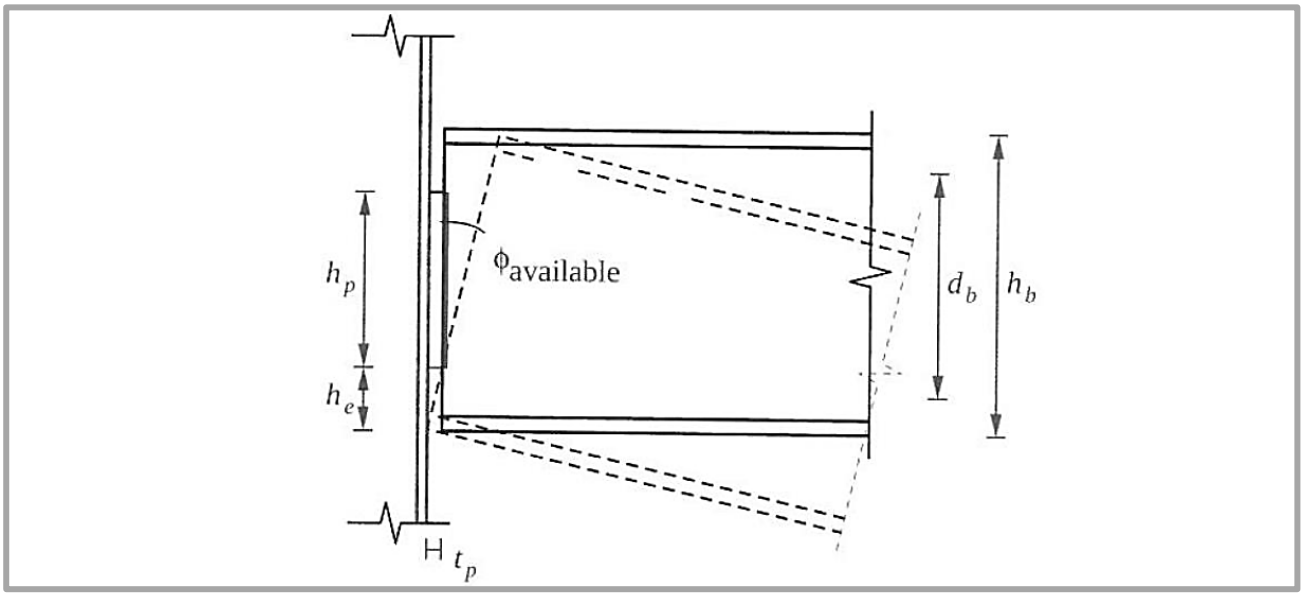


Fig.10 – Rotazione consentita dal collegamento trave-colonna

Il precedente criterio si basa sulle due seguenti assunzioni:

- colonna indeformata
- centro di rotazione all'estremità inferiore della piastra frontale.

RESISTENZA DEI COLLEGAMENTI BULLONATI NEI NODI TRAVE-COLONNA

Classificazione dei nodi in base alla resistenza

Per quanto riguarda la resistenza di un nodo trave-colonna, si può pensare alla seguente classificazione (vedere la figura successiva):

Nodo a **completo ripristino** di resistenza della trave	$M_{wp,b,Rj} > M_{b,R}$
Nodo a **completo ripristino** di resistenza della colonna	$M_{wp,c,Rj} > M_{c,R}$
Nodo a **completo ripristino**	Soddisfatte entrambe le condizioni precedenti

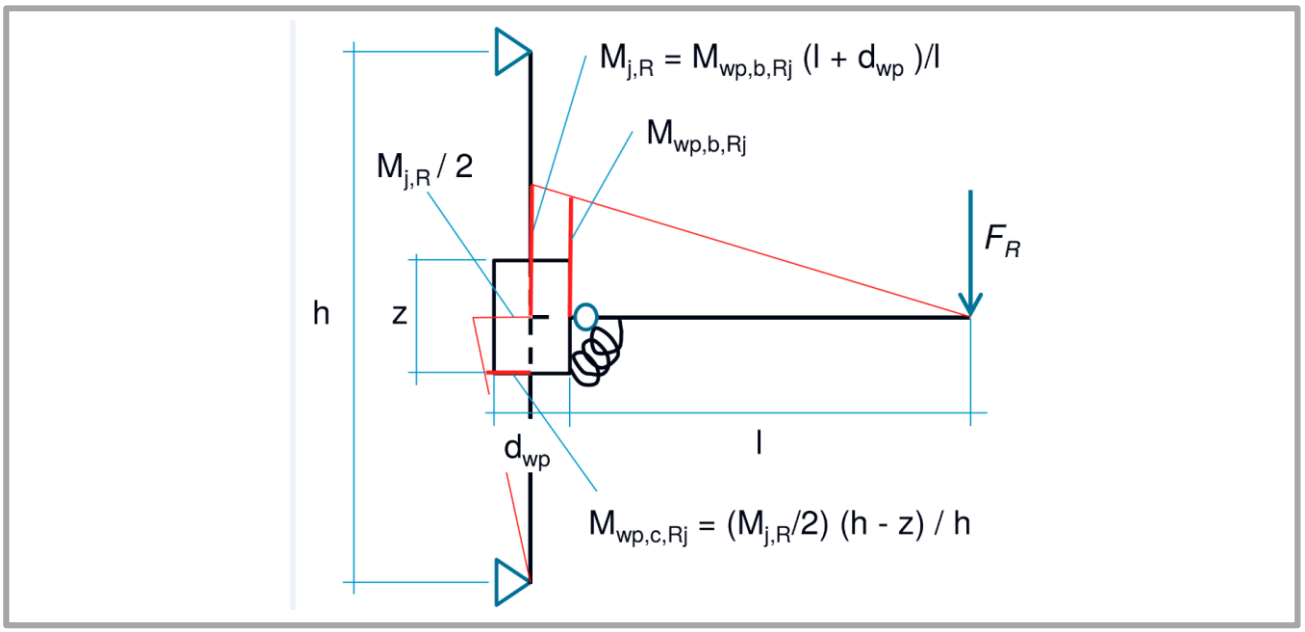


Fig.11 – Modellazione nodo trave-colonna in acciaio

dove:

$M_{j,R}$ = momento resistente del nodo
$M_{wp,b,Rj}$ = momento resistente del collegamento fra pannello d'anima e trave
$M_{wp,c,Rj}$ = momento resistente del collegamento fra pannello d'anima e colonna
$M_{b,R}$ = momento resistente trave
$M_{c,R}$ = momento resistente colonna

Il momento resistente del nodo $M_{j,R}$ può essere calcolato come segue, facendo riferimento alla figura seguente:

$$M_{j,R} = F_{t,R} z$$

dove:

$$F_{t,R} = \min(F_{cwt,R};\ F_{cfb,R};\ F_{bt,R};\ F_{epb,R};\ F_{bwt,R})$$

è la resistenza a trazione della componente più debole, posto inoltre che

$$F_{t,R} \leq \min(F_{cwc,R};\ F_{bfc,R}),$$

$$F_{t,R} \leq F_{cws,R}$$

Per la resistenza di ciascuna componente è stato assegnato un acronimo con riferimento alla simbologia dell'Eurocodice 3 (*EN 1993-1-8:2005 – 6.2.6 Design Resistance of basic components*) e alla sollecitazione alla quale è sottoposta la componente stessa:

cws = pannello d'anima della colonna soggetto a taglio (*column web in shear*)
cwt = pannello d'anima della colonna soggetto a trazione (*column web in tension*)
cwc = pannello d'anima della colonna soggetto a compressione (*column web panel in compression*)
cfb = ala della colonna soggetta a flessione (*column flange in bending*)
bt = bulloni soggetti a trazione (*bolt in tension*)
epb = piastra di estremità soggetta a flessione (*end plate in bending*)
bwt = anima della trave in trazione (*beam web in tension*)
bfc = ala della trave soggetta a compressione (*beam flange in compression*)

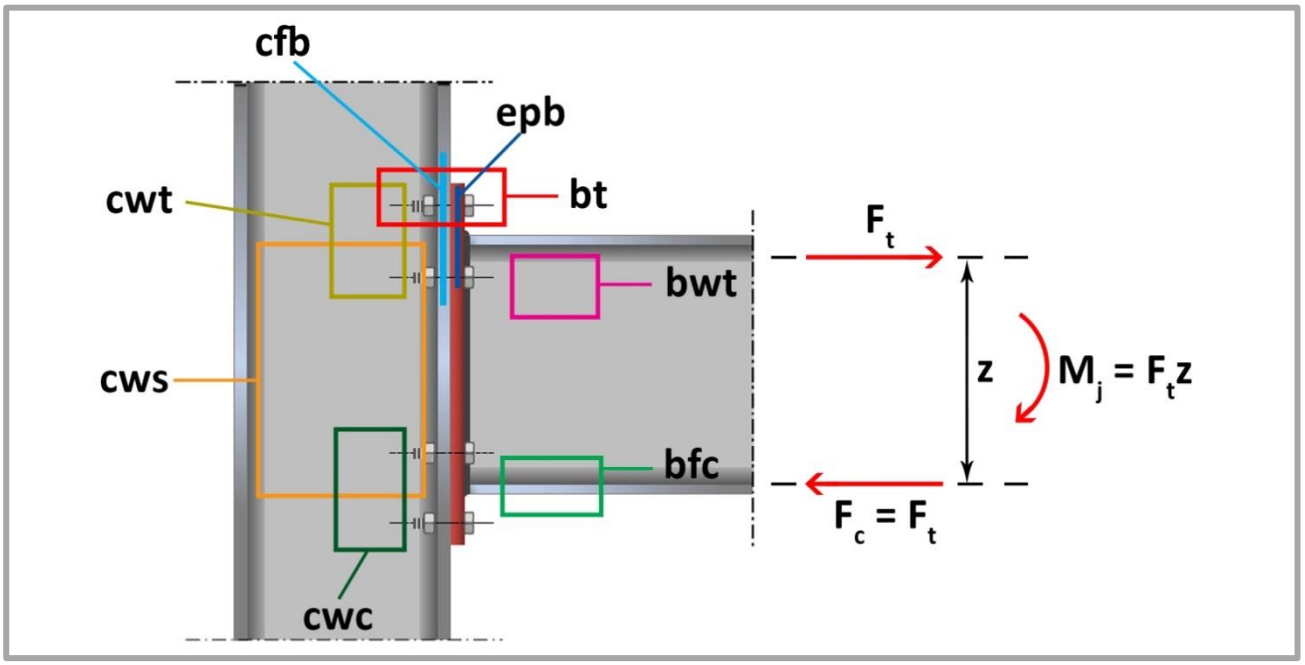


Fig.12 – Schema delle componenti di un nodo trave-colonna con collegamenti bullonati

Fig.13 – Esempi di nodi trave-colonna realizzati attraverso collegamenti bullonati

Modelli delle componenti dei collegamenti + T-stub

Per modellare il comportamento in termini di legame momento flettente-rotazione dei nodi trave-colonna considerati semi-rigidi si può ricorrere al metodo delle componenti attraverso l'introduzione di un cosiddetto "T-stub" equivalente. L'equivalenza è stabilita mediante la definizione di una lunghezza "efficace" o lunghezza "effettiva" l_{eff}.

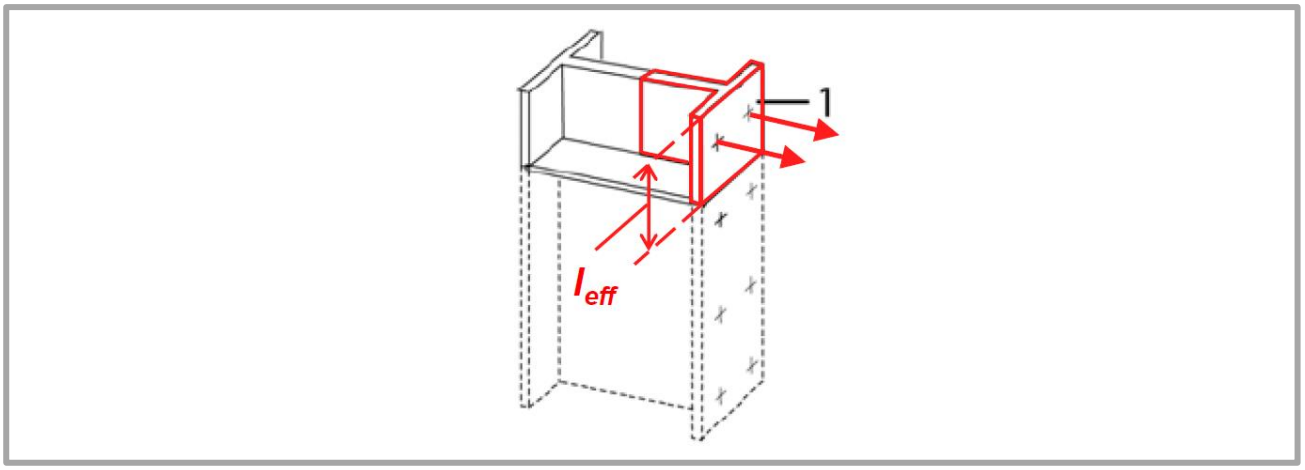


Fig.14 – Lunghezza effettiva (o efficace)

Per ogni riga di bulloni si definiscono due T-stub equivalenti:

1) per la riga considerata a se stante;
2) per la riga come parte di un gruppo, così come nella figura seguente.

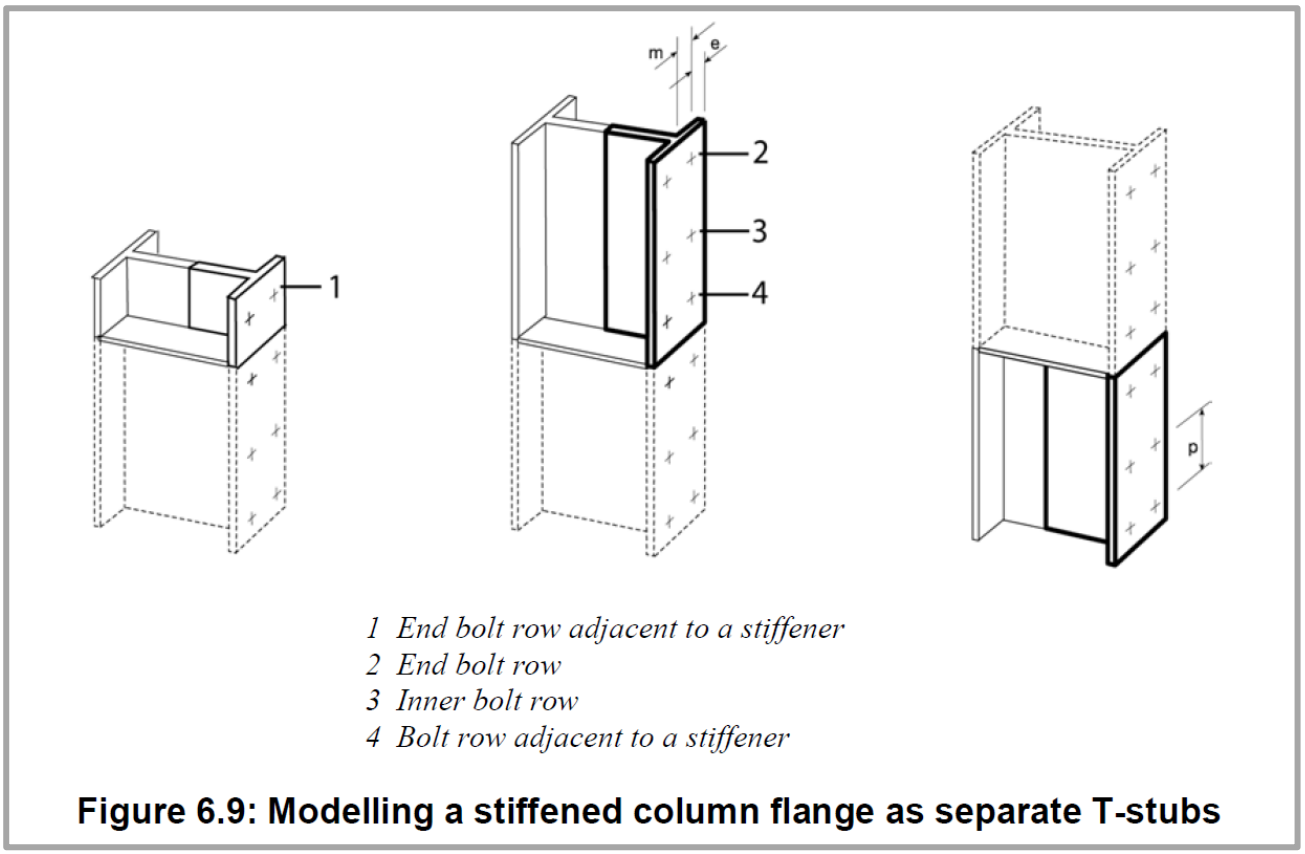


Fig.15 – Modellazione dell'ala di una colonna rinforzata come T-stub separati

Per ciascuna riga, la lunghezza del T-stub equivalente al piatto di estremità è diversa da quella del T-stub equivalente alla colonna.

Per la riga di bulloni oltre il filo della trave il T-stub è "verticale", perché l'ala della trave simula l'anima del T-stub; l_{eff} è perciò misurata in orizzontale. In tutti gli altri casi, il T-stub è "orizzontale".

EN 1993-1-8 : 2005 (E)

(5) The values of m and m_x for use in Table 6.6 should be obtained from Figure 6.10.

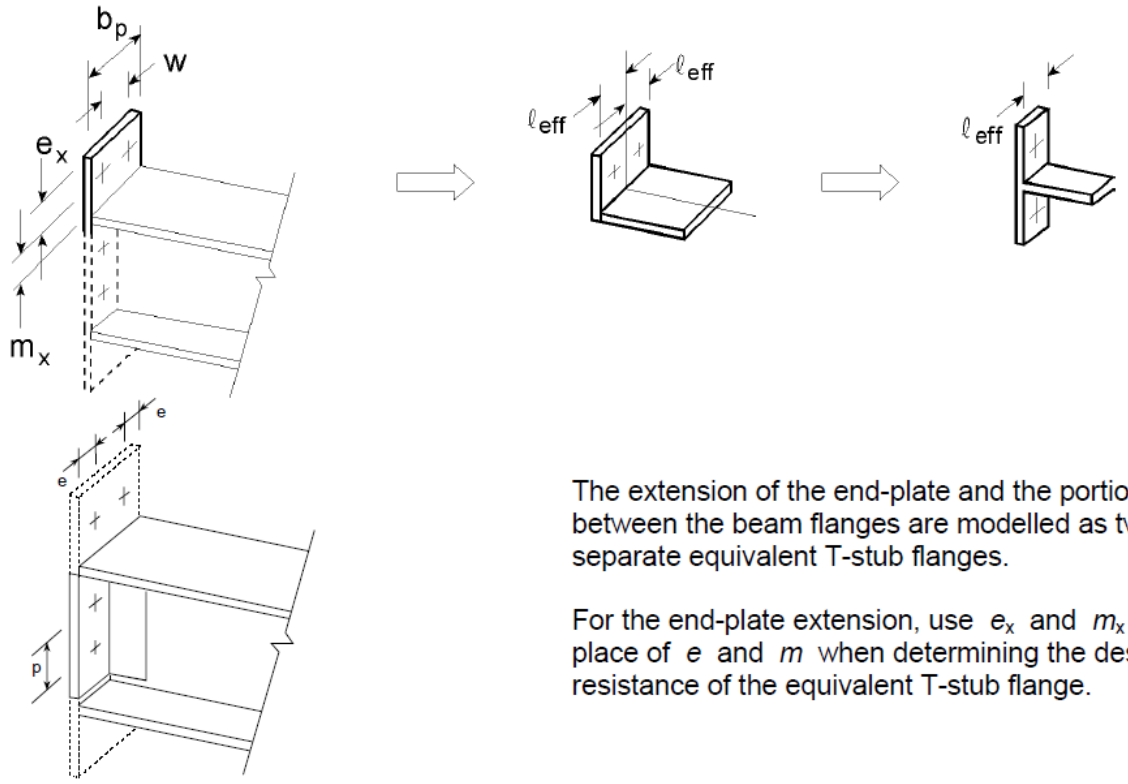


Figure 6.10: Modelling an extended end-plate as separate T-stubs

Fig.16 – Modellazione di un'estesa piastra di estremità come T-stub separati

Meccanismi (modi) di collasso di un «vero» T-stub

Le ali del T-Stub sono elementi «trave», che sviluppano una resistenza flessionale (momento plastico). I bulloni sono elementi che sviluppano una resistenza (principalmente) assiale. Con la teoria dell'analisi limite si può calcolare la resistenza del T-stub associata ai tre possibili meccanismi illustrati di seguito.

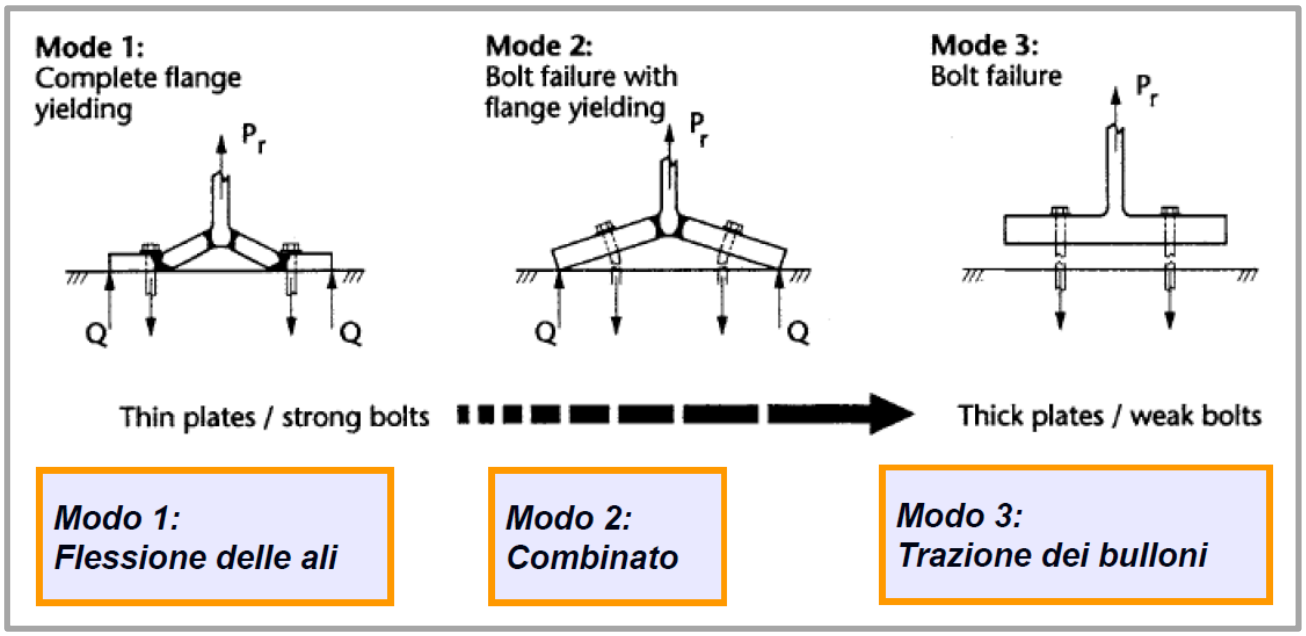


Fig.17 – Meccanismi di collasso di un T-stub

Meccanismi (modi) di collasso "veri"

Il T-stub equivalente deve avere lunghezza tale da riprodurre la «vera» resistenza. Quest'ultima, escluso il caso della rottura dei soli bulloni (modo 3), è la minima tra quelle associate a tutti i possibili meccanismi plastici bidimensionali (linee di plasticizzazione in una piastra).

La figura seguente mostra esempi di meccanismi bidimensionali: a) meccanismo «circolare»; b) meccanismo «non-circolare»; c) «effetto gruppo». Le lunghezze efficaci sono diverse per ciascun meccanismo. La lunghezza efficace finale sarà la minima tra quelle di tutti i meccanismi, in modo da minimizzare la resistenza.

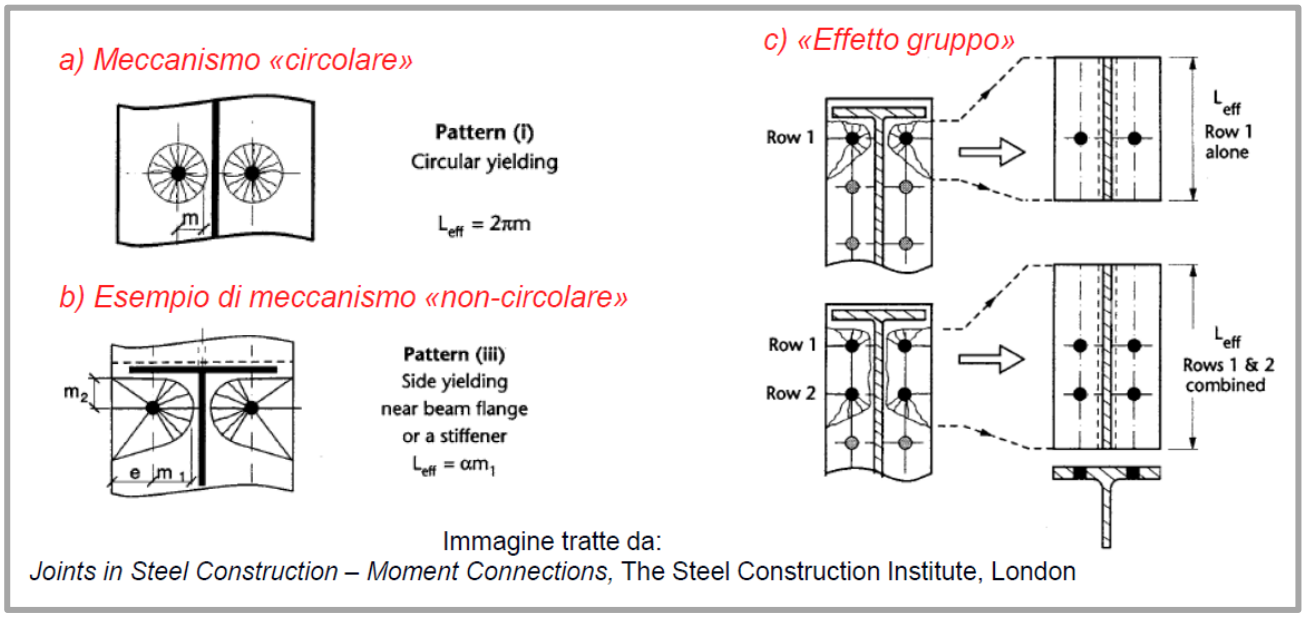


Fig.18 – Esempi di meccanismi di collasso bidimensionali di un T-stub

INTERAZIONE FRA LE SOLLECITAZIONI NELLE VERIFICHE DI RESISTENZA PER COLLEGAMENTI BULLONATI

Interazione M-V

Per quanto riguarda i collegamenti "**flangiati**", per la determinazione dell'interazione tra momento e taglio, si possono seguire due differenti strade.

a) Si distribuisce la forza di taglio fra tutti i bulloni del collegamento (*EN 1993-1-8:2005 - Table 3.4: Design resistance for individual fasteners subjected to shear and/or tension*):

$$F_{V,Ed} = \frac{V_{Ed}}{N_b}$$

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,Rd}} = 1$$

da cui:

$$F_{t,Rd,V} = 1.4F_{t,Rd}\left(1 - \frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}}\right)$$

dove:

V_{Ed} = taglio sollecitante
N_b = numero complessivo di bulloni
$F_{t,Rd}$ = resistenza a (sola) trazione del bullone
$F_{V,Rd}$ = resistenza a (solo) taglio del bullone
$F_{t,Rd,V}$ è la resistenza a trazione del bullone ridotta per effetto del taglio.

b) Si assegna la forza di taglio a un gruppo di bulloni selezionati «in zona compressa».

$$N_{b,V}F_{V,Rd} + (N_b - N_{b,V})\frac{0.4}{1.4}F_{V,Rd} \geq V_{Ed}$$

Dove:

$F_{V,Rd,t}$ è la resistenza a taglio ridotta per effetto della trazione (posto $F_{t,Ed} = F_{t,Rd}$)
$N_{b,V}$ è il numero di bulloni ai quali si assegna la forza di taglio; si scelgono in prossimità del centro di compressione.
Agli (N_b – $N_{b,V}$) bulloni si assegna il compito di resistere al momento flettente con una resistenza a trazione non ridotta per effetto del taglio.

Per i collegamenti con **angolari**, invece, la squadretta che collega la flangia compressa della trave si può supporre che trasferisca lo sforzo di taglio dalla trave alla colonna, assunto che:

- lo spazio *g* tra la fine della trave e la faccia della colonna non ecceda lo spessore t_a dell'angolare;
- la forza tagliante non ecceda la resistenza a taglio di progetto dei bulloni che collegano la squadretta alla colonna;
- l'anima della trave soddisfa i requisiti dati in EN 1993-1-5, sezione 6.

Interazione M-N

Per l'interazione tra momento e sforzo normale, se la forza assiale N_{Ed} della trave collegata eccede il 5% della resistenza di progetto $N_{pl,Rd}$, si può usare il seguente **metodo semplificato** (*EN 1993-1-8:2005 - 6.2.7 Design moment resistance of beam-to-column joints and splices*):

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} + \frac{N_{j,Ed}}{N_{j,Rd}} \leq 1{,}0$$

dove:

$M_{j,Rd}$ è la resistenza a momento di progetto del giunto, assumendo l'assenza di sforzo assiale;
$N_{j,Rd}$ è la resistenza assiale di progetto del giunto, assumendo l'assenza di momento applicato.

Inoltre, si ha:

$$M_{j,Rd,N} = M_{j,Rd}\left(1 - \frac{N_{j,Ed}}{N_{j,Rd}}\right);$$

$$N_{j,Rd} = \sum_r F_{tr,Rd};$$

$$F_{tr,Rd} = \min_i\{F_{ti,r,Rd}\};$$

dove:

$F_{ti,r,Rd}$ = resistenza a trazione della i-esima componente alla riga r.

Fondazione
Promozione Acciaio
CRESCE L'ACCIAIO, CRESCE IL PAESE.

ESEMPI SVOLTI DI CALCOLO E VERIFICA PER COLLEGAMENTI BULLONATI FLANGIATI E A SQUADRETTA

Il seguente quaderno approfondisce alcune verifiche in cui vi è interazione fra le sollecitazioni, mentre rimanda all'Eurocodice 3 parte 1-1 per le verifiche di resistenza dei singoli elementi collegati e alla parte 1-8 per le verifiche delle diverse componenti per collegamenti trave-colonna rigidi e semi-rigidi, le ultime delle quali sono:

- Verifica a taglio del pannello d'anima della colonna
- Verifica a compressione del pannello d'anima della colonna
- Verifica a trazione del pannello d'anima della colonna
- Verifica a flessione dell'ala della colonna
- Verifica a flessione della piastra di estremità (flangia)
- Verifica a flessione della squadretta
- Verifica a compressione dell'ala e dell'anima della trave
- Verifica a trazione dell'anima della trave
- Verifica a trazione e compressione della piastra (flangia)
- Verifica a trazione dei bulloni
- Verifica a taglio dei bulloni
- Verifica a rifollamento delle lamiere del collegamento
- Verifica di resistenza a "block tearing"
- Verifica delle saldature (se presenti)

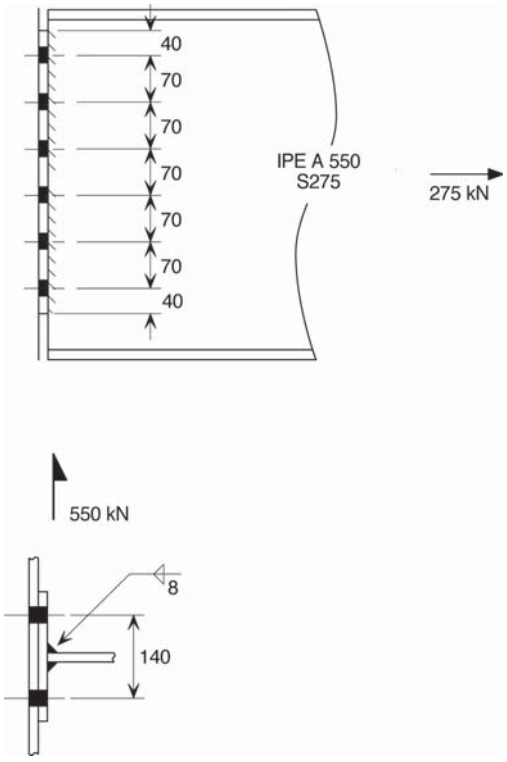
Per approfondire l'argomento si allegano due esempi di calcolo di collegamenti bullonati trave-colonna, dove vengono svolte le verifiche complete per giunti flangiati e per giunti a squadretta, tratti dal volume "Collegamenti in acciaio in edifici monopiano e multipiano - Eurocodice 3" pubblicato da *Fondazione Promozione Acciaio*. La monografia composta da due macrocapitoli, dedicati l'uno agli edifici monopiano, l'altro alle costruzioni multipiano, è il risultato della traduzione dall'originale di *Single-Storey Steel Buildings – Part 11: Moment Connections* e *Multi-Storey Steel Buildings – Part 5: Joint Design*, pubblicazioni facenti parti del progetto europeo *Facilitating the market development for sections in industrial halls and low rise buildings (SECHALO) RFS2-CT-2008-0030*.

NOTA: negli esempi svolti a seguire si fa riferimento all'ultima versione aggiornata dell'Eurocodice (vale a dire UNI EN 1993-1-8:2005) e si prescinde dai NAD italiani per il valore dei coefficienti, dal momento che questi ultimi sono stati pubblicati in un secondo momento.

Esempio svolto – Giunto flangiato

2. Giunto flangiato

Dati



Trave: IPE A 550 S275
Flangia: Piastra di estremità:: 430 × 200 × 12, S275
Bulloni: M20 8.8
Saldature: cordone di saldatura 8 mm (gola saldatura, a = 5,6 mm)

Sintesi dei dati per la verifica

Sollecitazioni di progetto

V_{Ed} = 550 kN
F_{Ed} = 275 kN (Tie force)

Resistenze a taglio di progetto

Taglio di progetto dell'anima della trave	614 kN
Flessione di progetto in corrispondenza dell'intaglio	N/A
Instabilità locale di trave intagliata	N/A
Resistenza di progetto del gruppo di bulloni	902 kN
Resistenza della piastra di estremità	1182 kN
Resistenza delle saldature	OK

Resistenza di giunzioni soggette a "tying"

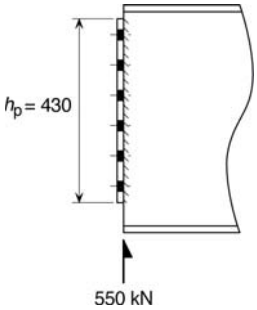
Resistenza di progetto a flessione della piastra di estremità	493 kN
Resistenza a trazione di progetto dell'anima della trave	1513 kN
Resistenza delle saldature	OK

2.1. Valori raccomandati

Piastra di estremità:	200 × 12 mm
Altezza piastra:	h_p = 430 mm > 0,6h_b OK
Bulloni:	M20, classe 8.8 e interasse 140 mm

2.2. Verifiche per giunzioni soggette a taglio verticale

2.2.1. Verifica a taglio dell'anima della trave



Salvo diversa indicazione, si fa sempre riferimento a EN 1993-1-8

Requisito di base: $V_{Ed} \leq V_{c,Rd}$

Resistenza a taglio dell'anima della trave $V_{c,Rd} = \dfrac{A_v f_{y,b} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}}$ — EN 1993-1-1 § 6.2.6(1)

Area dell'anima della trave soggetta a taglio

A_v = 430 × 9 = 3870 mm²

Resistenza a taglio dell'anima della trave

$$V_{pl,Rd} = \frac{3870 \times 275 / \sqrt{3}}{1,0} \times 10^{-3} = 614 \text{ kN}$$

V_{Ed} = 550 kN × 614 kN OK

2.2.2. Verifica a flessione in corrispondenza dell'intaglio

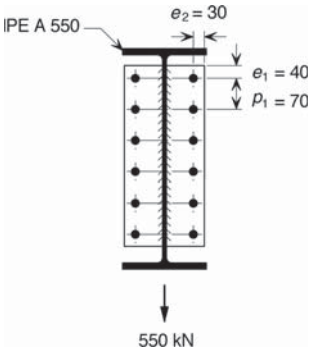
Non applicabile (assenza di intaglio).

2.2.3. Verifica di stabilità locale della trave intagliata

Non applicabile (assenza di intaglio).

2.2.4. Verifica del gruppo di bulloni

Requisito di base: $V_{Ed} \leq F_{Rd}$



Resistenza di progetto del gruppo di bulloni, F_{Rd}: § 3.7

se $\left(F_{b,Rd}\right)_{max} \le F_{v,Rd}$ allora $F_{Rd} = \sum F_{b,Rd}$

se $\left(F_{b,Rd}\right)_{min} \le F_{v,Rd} < \left(F_{b,Rd}\right)_{max}$ allora $F_{Rd} = n_s \left(F_{b,Rd}\right)_{min}$

se $F_{v,Rd} < \left(F_{b,Rd}\right)_{min}$ allora $F_{Rd} = 0{,}8 n_s F_{v,Rd}$

2.2.4.1. Resistenza a taglio dei bulloni

Resistenza a taglio di un singolo bullone, $F_{v,Rd} = \dfrac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ Prospetto 3.4

Per bulloni M20 classe 8.8, $F_{v,Rd} = \dfrac{0{,}6 \times 800 \times 245}{1{,}25} \times 10^{-3} = 94$ kN

2.2.4.2. Resistenza a rifollamento della piastra

Resistenza a rifollamento:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{u,p} d t_p}{\gamma_{M2}}$$ Prospetto 3.4

Per i bulloni ai margini:

$$k_1 = \min\left(2{,}8\frac{e_2}{d_0} - 1{,}7;\ 2{,}5\right) = \min\left(2{,}8 \times \frac{30}{22} - 1{,}7;\ 2{,}5\right) = \min\left(2{,}12;\ 2{,}5\right) = 2{,}12$$

Per i bulloni d'estremità:

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0};\ \frac{f_{ub}}{f_{u,p}};\ 1{,}0\right) = \min\left(\frac{40}{3 \times 22};\ \frac{800}{430};\ 1{,}0\right) = \min\left(0{,}61;\ 1{,}86;\ 1{,}0\right) = 0{,}61$$

Per i bulloni interni:

$$\alpha_b = \min\left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4};\ \frac{f_{ub}}{f_{u,p}};\ 1{,}0\right) = \min\left(\frac{70}{3 \times 22} - \frac{1}{4};\ \frac{800}{430};\ 1{,}0\right) = \min\left(0{,}81;\ 1{,}86;\ 1{,}0\right) = 0{,}81$$

Bulloni d'estremità:

$$F_{\text{b,Rd,end}} = \left(F_{\text{b,Rd}}\right)_{\min} = \frac{2{,}12 \times 0{,}61 \times 430 \times 20 \times 12}{1{,}25} \times 10^{-3} = 107 \text{ kN}$$

Bulloni interni:

$$F_{\text{b,Rd,inner}} = \left(F_{\text{b,Rd}}\right)_{\max} = \frac{2{,}12 \times 0{,}81 \times 430 \times 20 \times 12}{1{,}25} \times 10^{-3} = 142 \text{ kN}$$

94 kN < 107 kN per cui $F_{\text{v,Rd}} < (F_{\text{b,Rd}})_{\min}$

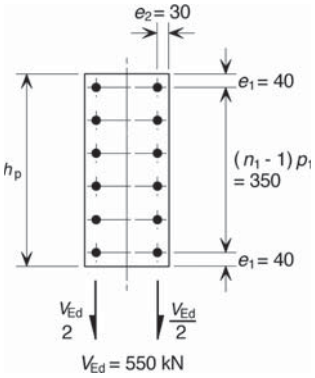
$$F_{\text{Rd}} = 0{,}8 n_{\text{s}} \left(F_{\text{v,Rd}}\right)_{\min} = 0{,}8 \times 12 \times 94 = 902 \text{ kN}$$

V_{Ed} = 550 kN ≤ 902 kN OK

2.2.5. Verifica a taglio della piastra di estremità

Requisito di base: $V_{\text{Ed}} \leq V_{\text{Rd,min}}$

$V_{\text{Rd,min}} = (V_{\text{Rd,g}}; V_{\text{Rd,n}}; V_{\text{Rd,b}})$



2.2.5.1. Resistenza a taglio della sezione lorda

$$V_{\text{Rd,g}} = \frac{2 h_{\text{p}} t_{\text{p}}}{1{,}27} \frac{f_{\text{y,p}}}{\sqrt{3}\gamma_{\text{M0}}} = \frac{2 \times 430 \times 12 \times 275}{1{,}27 \times \sqrt{3} \times 1{,}0} \times 10^{-3} = 1290 \text{ kN}$$ Fonte [VIII]

2.2.5.2. Resistenza a taglio della sezione efficace

$$V_{\text{Rd,n}} = 2 \times A_{\text{v,net}} \frac{f_{\text{u,p}}}{\sqrt{3}\gamma_{\text{M2}}}$$ Fonte [VIII]

Area efficace, $A_{\text{v,net}}$ = 12(430 – 6 × 22) = 3576 mm^2

$$V_{\text{Rd,n}} = 2 \times 3576 \times \frac{430}{\sqrt{3} \times 1{,}25} \times 10^{-3} = 1420 \text{ kN}$$

2.2.5.3. Resistenza a "block tearing"

$h_p = 430$ e $1{,}36p_3 = 1{,}36 \times 140 = 190$ mm Fonte [VIII]

Dato che $h_p > 1{,}36p_3$ allora

$$V_{Rd,b} = V_{Rd,b} = 2\times\left(\frac{f_{u,p}A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_{y,p}A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}}\right)$$

Area efficace soggetta a trazione:

$$A_{nt} = t_p\left(e_2 - 0{,}5d_0\right) = 12\left(30 - 0{,}5\times 22\right) = 228 \text{ mm}^2$$

Area efficace soggetta a taglio:

$$A_{nv} = t_p\left(h_p - e_1 - \left(n_1 - 0{,}5\right)d_0\right) = 12\left(430 - 40 - \left(6 - 0{,}5\right)22\right) = 3228 \text{ mm}^2$$

$$V_{Rd,b} = 2\times\left(\frac{430\times 228}{1{,}25} + \frac{275\times 3228}{\sqrt{3}\times 1{,}0}\right)\times 10^{-3} = 1182 \text{ kN}$$

$V_{Rd,min} = \min(1290; 1420; 1182) = 1182$ kN

$V_{Ed} = 550 \text{ kN} \leq 1182 \text{ kN}$ OK

2.2.6. Verifica delle saldature

Per trave in acciaio S275 Fonte [VIII]

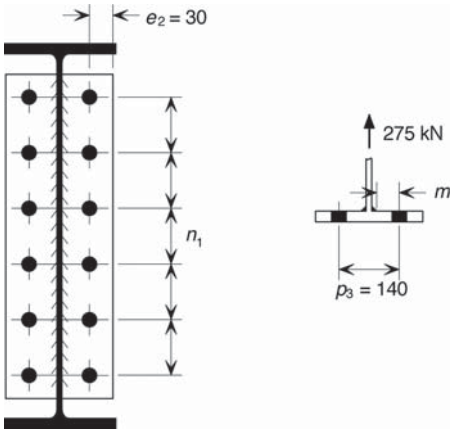
Requisito di base: $a \geq 0{,}48\, t_w$

$0{,}48t_p = 0{,}48 \times 9 = 4{,}32$ mm

$a = 5{,}7 \text{ mm} \geq 0{,}48\, t_w$ OK

2.3. Verifiche giunzioni soggette a "tying"(trazione assiale)

2.3.1. Verifica a flessione della piastra di estremità



Requisito di base: $F_{Ed} \leq \min\left(F_{Rd,u,1}, F_{Rd,u,2}, F_{Rd,u,3}\right)$

Meccanismo 1:

$$F_{\mathrm{Rd,u,1}} = \frac{\left(8n - 2e_{\mathrm{w}}\right) M_{\mathrm{pl,1,Rd,u}}}{2mn - e_{\mathrm{w}}\left(m+n\right)}$$ Prospetto 6.2

$$\sum l_{\mathrm{eff}} = 2e_{1\mathrm{A}} + \left(n_1 - 1\right) p_{1\mathrm{A}}$$

$$e_{1\mathrm{A}} = e_1 \text{ e } \leq 0{,}5\left(p_3 - t_{\mathrm{w}} - 2a\sqrt{2}\right) + \frac{d_0}{2}$$

$$0{,}5\left(140 - 9 - 2\times 5{,}6\sqrt{2}\right) + \frac{22}{2} = 69 \text{ mm}$$

$$\therefore\ e_{1\mathrm{A}} = 40$$

$$p_{1\mathrm{A}} = p_1 \text{ e } \leq p_3 - t_{\mathrm{w}} - 2a\sqrt{2} + d_0$$

$$p_3 - t_{\mathrm{w}} - 2a\sqrt{2} + d_0 = 140 - 9 - 2\times 5{,}6\sqrt{2} + 22 = 137 \text{ mm}$$

$$\therefore\ p_{1\mathrm{A}} = 70$$

$$\sum l_{\mathrm{eff}} = 2e_{1\mathrm{A}} + \left(n_1 - 1\right) p_{1\mathrm{A}} = 2\times 40 + \left(6-1\right)70 = 430 \text{ mm}$$

$$M_{\mathrm{pl,1,Rd,u}} = \frac{0{,}25\sum l_{\mathrm{eff,1}} t_{\mathrm{p}}^2 f_{\mathrm{u,p}}}{\gamma_{\mathrm{Mu}}} = \frac{0{,}25\times 430\times 12^2\times 430}{1{,}1}\times 10^{-6} = 6{,}05 \text{ kNm}$$

$$m = \frac{p_3 - t_{\mathrm{w}} - 2\times 0{,}8\times a\sqrt{2}}{2} = \frac{140 - 9 - 2\times 0{,}8\times 5{,}6\times\sqrt{2}}{2} = 59 \text{ mm}$$

$$e_{\mathrm{w}} = \frac{d_{\mathrm{w}}}{4} = \frac{37}{4} = 9{,}25 \text{ mm}$$

$$n = \min\left(e_2;\ 1{,}25m\right) = \min\left(30;\ 76\right) = 30 \text{ mm}$$

$$F_{\mathrm{Rd,u,1}} = \frac{\left(8\times 30 - 2\times 9{,}25\right)6{,}05\times 10^3}{2\times 59\times 30 - 9{,}25\left(59+30\right)} = 493 \text{ kN}$$

Meccanismo 2:

$$F_{\mathrm{Rd,u,2}} = \frac{2M_{\mathrm{pl,2,Rd,u}} + n\sum F_{\mathrm{t,Rd,u}}}{m+n}$$ Prospetto 6.2

$$M_{\mathrm{pl,2,Rd,u}} = M_{\mathrm{pl,1,Rd,u}} = 6{,}05 \text{ kNm}$$

$$F_{\mathrm{t,Rd,u}} = \frac{k_2 f_{\mathrm{ub}} A}{\gamma_{\mathrm{Mu}}} = \frac{0{,}9\times 800\times 245}{1{,}1}\times 10^{-3} = 160 \text{ kN}$$

$$F_{\mathrm{Rd,u,2}} = \frac{2\times 6{,}05\times 10^3 + 30\times 12\times 160}{59+30} = 793 \text{ kN}$$

Meccanismo 3:

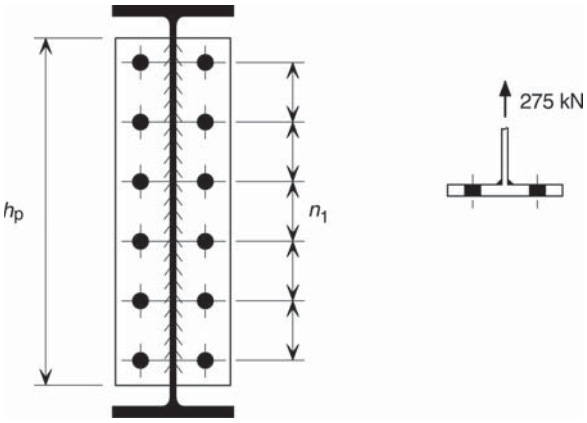
$$F_{\mathrm{Rd,u,3}} = \sum F_{\mathrm{t,Rd,u}} = 12 \times 160 = 1920 \text{ kN}$$ Prospetto 6.2

$$\min\left(F_{\mathrm{Rd,u,1}}, F_{\mathrm{Rd,u,2}}, F_{\mathrm{Rd,u,3}}\right) = \min\left(493;\ 793;\ 1920\right) = 493 \text{ kN}$$

$F_{\mathrm{Ed}} = 275 \text{ kN} \leq 493 \text{ kN}$ OK

2.3.2. Verifica dell'anima della trave

Requisito di base: $F_{\mathrm{Ed}} \leq F_{\mathrm{Rd}}$



$$F_{\mathrm{Rd}} = \frac{t_{\mathrm{w}} h_{\mathrm{p}} f_{\mathrm{u,b}}}{\gamma_{\mathrm{Mu}}} = \frac{9 \times 430 \times 430}{1{,}1} \times 10^{-3} = 1513 \text{ kN}$$ Fonte [VIII]

$F_{\mathrm{Ed}} = 275 \text{ kN} \leq 1513 \text{ kN}$ OK

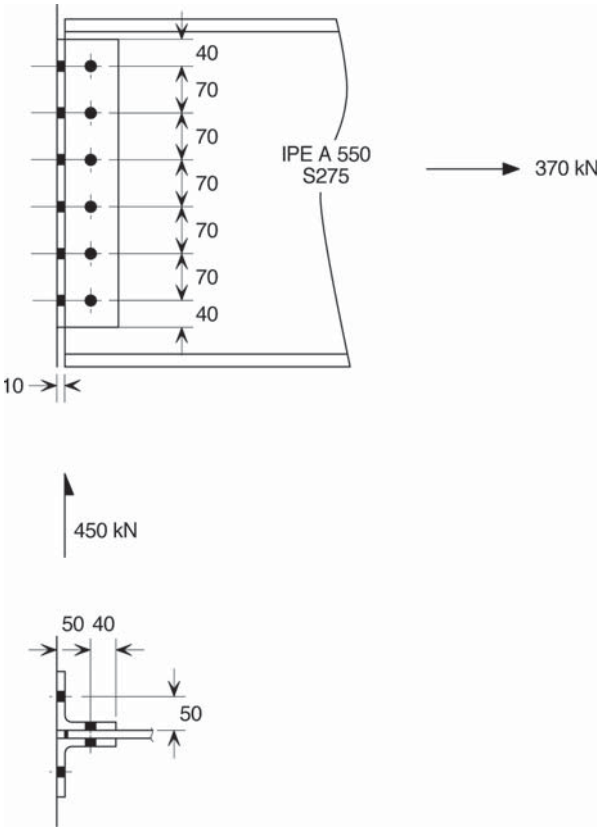
2.3.3. Resistenza delle saldature

La dimensione della saldatura indicata in caso di taglio presenta anche una adeguata resistenza a tying, poiché è ad alta resistenza (full strength weld).

Esempio svolto – Giunto mediante squadrette (angolari d'anima bullonati)

4. Giunti mediante squadrette (angolari d'anima bullonati)

Dati



Trave: IPE A 550 S275
Squadrette: 2/90 × 90 × 10, S275
Bulloni: M20 8.8

Sintesi dei dati per la verifica

Sollecitazioni di progetto
V_{Ed} = 450 kN
F_{Ed} = 370 kN (Tie force)

Resistenze a taglio di progetto
Resistenza di progetto del gruppo di bulloni
Lato della trave portata
Resistenza a taglio dei bulloni 962 kN

Resistenza a rifollamento delle squadrette angolari	1075 kN
Resistenza a rifollamento dell'anima della trave	583 kN
Lato trave portante	
Resistenza	902 kN
Taglio di progetto delle squadrette angolari	
Lato trave portata	
Resistenza a taglio di progetto	954 kN
Lato trave portante	
Resistenza a taglio di progetto	954 kN
Taglio di progetto dell'anima della trave	
Resistenza a taglio e "block tearing"	
Resistenza a taglio di progetto	501 kN
Interazione taglio/momento flettente su seconda fila bulloni	N/A
Flessione di progetto in corrispondenza dell'intaglio	N/A
Intabilità locale della trave intagliata	N/A

Resistenze di giunzioni soggette a "tying"

Resistenza di progetto delle squadrette angolari e del gruppo di bulloni	
Resistenza a flessione di progetto delle squadrette angolari	696 kN
Resistenza a taglio dei bulloni	1284 kN
Resistenza a rifollamento delle squadrette angolari	1428 kN
Resistenza a "block tearing"	2060 kN
Resistenza di progetto dell'anima della trave	
Resistenza a rifollamento dell'anima della trave	642 kN
Resistenza a trazione dell'anima della trave	944 kN
Resistenza a "block tearing"	927 kN

4.1. Valori raccomandati

Spessore squadrette 10 mm

Altezza, $h_{ac} = 430$ mm $> 0{,}6h_b$, OK

Salvo diversa indicazione, si fa riferimento sempre a EN 1993-1-8

4.2. Verifiche per giunzioni soggette a taglio verticale

4.2.1. Verifica del gruppo di bulloni

4.2.1.1. Lato trave portata

RESISTENZA A TAGLIO DEI BULLONI

Requisito di base: $V_{Ed} \leq V_{Rd}$

$$V_{Rd} = 2 \times \frac{n_b F_{v,Rd}}{\sqrt{\left(1+\alpha n_b\right)^2 + \left(\beta n_b\right.}}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{\mathrm{v,Rd}} = \frac{\alpha_{\mathrm{v}} f_{\mathrm{ub}} A}{\gamma_{\mathrm{M2}}}$$

Per bulloni M20 classe 8.8, $F_{\mathrm{v,Rd}} = \dfrac{0,6 \times 800 \times 245}{1,25} \times 10^{-3} = 94 \text{ kN}$

Per singola fila di bulloni (i.e. $n_2 = 1$ e $n_1 = 6$), $\alpha = 0$

$$\beta = \frac{6z}{n_1 (n_1 + 1) p_1} = \frac{6 \times 50}{6(6+1)70} = 0,102$$

Per cui $V_{\mathrm{Rd}} = 2 \times \dfrac{6 \times 94}{\sqrt{(1 + 0 \times 6)^2 + (0,102 \times 6)^2}} = 962 \text{ kN}$

$V_{\mathrm{Ed}} = 450 \text{ kN} \leq 962 \text{ kN}$ OK

RESISTENZA A RIFOLLAMENTO DELLE SQUADRETTE ANGOLARI

Requisito di base: $V_{\mathrm{Ed}} \leq V_{\mathrm{b,Rd}}$

$$V_{\mathrm{b,Rd}} = 2 \times \frac{n_{\mathrm{b}}}{\sqrt{\left(\dfrac{1 + \alpha n_{\mathrm{b}}}{F_{\mathrm{b,ver,Rd}}}\right)^2 + \left(\dfrac{\beta n_{\mathrm{b}}}{F_{\mathrm{b,hor,Rd}}}\right)^2}}$$

$\alpha = 0$ e $\beta = 0,102$, come sopra.

La resistenza verticale a rifollamento per un singolo bullone è pari a:

$$F_{\mathrm{b,ver,Rd}} = \frac{k_1 \alpha_{\mathrm{b}} f_{\mathrm{u,ac}} d t_{\mathrm{ac}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}}$$

$$k_1 = \min\left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7;\ 2,5\right) = \min\left(2,8 \frac{40}{22} - 1,7;\ 2,5\right) =$$

$$= \min(3,39;\ 2,5) = 2,5$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0};\ \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4};\ \frac{f_{\mathrm{ub}}}{f_{\mathrm{u,ac}}};\ 1,0\right) = \min\left(\frac{40}{3 \times 22};\ \frac{70}{3 \times 22} - 0,25;\ \frac{800}{430};\ 1,0\right) =$$

$$= \min(0,61;\ 0,81;\ 1,86;\ 1,0)$$

$$\alpha_{\mathrm{b}} = 0,61$$

$$F_{\mathrm{b,ver,Rd}} = \frac{2,5 \times 0,61 \times 430 \times 20 \times 10}{1,25} \times 10^{-3} = 105 \text{ kN}$$

La resistenza orizzontale a rifollamento per un singolo bullone è pari a:

$$F_{\mathrm{b,hor,Rd}} = \frac{k_1 \alpha_{\mathrm{b}} f_{\mathrm{u,ac}} d t_{\mathrm{ac}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}}$$

$$k_1 = \min\left(2{,}8\frac{e_1}{d_0} - 1{,}7;\ 1{,}4\frac{p_1}{d_0} - 1{,}7;\ 2{,}5\right) = \min\left(2{,}8\frac{40}{22} - 1{,}7;\ 1{,}4\frac{70}{22} - 1{,}7;\ 2{,}5\right) =$$
$$= \min\left(3{,}39;\ 2{,}75;\ 2{,}5\right) = 2{,}5$$

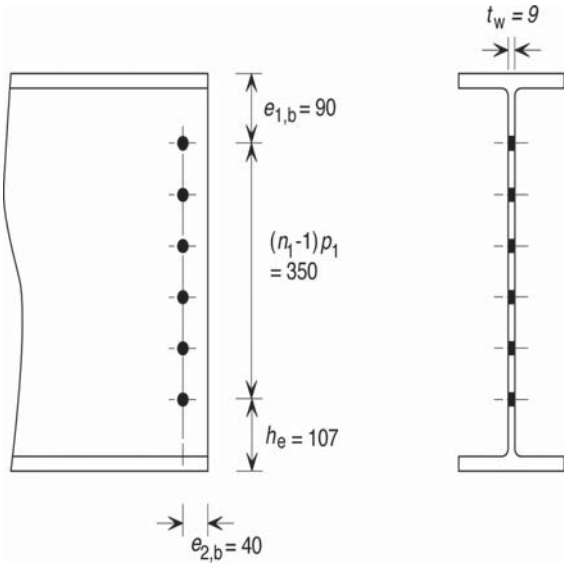
$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_2}{3d_0};\ \frac{f_{\mathrm{ub}}}{f_{\mathrm{u,ac}}};\ 1{,}0\right) = \min\left(\frac{40}{3\times 22};\ \frac{800}{430};\ 1{,}0\right) =$$
$$= \min\left(0{,}61;\ 1{,}86;\ 1{,}0\right) = 0{,}61$$

$$F_{\mathrm{b,hor,Rd}} = \frac{2{,}5\times 0{,}61\times 430\times 20\times 10}{1{,}25}\times 10^{-3} = 105\ \mathrm{kN}$$

$$V_{\mathrm{Rd}} = 2\times\frac{6}{\sqrt{\left(\frac{1+0\times 6}{105}\right)^2 + \left(\frac{0{,}102\times 6}{105}\right)^2}} = 1075\ \mathrm{kN}$$

$V_{\mathrm{Ed}} = 450\ \mathrm{kN} \leq 1075\ \mathrm{kN}$ OK

Resistenza a rifollamento dell'anima della trave



Requisito di base: $V_{\mathrm{Ed}} \leq V_{\mathrm{Rd}}$

$$V_{\mathrm{Rd}} = \frac{n_{\mathrm{b}}}{\sqrt{\left(\frac{1+\alpha n_{\mathrm{b}}}{F_{\mathrm{b,ver,Rd}}}\right)^2 + \left(\frac{\beta n_{\mathrm{b}}}{F_{\mathrm{b,hor,Rd}}}\right)^2}}$$

α= 0 e β = 0,102, come sopra.

La resistenza verticale a rifollamento per un singolo bullone è pari a:

$$F_{\mathrm{b,ver,Rd}} = \frac{k_1 \alpha_{\mathrm{b}} f_{\mathrm{u,b}} d t_{\mathrm{w}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}}$$

$$k_1 = \min\left(2{,}8\frac{e_{2,\mathrm{b}}}{d_0} - 1{,}7;\ 2{,}5\right) = \min\left(2{,}8\frac{40}{22} - 1{,}7;\ 2{,}5\right) =$$
$$= \min\left(3{,}4;\ 2{,}5\right) = 2{,}5$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_{1,\mathrm{b}}}{3d_0};\ \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4};\ \frac{f_{\mathrm{ub}}}{f_{\mathrm{u,b}}};\ 1{,}0\right) = \min\left(\frac{90}{3\times 22};\ \frac{70}{3\times 22} - \frac{1}{4};\ \frac{800}{430};\ 1{,}0\right) =$$
$$= \min\left(1{,}36;\ 0{,}81;\ 1{,}86;\ 1{,}0\right) = 0{,}81$$

$$F_{\mathrm{b,ver,Rd}} = \frac{2{,}5\times 0{,}81\times 430\times 20\times 9}{1{,}25}\times 10^{-3} = 125\ \mathrm{kN}$$

La resistenza orizzontale a rifollamento per un singolo bullone è pari a:

$$F_{\mathrm{b,hor,Rd}} = \frac{k_1 \alpha_{\mathrm{b}} f_{\mathrm{u,b}} d t_{\mathrm{w}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}}$$

$$k_1 = \min\left(2{,}8\frac{e_{1,\mathrm{b}}}{d_0} - 1{,}7;\ 1{,}4\frac{p_1}{d_0} - 1{,}7;\ 2{,}5\right) = \min\left(2{,}8\frac{90}{22} - 1{,}7;\ 1{,}4\frac{70}{22} - 1{,}7;\ 2{,}5\right) =$$
$$= \min\left(9{,}75;\ 2{,}75;\ 2{,}5\right) = 2{,}5$$

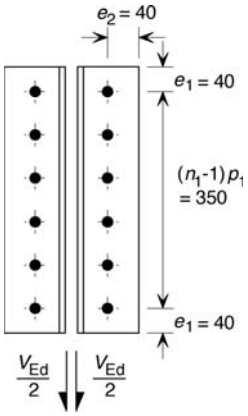
$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_{2,\mathrm{b}}}{3d_0};\ \frac{f_{\mathrm{ub}}}{f_{\mathrm{u,b}}};\ 1{,}0\right) = \min\left(\frac{40}{3\times 22};\ \frac{800}{430};\ 1{,}0\right) =$$
$$= \min\left(0{,}61;\ 1{,}86;\ 1{,}0\right) = 0{,}61$$

$$F_{\mathrm{b,hor,Rd}} = \frac{2{,}5\times 0{,}61\times 430\times 20\times 9}{1{,}25}\times 10^{-3} = 94\ \mathrm{kN}$$

$$V_{Rd} = \frac{6}{\sqrt{\left(\frac{1+0\times 6}{125}\right)^2 + \left(\frac{0{,}102\times 6}{94}\right)^2}} = 583 \text{ kN}$$

$V_{Ed} = 450 \text{ kN} \leq 583 \text{ kN}$ OK

4.2.1.2. Lato trave portante



Requisito di base: $V_{Ed} \leq F_{Rd}$
Resistenza di progetto del gruppo di bulloni, F_{Rd}:

Se $\left(F_{b,Rd}\right)_{max} \leq F_{v,Rd}$ allora $F_{Rd} = \sum F_{b,Rd}$

Se $\left(F_{b,Rd}\right)_{min} \leq F_{v,Rd} < \left(F_{b,Rd}\right)_{max}$ allora $F_{Rd} = n_s \left(F_{b,Rd}\right)_{min}$

Se $F_{v,Rd} < \left(F_{b,Rd}\right)_{min}$ allora $F_{Rd} = 0{,}8 n_s F_{v,Rd}$

RESISTENZA A TAGLIO DEI BULLONI

Resistenza a taglio di un singolo bullone, $F_{v,Rd} = \dfrac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$

Per bulloni M20 classe 8.8, $F_{v,Rd} = \dfrac{0{,}6\times 800\times 245}{1{,}25}\times 10^{-3} = 94 \text{ kN}$

RESISTENZA A RIFOLLAMENTO DELLE SQUADRETTE ANGOLARI

$$V_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{u,ac} d t_{ac}}{\gamma_{M2}}$$

Per i bulloni ai margini,

$$k_1 = \min\left(2{,}8\frac{e_2}{d_0} - 1{,}7;\ 2{,}5\right) = \min\left(2{,}8 \times \frac{40}{22} - 1{,}7;\ 2{,}5\right) =$$
$$= \min\left(3{,}39;\ 2{,}5\right) = 2{,}5$$

Per i bulloni d'estremità,

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0};\ \frac{f_{\mathrm{ub}}}{f_{\mathrm{u,ac}}};\ 1{,}0\right) = \min\left(\frac{40}{3 \times 22};\ \frac{800}{430};\ 1{,}0\right) =$$
$$= \min\left(0{,}61;\ 1{,}86;\ 1{,}0\right) = 0{,}61$$

Per i bulloni interni,

$$\alpha_b = \min\left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4};\ \frac{f_{\mathrm{ub}}}{f_{\mathrm{u,ac}}};\ 1{,}0\right) = \min\left(\frac{70}{3 \times 22} - \frac{1}{4};\ \frac{800}{430};\ 1{,}0\right) =$$
$$= \min\left(0{,}81;\ 1{,}86;\ 1{,}0\right) = 0{,}81$$

Bulloni d'estremità,

$$F_{\mathrm{b,Rd,end}} = \left(F_{\mathrm{b,Rd}}\right)_{\min} == \frac{2{,}5 \times 0{,}61 \times 430 \times 20 \times 10}{1{,}25} \times 10^{-3} =$$
$$= 105\ \mathrm{kN}$$

Bulloni interni,

$$F_{\mathrm{b,Rd,inner}} = \left(F_{\mathrm{b,Rd}}\right)_{\max} = \frac{2{,}5 \times 0{,}81 \times 430 \times 20 \times 10}{1{,}25} \times 10^{-3} =$$
$$= 139\ \mathrm{kN}$$

94 kN < 105 kN per cui $F_{\mathrm{v,Rd}} < (F_{\mathrm{b,Rd}})_{\min}$

$$F_{\mathrm{Rd}} = 0{,}8 n_{\mathrm{s}} F_{\mathrm{v,Rd}} = 0{,}8 \times 12 \times 94 = 902\ \mathrm{kN}$$

$V_{\mathrm{Ed}} = 550\ \mathrm{kN} \leq 902\ \mathrm{kN}$ OK

4.2.2. Verifica a taglio delle squadrette angolari
4.2.2.1. Lato trave portata

Requisito di base: $V_{\mathrm{Ed}} \leq V_{\mathrm{Rd,min}}$

$V_{\mathrm{Rd,min}} = \min(V_{\mathrm{Rd,g}};\ V_{\mathrm{Rd,n}};\ V_{\mathrm{Rd,b}})$

RESISTENZA A TAGLIO DELLA SEZIONE LORDA

$$V_{\mathrm{Rd,g}} = 2\times\frac{h_{\mathrm{ac}}t_{\mathrm{ac}}}{1,27}\frac{f_{\mathrm{y,ac}}}{\sqrt{3}\gamma_{\mathrm{M0}}} = 2\times\frac{430\times10\times275}{1,27\times\sqrt{3}\times1,0}\times10^{-3} = 1076\ \mathrm{kN}$$

RESISTENZA A TAGLIO DELLA SEZIONE EFFICACE

$$V_{\mathrm{Rd,n}} = 2\times A_{\mathrm{v,net}}\frac{f_{\mathrm{u,ac}}}{\sqrt{3}\gamma_{\mathrm{M2}}}$$

Area efficace, $A_{\mathrm{v,net}} = t_{\mathrm{ac}}\left(h_{\mathrm{ac}} - n_1 d_0\right) = 10\left(430 - 6\times22\right) = 2980\ \mathrm{mm}^2$

$$V_{\mathrm{Rd,n}} = 2\times2980\times\frac{430}{\sqrt{3}\times1,25}\times10^{-3} = 1184\ \mathrm{kN}$$

RESISTENZA A "BLOCK TEARING"

$$V_{\mathrm{Rd,b}} = 2\left(\frac{0,5 f_{\mathrm{u,ac}}A_{\mathrm{nt}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} + \frac{f_{\mathrm{y,ac}}A_{\mathrm{nv}}}{\sqrt{3}\gamma_{\mathrm{M0}}}\right)$$

Area efficace soggetta a trazione,

$A_{\mathrm{nt}} = t_{\mathrm{ac}}\left(e_2 - 0,5 d_0\right) = 10\left(40 - 0,5\times22\right) = 290\ \mathrm{mm}^2$

Area efficace soggetta a taglio,

$$A_{\mathrm{nv}} = t_{\mathrm{ac}}\left(h_{\mathrm{ac}} - e_1 - \left(n_1 - 0,5\right)d_0\right) = 10\left(430 - 40 - \left(6 - 0,5\right)22\right) = 2690\ \mathrm{mm}^2$$

$$V_{\mathrm{Rd,b}} = 2\left(\frac{0,5\times430\times290}{1,25} + \frac{275\times2690}{\sqrt{3}\times1,0}\right)\times10^{-3} = 954\ \mathrm{kN}$$

$V_{\mathrm{Rd,min}} = 954\ \mathrm{kN}$

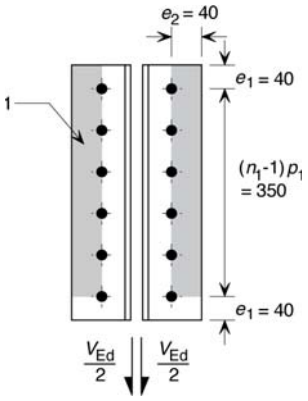
$V_{\mathrm{Ed}} = 450\ \mathrm{kN} \le 954\ \mathrm{kN}$ OK

4.2.2.2. Lato trave portante

1. Block shear – rottura per meccanismo "block tearing"

Requisito di base: $V_{\mathrm{Ed}} \le V_{\mathrm{Rd,min}}$

$V_{\mathrm{Rd,min}} = \min(V_{\mathrm{Rd,g}}; V_{\mathrm{Rd,n}}; V_{\mathrm{Rd,b}})$



RESISTENZA A TAGLIO DELLA SEZIONE LORDA

$$V_{Rd,g} = 2 \times \frac{h_{ac} t_{ac}}{1,27} \frac{f_{y,ac}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} = 2 \times \frac{430 \times 10 \times 275}{1,27 \times \sqrt{3} \times 1,0} \times 10^{-3} = 1076 \text{ kN}$$

RESISTENZA A TAGLIO DELLA SEZIONE EFFICACE

$$V_{Rd,n} = 2 \times A_{v,net} \frac{f_{u,ac}}{\sqrt{3}\gamma_{M2}}$$

Area efficace, $A_{v,net} = t_{ac}\left(h_{ac} - n_1 d_0\right) = 10\left(430 - 6 \times 22\right) = 2980 \text{ mm}^2$

$$V_{Rd,n} = 2 \times 2980 \times \frac{430}{\sqrt{3} \times 1,25} \times 10^{-3} = 1184 \text{ kN}$$

RESISTENZA A "BLOCK TEARING"

$$V_{Rd,b} = 2\left(\frac{0,5 f_{u,ac} A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_{y,ac} A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}}\right)$$

Area efficace soggetta a trazione,

$$A_{nt} = t_{ac}\left(e_2 - 0,5 d_0\right) = 10\left(40 - 0,5 \times 22\right) = 290 \text{ mm}^2$$

Area efficace soggetta a taglio,

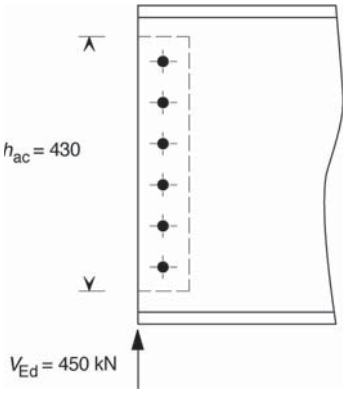
$$A_{nv} = t_{ac}\left(h_{ac} - e_1 - \left(n_1 - 0,5\right) d_0\right) = 10\left(430 - 40 - \left(6 - 0,5\right)22\right) = 2690 \text{ mm}^2$$

$$V_{Rd,b} = 2\left(\frac{0,5 \times 430 \times 290}{1,25} + \frac{275 \times 2690}{\sqrt{3} \times 1,0}\right) \times 10^{-3} = 954 \text{ kN}$$

$V_{Rd,min} = 954$ kN

$V_{Ed} = 450$ kN ≤ 954 kN OK

4.2.3. Verifica a taglio dell'anima della trave
4.2.3.1. Resistenza a taglio e "block tearing"



Requisito di base: $V_{Ed} \leq V_{Rd,min}$

$V_{Rd,min} = \min(V_{Rd,g}; V_{Rd,n}; V_{Rd,b})$

Resistenza a taglio della sezione lorda

$$V_{Rd,g} = A_{v,wb} \frac{f_{y,b}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}}$$

Area dell'anima della trave soggetta a taglio,
$A_{v,wb} = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f = 11700 - 2 \times 210 \times 15{,}7 + (9 + 2 \times 24)15{,}7$
$A_{v,wb} = 6001$ mm^2
$\eta\, h_w t_w = 1{,}0 \times 515{,}6 \times 9 = 4640$ mm^2

$$V_{Rd,g} = \frac{6001 \times 275}{\sqrt{3} \times 1{,}0} \times 10^{-3} = 953 \text{ kN}$$

Resistenza a taglio della sezione efficace

$$V_{Rd,n} = A_{v,wb,net} \frac{f_{u,b}}{\sqrt{3}\gamma_{M2}}$$

Area efficace,

$$A_{v,wb,net} = A_{v,wb} - n_1 d_0 t_w = 6001 - 6 \times 22 \times 9 = 4813 \text{ mm}^2$$

$$V_{Rd,n} = 4813 \times \frac{430}{\sqrt{3} \times 1{,}25} \times 10^{-3} = 956 \text{ kN}$$

RESISTENZA A "BLOCK TEARING"

$$V_{\mathrm{Rd,b}} = \left(\frac{0{,}5 f_{\mathrm{u,b}} A_{\mathrm{nt}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} + \frac{f_{\mathrm{y,b}} A_{\mathrm{nv}}}{\sqrt{3}\gamma_{\mathrm{M0}}} \right)$$

Area efficace soggetta a trazione,

$$A_{\mathrm{nt}} = t_{\mathrm{w}} \left(e_{2,\mathrm{b}} - 0{,}5 d_0 \right) = 9\left(40 - 0{,}5 \times 22\right) = 261 \text{ mm}^2$$

Area efficace soggetta a taglio,

$$A_{\mathrm{nv}} = t_{\mathrm{w}} \left(e_{1,\mathrm{b}} + \left(n_1 - 1\right) p_1 - \left(n_1 - 0{,}5\right) d_0 \right) = 9\left(90 + \left(6-1\right)70 - \left(6 - 0{,}5\right)22\right) = 2871 \text{ mm}^2$$

$$V_{\mathrm{Rd,b}} = \left(\frac{0{,}5 \times 430 \times 261}{1{,}25} + \frac{275 \times 2871}{\sqrt{3} \times 1{,}0} \right) \times 10^{-3} = 501 \text{ kN}$$

$V_{\mathrm{Rd,min}}$ = min(953; 956; 501) = 501 kN

V_{Ed} = 450 kN ≤ 501 kN OK

4.2.3.2. Interazione taglio/momento flettente in corrispondenza della seconda fila di bulloni

Non applicabile, trave priva di intaglio.

4.2.4. Verifica a flessione in corrispondenza dell'intaglio

Non applicabile, trave priva di intaglio.

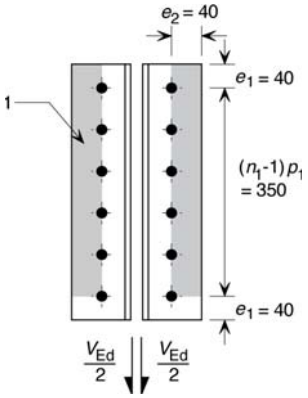
4.2.5. Verifica di stabilità locale della trave intagliata

Non applicabile, trave priva di intaglio.

4.3. Verifiche per giunzioni soggette a "tying" (trazione assiale)

4.3.1. Verifica delle squadrette angolari e del gruppo di bulloni

4.3.1.1. Resistenza a flessione delle squadrette angolari



Requisito di base: $F_{\mathrm{Ed}} \le F_{\mathrm{Rd}}$

$$F_{\mathrm{Rd}} = \min\left(F_{\mathrm{Rd,u,1}}, F_{\mathrm{Rd,u,2}}, F_{\mathrm{Rd,u,3}}\right)$$

La resistenza a "tying" $F_{\mathrm{Rd,u,1}}$ per il meccanismo 1 è data da:

$$F_{\mathrm{Rd,u,1}} = \frac{\left(8n - 2e_{\mathrm{w}}\right) M_{\mathrm{pl,1,Rd,u}}}{2mn - e_{\mathrm{w}}\left(m+n\right)}$$

$$\sum l_{\mathrm{eff}} = 2e_{1\mathrm{A}} + \left(n_1 - 1\right) p_{1\mathrm{A}}$$

$$e_{1\mathrm{A}} = e_1 \text{ e} \le 0{,}5\left(p_3 - t_{\mathrm{w}} - 2r\right) + \frac{d_0}{2}$$

$$0{,}5\left(109 - 9 - 2\times 11\right) + \frac{22}{2} = 50 \text{ mm}$$

$$\therefore e_{1\mathrm{A}} = 40 \text{ mm}$$

$$p_{1\mathrm{A}} = p_1 \text{ e} \le p_3 - t_{\mathrm{w}} - 2r + d_0$$

$$p_3 - t_{\mathrm{w}} - 2r + d_0 = 109 - 9 - 2\times 11 + 22 = 100 \text{ mm}$$

$$\therefore p_{1\mathrm{A}} = 70 \text{ mm}$$

$$\sum l_{\mathrm{eff}}\, 2e_{1\mathrm{A}} + \left(n_1 - 1\right) p_{1\mathrm{A}} = 2\times 40 + \left(6-1\right)70 = 430 \text{ mm}$$

$$M_{\mathrm{pl,1,Rd,u}} = \frac{0{,}25\sum l_{\mathrm{eff,1}} t_{\mathrm{f}}^2 f_{\mathrm{u,ac}}}{\gamma_{\mathrm{Mu}}} = \frac{0{,}25\times 430\times 10^2\times 430}{1{,}1}\times 10^{-6} = 4{,}2 \text{ kNm}$$

$$m = \frac{p_3 - t_{\mathrm{w}} - 2t_{\mathrm{ac}} - 2\times 0{,}8\times r}{2} = \frac{109 - 9 - 2\times 10 - 2\times 0{,}8\times 11}{2} = 31 \text{ mm}$$

$$e_{\mathrm{w}} = \frac{d_{\mathrm{w}}}{4} = \frac{37}{4} = 9{,}25 \text{ mm}$$

$$n = \min\left(e_2; 1{,}25m\right) = \min\left(40; 39\right) = 39 \text{ mm}$$

$$F_{\mathrm{Rd,u,1}} = \frac{\left(8\times 39 - 2\times 9{,}25\right) 4{,}2\times 10^3}{2\times 31\times 39 - 9{,}25\left(31+39\right)} = 696 \text{ kN}$$

La resistenza a "tying" $F_{\mathrm{Rd,u,2}}$ per il meccanismo 2 è data da:

$$F_{\mathrm{Rd,u,2}} = \frac{2M_{\mathrm{pl,2,Rd,u}} + n\sum F_{\mathrm{t,Rd,u}}}{m+n}$$

$M_{pl,2,Rd,u} = M_{pl,1,Rd,u} = 4{,}20$ kNm

$$F_{t,Rd,u} = \frac{k_2 f_{ub} A}{\gamma_{Mu}} = \frac{0{,}9 \times 800 \times 245}{1{,}1} \times 10^{-3} = 160 \text{ kN}$$

$$F_{Rd,u,2} = \frac{2 \times 4{,}2 \times 10^3 + 39 \times 12 \times 160}{31 + 39} = 1190 \text{ kN}$$

La resistenza a "tying" $F_{Rd,u,3}$ per il meccanismo 3 è data da:

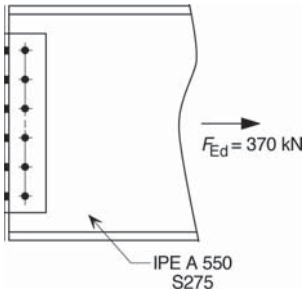
$$F_{Rd,u,3} = \sum F_{t,Rd,u} = 12 \times 160 = 1920 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = \min\left(F_{Rd,u,1}, F_{Rd,u,2}, F_{Rd,u,3}\right)$$

$$F_{Rd} = \min\left(696, \quad 1190, \quad 1920\right) = 696 \text{ kN}$$

$F_{Ed} = 370 \text{ kN} \leq 696 \text{ kN}$ OK

4.3.1.2. Resistenza a taglio dei bulloni



Requisito di base: $F_{Ed} \leq F_{Rd}$

$F_{Rd} = 2n_b F_{v,u}$

$$F_{v,u} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{Mu}} = \frac{0{,}6 \times 800 \times 245}{1{,}1} \times 10^{-3} = 107 \text{ kN}$$

$F_{Rd} = 2 \times 6 \times 107 = 1284$ kN

$F_{Ed} = 370 \text{ kN} \leq 1284 \text{ kN}$ OK

4.3.1.3. Resistenza a rifollamento delle squadrette angolari

Requisito di base: $F_{Ed} \leq F_{Rd}$

$F_{Rd} = 2n_b F_{b,hor,u,Rd}$

$$F_{\mathrm{b,hor,u,Rd}} = \frac{k_1 \alpha_{\mathrm{b}} f_{\mathrm{u,ac}} d t_{\mathrm{ac}}}{\gamma_{\mathrm{Mu}}}$$

$$k_1 = \min\left(2{,}8\frac{e_1}{d_0} - 1{,}7;\ 1.4\frac{p_1}{d_0} - 1{,}7;\ 2{,}5\right) = \min\left(2{,}8\frac{40}{22} - 1{,}7;\ 1{,}4\frac{70}{22} - 1{,}7;\ 2{,}5\right) =$$
$$= \min\left(3{,}39;\ 2{,}75;\ 2{,}5\right) = 2{,}5$$

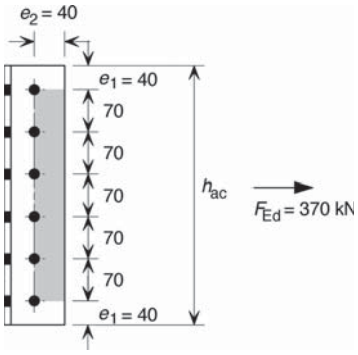
$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_2}{3d_0};\ \frac{f_{\mathrm{ub}}}{f_{\mathrm{u,ac}}};\ 1{,}0\right) = \min\left(\frac{40}{3\times 22};\ \frac{800}{430};\ 1{,}0\right) =$$
$$\min\left(0{,}61;\ 1{,}86;\ 1{,}0\right) = 0{,}61$$

$$F_{\mathrm{b,hor,u,Rd}} = \frac{2{,}5\times 0{,}61\times 430\times 20\times 10}{1{,}1}\times 10^{-3} = 119\ \mathrm{kN}$$

$F_{\mathrm{Rd}} = 2 \times 6 \times 119 = 1428$ kN

$F_{\mathrm{Ed}} = 350$ kN ≤ 1428 kN OK

4.3.1.4. Resistenza a "block tearing"



Requisito di base: $F_{\mathrm{Ed}} \leq F_{\mathrm{Rd,b}}$

$$F_{\mathrm{Rd,b}} = \frac{f_{\mathrm{u,ac}} A_{\mathrm{nt}}}{\gamma_{\mathrm{Mu}}} + \frac{f_{\mathrm{y,ac}} A_{\mathrm{nv}}}{\sqrt{3}\gamma_{\mathrm{M0}}}$$

Caso 1

$$A_{\mathrm{nt}} = 2t_{\mathrm{ac}}\left[\left(n_1 - 1\right)p_1 - \left(n_1 - 1\right)d_0\right] = 2\times 10\times\left[\left(6-1\right)\times 70 - \left(6-1\right)\times 22\right] = 4800\ \mathrm{mm}^2$$

$$A_{\mathrm{nv}} = 4t_{\mathrm{ac}}\left(e_2 - 0{,}5d_0\right) = 4\times 10\left(40 - 0{,}5\times 22\right) = 1160\ \mathrm{mm}^2$$

$$F_{\mathrm{Rd,b}} = \left(\frac{430 \times 4800}{1,1} + \frac{275 \times 1160}{\sqrt{3} \times 1,0} \right) \times 10^{-3} = 2060 \text{ kN}$$

Caso 2

$$A_{\mathrm{nt}} = 2t_{\mathrm{ac}} \left[e_1 + (n_1 - 1) p_1 - (n_1 - 0,5) d_0 \right]$$

$$A_{\mathrm{nt}} = 2 \times 10 \times \left[40 + (6-1) \times 70 - (6 - 0,5) \times 22 \right] = 5380 \text{ mm}^2$$

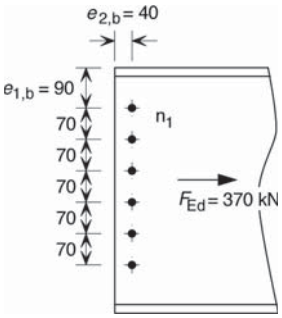
$$A_{\mathrm{nv}} = 2t_{\mathrm{ac}} \left(e_2 - 0,5 d_0 \right) = 2 \times 10 \times \left(40 - 0,5 \times 22 \right) = 580 \text{ mm}^2$$

$$F_{\mathrm{Rd,b}} = \left(\frac{430 \times 5380}{1,1} + \frac{275 \times 580}{\sqrt{3} \times 1,0} \right) \times 10^{-3} = 2195 \text{ kN}$$

$F_{\mathrm{Ed}} = 370 \text{ kN} \leq 2060$ e 2195 kN OK

4.3.2. Verifica dell'anima della trave

4.3.2.1. Resistenza a rifollamento dell'anima della trave



Requisito di base: $F_{\mathrm{Ed}} \leq F_{\mathrm{Rd}}$

$F_{\mathrm{Rd}} = n_{\mathrm{b}} F_{\mathrm{b,hor,u,Rd}}$

$$F_{\mathrm{b,hor,u,Rd}} = \frac{k_1 \alpha_{\mathrm{b}} f_{\mathrm{u,b}} d t_{\mathrm{w}}}{\gamma_{\mathrm{Mu}}}$$

$$k_1 = \min\left(1,4 \frac{p_1}{d_0} - 1,7;\ 2,5 \right) = \min\left(1,4 \frac{70}{22} - 1,7;\ 2,5 \right) = 2,5$$

$$\alpha_{\mathrm{b}} = \min\left(\frac{e_{2,\mathrm{b}}}{3 d_0};\ \frac{f_{\mathrm{ub}}}{f_{\mathrm{u,b}}};\ 1,0 \right) = \min\left(\frac{40}{3 \times 22};\ \frac{800}{430};\ 1,0 \right) = 0,61$$

$$F_{\mathrm{b,hor,u,Rd}} = \frac{2{,}5 \times 0{,}61 \times 430 \times 20 \times 9}{1{,}1} \times 10^{-3} = 107 \text{ kN}$$

$F_{\mathrm{Rd}} = 6 \times 107 = 642$ kN

$F_{\mathrm{Ed}} = 370 \text{ kN} \leq 642 \text{ kN}$ OK

4.3.2.2. Resistenza a trazione dell'anima della trave

Requisito di base: $F_{\mathrm{Ed}} \leq F_{\mathrm{Rd,n}}$

$$F_{\mathrm{Rd,n}} = 0{,}9 A_{\mathrm{net,wb}} \frac{f_{\mathrm{u,b}}}{\gamma_{\mathrm{Mu}}}$$

$$A_{\mathrm{net,wb}} = t_{\mathrm{w}} h_{\mathrm{ac}} - d_0 n_1 t_{\mathrm{w}} = 9 \times 430 - 22 \times 6 \times 9 = 2682 \text{ mm}^2$$

$$F_{\mathrm{Rd,n}} = 0{,}9 \times 2682 \frac{430}{1{,}1} \times 10^{-3} = 944 \text{ kN}$$

$F_{\mathrm{Ed}} = 370 \text{ kN} \leq 944 \text{ kN}$ OK

4.3.2.3. Resistenza a "block tearing"

Requisito di base: $F_{\mathrm{Ed}} \leq F_{\mathrm{Rd,b}}$

$$F_{\mathrm{Rd,b}} = \frac{f_{\mathrm{u,b}} A_{\mathrm{nt}}}{\gamma_{\mathrm{Mu}}} + \frac{f_{\mathrm{y,b}} A_{\mathrm{nv}}}{\sqrt{3}\gamma_{\mathrm{M0}}}$$

Caso 1

$$A_{\mathrm{nt}} = t_{\mathrm{w}} \left[\left(n_1 - 1\right) p_1 - \left(n_1 - 1\right) d_0 \right] = 9 \left[\left(6 - 1\right) \times 70 - \left(6 - 1\right) 22 \right] = 2160 \text{ mm}^2$$

$$A_{\mathrm{nv}} = 2 t_{\mathrm{w}} \left(e_{2,\mathrm{b}} - 0{,}5 d_0 \right) = 2 \times 9 \left(40 - 0{,}5 \times 22 \right) = 522 \text{ mm}^2$$

$$F_{\mathrm{Rd,b}} = \left(\frac{430 \times 2160}{1{,}1} + \frac{275 \times 522}{\sqrt{3} \times 1{,}0} \right) \times 10^{-3} = 927 \text{ kN}$$

$F_{\mathrm{Ed}} = 370 \leq 927$ kN OK

(il caso 2 si applica solo a travi intagliate).

Fondazione
Promozione Acciaio
CRESCE L'ACCIAIO, CRESCE IL PAESE.

CREDITS

- Fig.1/6 – Ing. Antonio Formisano - *COSTRUIRE CON L'ACCIAIO: DAL MATERIALE AI SISTEMI COSTRUTTIVI. PROGETTO E VERIFICA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI* - Milano, 11 Novembre 2016
- Fig.2/4/5/7/9/11/12/14/17/18 – Prof. Gaetano Della Corte – *Collegamenti e nodi: il metodo delle componenti (EN 1993-1-8)*
- Fig.8 – UNI EN 1993-1-8:2005 – Figure 5.4
- Fig.10 – Prof. Paolo Napoli – *Progettazione di costruzioni in acciaio*
- Fig.15 – UNI EN 1993-1-8:2005 – Figure 6.9
- Fig.16 – UNI EN 1993-1-8:2005 – Figure 6.10

- Esempi svolti di calcolo e verifica per collegamenti bullonati flangiati e a squadretta tratti dal volume:
  COLLEGAMENTI IN ACCIAIO IN EDIFICI MONOPIANO E MULTIPIANO – EUROCODICE 3
  Fondazione Promozione Acciaio – Dario Flaccovio Editore
  ISBN: 978-88-579-0146-6

- Copertina: Sede L'Oreal, Milano – Redesco Progetti srl

© Documento di proprietà di Fondazione Promozione Acciaio. Redazione: Febbraio 2018. Diritti di riproduzione riservati.

Fondazione Promozione Acciaio | Via Vivaio 11 | 20122 Milano | Italia
T +39 02 86313020 | F +39 02 86313031 | info@fpacciaio.it | www.promozioneacciaio.it