

Giunti Bullonati con bulloni normali sollecitati a trazione: *Predimensionamento e Calcolo*

Davide Tonelli

Aprile 2013

1 Analisi dei Carichi e delle Sollecitazioni

Si prende a riferimento il caso studio del telaio di Figura 1, di luce costante pari a $l = 6,5 m$ e passo longitudinale anch'esso pari $p = 6,5 m$.

$$SLU = 1,3G_1 + 1,5G_2 + 1,5Q_{k1}, \quad SLE_{rara} = 1,0G_1 + 1,0G_2 + 1,0Q_{k1}$$

Voci	$G_2 \frac{kN}{m^2}$	$G_1 \frac{kN}{m}$	$G_2 \frac{kN}{m}$	$Q_{k1} \frac{kN}{m}$	$SLU \frac{kN}{m}$	$SLE_{rara} \frac{kN}{m}$
Soletta	$25 * 0,12 = 3,0$					
Massetto p.i.	$17 * 0,10 = 1,7$					
Pavimento	0,4	0,8	$6,1 * 6,5 = 36,6$	$5 * 6,5 = 30$	101	67,4
Impianti+altri	0,2					
Tramezzi	0,8					
TOTALE	36,6					

Tabella 1: Analisi dei Carichi

Momento d'incastro massimo: $\frac{ql^2}{12}$. $M_{max}^{SLU} = \frac{101 * 6,5^2}{12} = 355,6 \frac{kN}{m}$, $M_{max}^{SLE} = \frac{67,4 * 6,5^2}{12} = 237,3 \frac{kN}{m}$
 Taglio d'incastro massimo: $\frac{ql}{2}$. $V_{max}^{SLU} = \frac{101 * 6,5}{2} = 328,5 \frac{kN}{m}$, $V_{max}^{SLE} = \frac{67,4 * 6,5}{2} = 219,1 \frac{kN}{m}$

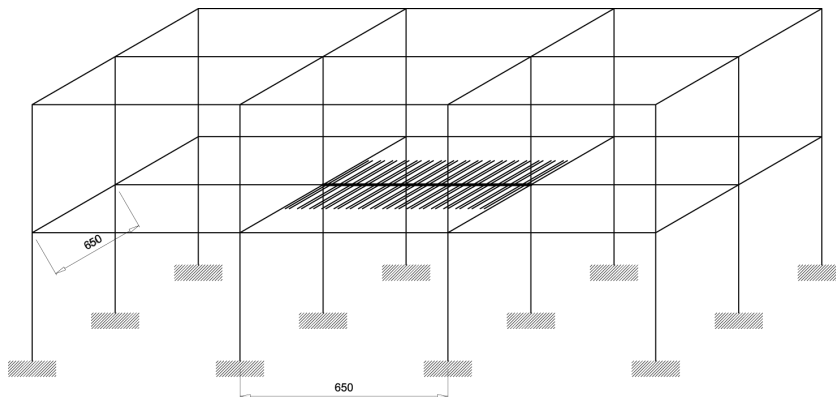


Figura 1: Trave in esame

2 Predimensionamento

$$\frac{M_{max}^{SLU}}{f_{yk}} = W_{min}, \quad \frac{355,6 * 100}{35,5} = 1001,7 cm^3. \quad \text{Prendo IPE400 S355, } W_{el} = 1160 cm^3.$$

Per garantire in prima approssimazione la gerarchia delle resistenze prendo una colonna, seppur di ridotte dimensioni, con un modulo resistente maggiore di quello della trave incidente: HE240C S355, $W_{el} = 1359 cm^3$.

In un giunto flangiato i bulloni tesi maggiormente efficaci sono quelli immediatamente adiacenti l'ala tesa della trave. Immagino di disporre 4 bulloni, due sopra e due sotto l'ala, e valido l'ipotesi fatta ricercando il diametro minimo del bullone in tale configurazione:

$$F_{t,ed} = \frac{M}{h-t_f} = \frac{355,6 \cdot 100}{38,65} = 920 \text{ kN} \quad F_{t,rd} = n_b \cdot f_{t,rd} = 4 \cdot \frac{0,9 f_{tb} \pi r^2 \cdot 0,75}{\gamma_{M2}} \quad F_{t,ed} = F_{t,rd} \quad \text{Esplicito } r:$$

$$r_{min} = \sqrt{\frac{F_{t,ed} \cdot \gamma_{M2}}{n_b \cdot 0,9 \cdot 0,75 f_{tb} \pi}} = \sqrt{\frac{920 \cdot 1,25}{4 \cdot 0,9 \cdot 0,75 \cdot 100 \pi}} = \frac{1150}{847,8} = 1,36 \text{ cm} \quad \text{Prendo } r = 1,3 \text{ cm}$$

$$4 \text{ M26 cl. 10.9, } F_{t,rd} = \frac{0,9 \cdot 100 \pi \cdot 1,3^2 \cdot 0,75}{1,25} \cdot 4 = 1146 \text{ kN} > F_{t,ed} = 920 \text{ kN}.$$

Il giunto da verificare, risultato dal predimensionamento, è riportato in Figura 2.

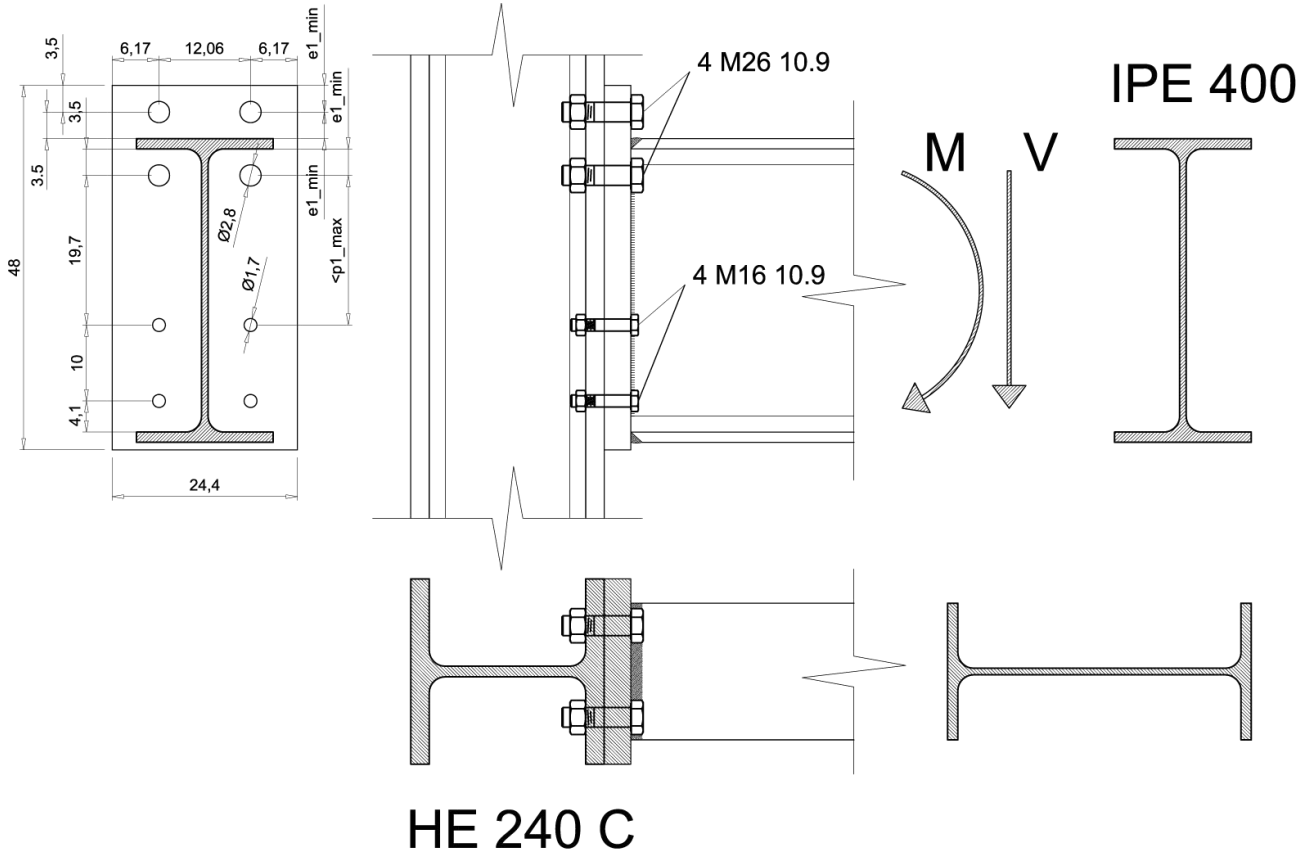


Figura 2: Giunto da verificare

3 Calcolo

L'unione è con bulloni "normali", ovvero non precaricati. Dunque non è richiesto alcun comportamento al servizio e non si devono conseguentemente eseguire verifiche *SLE*, ovvero allo stato limite di esercizio (es. decompressione, scorrimento etc...). Le uniche verifiche da eseguire sono quelle allo *SLU* - stato limite ultimo - ovvero verifiche di resistenza (es. strappo/tranciamento dei bulloni, rifollamento, punzonamento etc...).

Lo stato tensionale nei giunti di tipo flangiato è vario e complesso: non lo si può dunque conoscere in maniera precisa e puntuale. Ci si accontenta piuttosto di ottenerne delle stime cautelative mediante l'impiego di *metodi di calcolo convenzionali* validati dall'esperienza. Tra questi:

1. quelli che considerano la *flangia* ∞ *rigida*:
 - (a) Metodo Elastico: flangia ∞ rigida, bulloni indefinitamente elastici e zona di contatto compressa indefinitamente elastica ;
 - (b) Metodo Plastico: flangia ∞ rigida, bulloni tesi plasticizzati, zona compressa determinabile in più modi.
2. quelli che considerano la *flangia deformabile*.

3.1 Metodo 1a: flangia ∞ rigida + l.c. elastico

Come per le sezioni in c.a. in fase II sottoposte a flessione pura retta, senza il coefficiente n però - perchè qui il materiale è sempre acciaio, si ricerca l'asse neutro della sezione di contatto tra la flangia e la colonna.

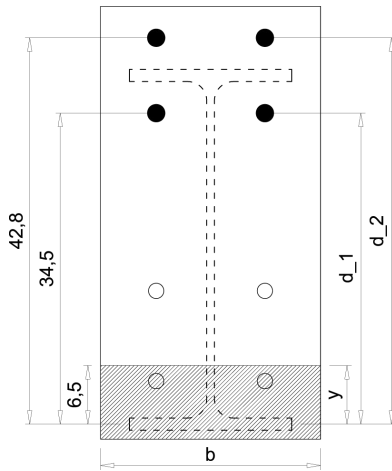


Figura 3: Metodo 1a, Elastico

$$\begin{aligned}
 S_x &= \frac{by^2}{2} - 2A_{res}[(d_1 - y) + (d_2 - y)] = 0 \\
 S_x &= \frac{by^2}{2} - 2A_{res}[(d_1 + d_2 - 2y)] = 0 \\
 S_x &= y^2 - 4\frac{A_{res}}{b}(d_1 + d_2 + 2y) = 0 \\
 y^2 + 8\frac{A_{res}}{b}y - 4\frac{A_{res}}{b}(d_1 + d_2) &= 0 \\
 y^2 + 2cy - c(d_1 + d_2) &= 0 \\
 y_1, y_2 &= \frac{-2c \pm \sqrt{4c^2 + 4c(d_1 + d_2)}}{2} \\
 y_1, y_2 &= c[-1 \pm \sqrt{1 + \frac{d_1 + d_2}{c}}] \\
 y &= 6,48 \text{ cm} \\
 J_x &= \frac{by^3}{3} + 2A_{res}[(d_1 - y)^2 + (d_2 - y)^2] = 18971 \text{ cm}^4 \\
 \sigma_c &= \frac{M}{J_x}y = \frac{355,6 \cdot 100}{18971} \cdot 6,48 = 12,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \\
 N_{b,max} &= \frac{M \cdot (d_2 - y)}{J_x} A_{res} = 271 \text{ kN} \leq F_{t,rd} = 286,5 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

OK, il giunto è verificato allo SLU.

MARGINE SICUREZZA:

$$\Gamma = \frac{M_{r,d}}{M_{e,d}} = \frac{F_{t,rd}}{F_{t,ed}} = \frac{286,5}{271} = 1,06$$

3.2 Metodo 1b: flangia ∞ rigida + l.c. plastico

Ipotizzo i bulloni snervati e meccanismo di collasso con rotazione attorno al centro di pressione O in Figura 4.

Allora il momento resistente sarà:

$$\begin{aligned}
 M_{rd} &= M_{pl,f} + 2F_{t,rd} \cdot (d_1 + d_2) = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{b \cdot t_f^2}{4} + 2F_{t,rd} \cdot (d_1 + d_2) \\
 M_{rd} &= 2526,1 + 44292,9 = 46819 \text{ kNcm} = 468,2 \text{ kNm} > M_{ed} = 355,6 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

OK, il giunto è verificato allo SLU.

MARGINE SICUREZZA:

$$\Gamma = \frac{M_{r,d}}{M_{e,d}} = \frac{468,2}{355,6} = 1,31$$

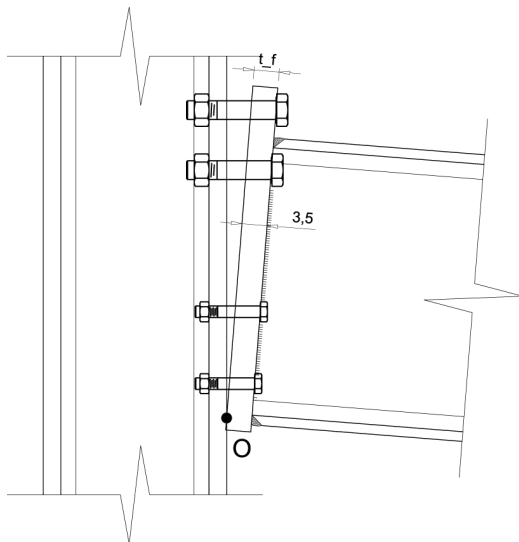


Figura 4: Metodo 1b, Plastico

3.3 Metodo 2: flangia deformabile

Rispetto ai precedenti, questo metodo è al contempo “più in linea” con il metodo previsto dall’EC 3 parte 8, pur mantenendo una discreta semplicità di calcolo. Esso prevede di limitare il valore del momento resistente del giunto in funzione del meccanismo di collasso più debole identificato. Si analizzano allo scopo tre meccanismi di collasso semplificati, relativi alla zona di ancoraggio tra piattabanda tesa della trave e flangia - riportati in Figura 5 - rispettivamente:

1. completo snervamento della flangia;
2. rottura dei bulloni tesi con parziale snervamento della flangia;
3. rottura dei bulloni con flangia ancora elastica.

Dalla Figura 5 si evince dunque che:

- (1) equ. rotaz. parte dx attorno ad A - $2M_{pl} = \frac{F_{t1,rd}}{2}m$ $F_{t1,rd} = 4\frac{M_{pl}}{m} = 4\frac{2526,1}{4,2} = 4 \cdot 601,4 = 2405,6 \text{ kN}$
- (2) equ. rotaz. attorno ad A - $2N_{b,rd}n + M_{pl} = \frac{F_{t2,rd}}{2}(n+m)$ $F_{t2,rd} = \frac{4N_{b,rd}n + 2M_{pl}}{n+m} = \frac{4 \cdot 286,5 \cdot 3,5 + 2 \cdot 2526,1}{3,5 + 4,2} = \frac{4011 + 5052,2}{7,7} = \frac{9063,2}{7,7} = 1177 \text{ kN}$
- (3) equ. traslaz. verticale - $F_{t3,rd} = 4N_{b,rd} = 4 \cdot 286,5 = 1146 \text{ kN}$

In definitiva $F_{t,rd} = \min(F_{t1,rd}, F_{t2,rd}, F_{t3,rd}) = F_{t3,rd} = 1146 \text{ kN}$, e dunque l’elemento debole del giunto sono i bulloni: la flangia si comporta effettivamente come rigida. Ciò è vero perchè nella fattispecie la flangia è spessa (35 mm), ma soprattutto perchè ho cercato di limitare al massimo i valori m ed n , ovvero le distanze dei fori dalla piattabanda tesa della trave.

Allora $M_{rd} = 2 \cdot f_{trd} \cdot (d_1 + d_2) = 2 \cdot 286,5 \cdot (34,5 + 42,8) = 44292,9 \text{ kNcm} = 442,9 \text{ kNm}$

OK, il giunto è verificato allo SLU.

MARGINE SICUREZZA: $\Gamma = \frac{M_{rd}}{M_{ed}} = \frac{442,9}{355,6} = 1,25$

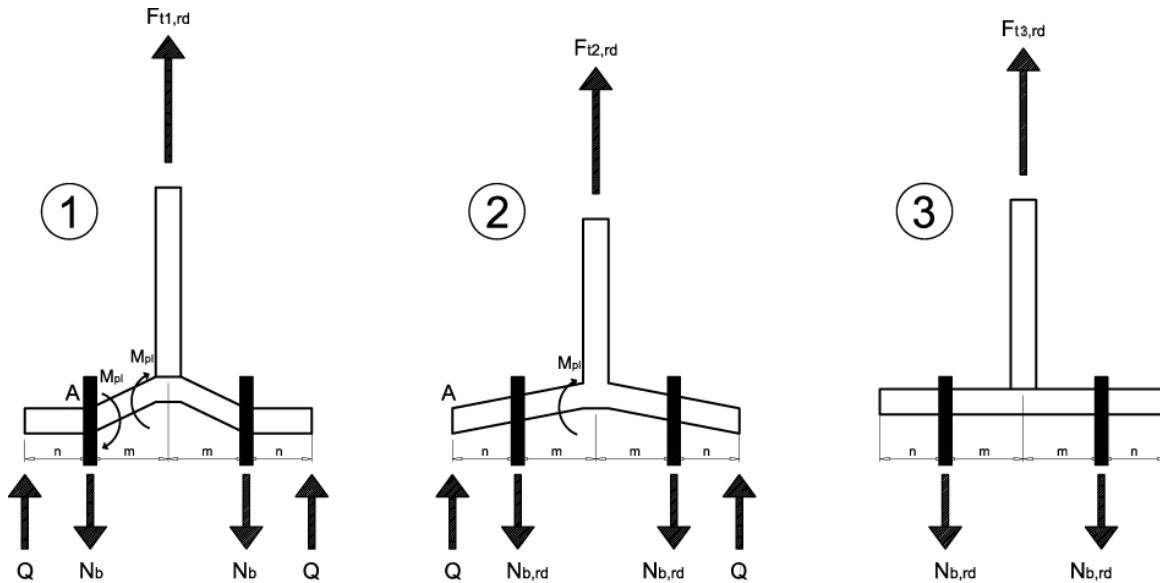


Figura 5: Possibili meccanismi di collasso in corrispondenza della zona tesa del giunto flangiato

4 Verifiche (di resistenza)

Assumo come valori di calcolo degli sforzi quelli dedotti con il Metodo 2.

1. Bulloni allo stato limite elastico - verificata già soddisfatta quando $M_{rd} > M_{ed}$. Resta da verificare il taglio V_{max}^{SLU} : lo affido tutto ai 4 M16 10.9 in zona compressa.

$$V_{ed} = \frac{V_{max}^{SLU}}{4} = \frac{328,5}{4} = 82,1 \text{ kN} \quad V_{rd} = \frac{0,5 \cdot f_{tb} \pi r^2}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 100 \cdot \pi \cdot 0,8^2}{1,25} = 80,4 \text{ kN} \quad \frac{V_{ed}}{V_{rd}} = 1,02$$

La verifica è quasi soddisfatta, e la si può comunque ritenere soddisfatta dato che non si è messo in conto la resistenza a taglio residua dei 4 M26 10.9 tesi.

2. *Saldature trave-flangia* - l' IPE 400 è un profilo piuttosto alto, per di più realizzato in S355. Per trasferire gli sforzi sarebbero necessarie sezioni di gola alte: si realizzeranno dunque saldature a piena penetrazione per le piattabande, che non necessitano di verifica alcuna. L'anima invece, deputata a tramettere il taglio, può essere saldata a cordone d'angolo. Si ribaltano le sezioni sulla flangia e si inverte la formula esplicitando l'altezza di gola: $a_{min} = \frac{V_{max}^{SLU}}{2 \cdot l \cdot 0,70 \cdot f_{yk}} = \frac{328,5}{2 \cdot 33,1 \cdot 0,70 \cdot 35,5} = 0,2 \text{ cm}$. Allora prendo altezza di gola $a = 3 \text{ mm}$.

3. *Rifollamento* - possono essere soggette a rifollamento (o ovalizzazione plastica dei fori) sia la flangia che la piattabanda della colonna. Entrambe sono in S355, dunque tra le due membrature quella più esposta a rischio di rifollamento - per la quale occorre condurre la verifica - sarà senz'altro quella più sottile: è la piattabanda della colonna, con uno spessore di $24,5 \text{ mm}$. Coerentemente con quanto fatto al punto 1 assumo $F_{b,ed} = V_{ed} = 82,1 \text{ kN}$, ovvero affido tutto il taglio ai bulloni M16 in zona compressa. Sarà $F_{b,rd} = \frac{k \alpha f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,417 \cdot 35,5 \cdot 2,6 \cdot 2,45}{1,25} = 188,5 \text{ kN}$ $\frac{F_{b,ed}}{F_{b,rd}} = 0,44 < 1$.

4. *Punzonamento* - possono essere soggette a punzonamento (o imbutimento della piastra in corrispondenza dei fori) sia la flangia che la piattabanda della colonna, in corrispondenza dei bulloni tesi. Cautelativamente sarà $B_{p,ed} = f_{t,rd} = 286,5 \text{ kN}$, mentre $B_{p,rd} = \frac{0,6 \cdot \pi d_m \cdot t_p \cdot f_{yk}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 3,9 \cdot 2,45 \cdot 35,5}{1,25} = 511,5 \text{ kN}$. Allora $\frac{B_{p,ed}}{B_{p,rd}} = \frac{286,5}{511,5} = 0,56 < 1$.

Resta da dire che un metodo di verifica dei giunti flangiati trave-colonna, al contempo più accurato ma decisamente più elaborato - tanto da richiedere quasi inevitabilmente il ricorso a fogli di calcolo - è quello riportato nell'EC3 parte 8, dal quale peraltro il *Metodo 2* prende spunto.

5 Conclusioni

5.1 Commento

Come si è visto le verifiche di resistenza risultano tutte soddisfatte: ciò accade perchè è stato fatto un *corretto predimensionamento*. La fase di predimensionamento è sostanziale ed indispensabile ai fini del progetto, ed anzi lo condiziona significativamente. Data la mole di conti da svolgere ai fini della verifica non è pensabile affrontare il problema di progetto con un approccio di aggiornamento iterativo delle sezioni e dei materiali di tentativo. Gli elementi costituenti il giunto e la struttura in genere dovranno essere sì oggetto di discussione ed eventuale aggiornamento in fase di verifica, ma le modifiche non dovranno essere sostanziali: qualora ciò dovesse accadere questo sarebbe sintomo di un errore in fase di predimensionamento.

5.2 Cosa resta da fare

Con i calcoli e le verifiche fin qui condotte si è controllato solamente che il giunto *trave-flangia-piattabanda_colonna* fosse in grado di trasmettere gli sforzi massimi dalla trave alla colonna. Sono state dunque fatte unicamente verifiche di resistenza, che peraltro non esauriscono neppure l'insieme di tutte le verifiche di resistenza da eseguire. Mancano ancora:

1. verifica del pannello d'anima della colonna (per evitare distorsioni da taglio);
2. verifica a trazione dell'anima della colonna in corrispondenza della zona tesa del giunto;
3. verifica di stabilità a compressione dell'anima della colonna in corrispondenza della zona compressa del giunto.

Qualora inoltre i bulloni fossero *precaricati* e non *normali*, mancherebbero inoltre completamente le verifiche al servizio, ovvero allo stato limite di esercizio. Tra queste troviamo senz'altro:

1. decompressione della zona di contatto tra flangia e piattabanda della colonna;
2. resistenza allo scorrimento per attrito nella zona di contatto tra flangia e piattabanda della colonna.