Giunti inflessi

I giunti inflessi sono sottoposti prevalentemente a sforzi di flessione. Sono classificabili secondo vari criteri:

- in funzione del tipo di elementi collegati: giunti trave-trave e giunti trave-colonna;
- in base alla posizione: giunti intermedi e giunti di estremità;
- a seconda delle condizioni di vincolo che intendono riprodurre: giunti di continuità, giunti a cerniera di travi appoggiate, giunti a cerniera di travi continue;
- dipendentemente dalla tipologia: giunti con coprigiunto, giunti a flangia, giunti a squadretta.

Torniamo alle HEA600 e HEB600 viste nel primo esempio sui giunti tesi. Sono collegate con giunto di continuità inteso a ripristinare momento flettente e taglio:

$$M_x = 600\ kNm \qquad T_y = 300\ kN \qquad \sigma_{amm} = 240\ N/mm^2$$

Dobbiamo ripartire il momento su piattabande e anima:

$$M_{xp} = \frac{J_{xp}}{J_x} \cdot M_x = \frac{2 \cdot 300 \cdot 25 \cdot (295 - 12{,}5)^2 + 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 300 \cdot 25^3}{1412030000} \cdot 600000000 = 509{,}0\ kN \cdot m$$

$$M_{xa} = \frac{J_x - J_{xp}}{J_x} \cdot M_x = \frac{1412030000 - 1197875000}{1412030000} \cdot 600000000 = 91{,}0\ kNm$$

Sui coprigiunti nasce uno sforzo assiale:

$$N_p = \frac{M_{xp}}{h - e} = \frac{509000000}{590 - 25} = 900{,}9\ kN$$

Su ciascun bullone $\left(\sigma_{b,amm} = \frac{1}{1{,}5}\{0{,}7 \cdot 1000; 900\} = 466{,}7\ N/mm^2\right)$:

$$V_{b_p} = \frac{N_p}{10} = 90{,}1\ kN \Rightarrow \tau_{b_p} = \frac{90090}{452} = 199{,}3\ \frac{N}{mm^2} \Rightarrow \sigma_{id} = \sqrt{2} \cdot 199{,}3 = 281{,}9 < 466{,}7\ N/mm^2$$

Trascuriamo il momento di trasporto del taglio.

Passiamo all'anima. I bulloni sono soggetti all'azione del taglio e del momento:

$$V_{ba} = \frac{T_y}{12} = \frac{300000}{12} = 25000\ N$$

Per il momento flettente consideriamo solo il bullone più sollecitato:

$$S_{M\,max} = \frac{91000000 \cdot \sqrt{\left(75 + 75 + 75/2\right)^2 + \left(\frac{75}{2}\right)^2}}{4 \cdot \left[2\left(\frac{75}{2}\right)^2 + \left(75 + \frac{75}{2}\right)^2 + \left(\frac{75}{2}\right)^2 + \left(\frac{75}{2} \cdot 5\right)^2 + \left(\frac{75}{2}\right)^2\right]} = 81405\ N$$

Troviamo l'angolo formato da $S_{M\,max}$ con l'orizzontale bele che congiunge i due bulloni superiori per ottenere le proiezioni della forza:

$$\alpha = \arcsen \frac{75/2}{\sqrt{\left(150+\frac{75}{2}\right)^2+\left(\frac{75}{2}\right)^2}} = 11,31°$$

$\Rightarrow S_{Mmax,x} = 81405 \cdot \cos 11,31° = 79824\ N \qquad S_{Mmax,y} = 81405 \cdot \sen 11,31° = 15964\ N$

$$\Rightarrow V_{ba,max} = \sqrt{(25000+15964)^2 + 79824^2} = 89721\ N$$

$$\Rightarrow \tau_{ba} = \frac{89721}{2 \cdot 314} = 142,9\ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{id} = \sqrt{2} \cdot 142,9 = 202,0\ N/mm^2 < 466,7\ N/mm^2$$

Rifollamento piattabanda e coprigiunto:

$$\sigma_{r\,p\,amm} = \frac{60}{24} \cdot 240 \quad 600\ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{rp} = \frac{90100}{24 \cdot 25} = 150,2\ N/mm^2 < 600\ N/mm^2$$

$$\sigma_{r\,a\,amm} = \frac{50}{20}\ 240 = 600\ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{ra} = \frac{89721}{20 \cdot 13} = 345,1\ N/mm^2 < 600\ N/mm^2$$

Tensione normale sui coprigiunti delle piattabande e dell'anima

$$\sigma_{cp} = \frac{500900}{(300-2\cdot 26)\cdot 25} = 145,3\ N/mm^2 < 240\ N/mm^2$$

$$\sigma_{ca} = \frac{M_{xa}\, y}{J_{xa}} = \frac{91000000 \cdot 237,5}{\frac{1}{12}\, 475^3 \cdot 2 \cdot 14 - 14 \cdot 22\,(4 \cdot 187,5^2 + 4 \cdot 112,5^2 + 4 \cdot 37,5^2)} = 114\ N/mm^2 < 240\ N/mm^2$$

Tensione tangenziale sui coprigiunti dell'anima:

$$\tau_{yz} = \frac{T_y}{A_{c\,anima}} = \frac{300000}{2(475 \cdot 14 - 14 \cdot 22 \cdot 6)} = 31,2\ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{id} = \sqrt{3} \cdot 31,2 = 54,1\ N/mm^2$$

Sull'intera trave depurata dai fori (HEA 600):

$$J_{xn} = 1412030000 - 4 \cdot 26 \cdot 25 \cdot 282,5 - 2 \cdot 13 \cdot 22\,(187,5^2 + 112,5^2 + 37,5^2) = 1176380625\ mm^4$$

$$A_{anima} = (590 - 2 \cdot 25 - 6 \cdot 22) \cdot 13 = 5304\ mm^2$$

Nei punti 1 e 2, rispettivamente a $y_1 = \frac{590}{2} = 295\ mm$ e a $y_2 = (590-50) = 270\ mm$:

$$\sigma_{z1} = \frac{M_x\, y_1}{J_{xn}} = \frac{600000000 \cdot 295}{1176380625} = 150,5\ N/mm^2 < 240\ N/mm^2$$

$$\sigma_{z2} = \frac{M_x\, y_2}{J_{xn}} = \frac{600000000 \cdot 270}{1176380625} = 137,7\ N/mm^2 < 240\ N/mm^2$$

$$\tau_{yz} = \frac{T_y}{A_{anima}} = \frac{300000}{5304} = 56,6\ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{id} = \sqrt{3} \cdot 56,6 = 98,0\ N/mm^2 < 240\ N/mm^2$$

Passiamo con l'analisi a rottura con $M_{x,Sd} = 900$ kNm e $T_{y,Sd} = 450$ kN. Momenti sulle piattabande e sull'anima:

$$M_{xp} = \frac{J_{xp}}{J_x} M_x = \frac{1197875000}{1412030000} \cdot 900000000 = 763501838 \text{ Nmm}$$

$$M_{xa} = \frac{J_x - J_{xp}}{J_x} M_x = \frac{1412030000 - 1197875000}{1412030000} \cdot 900000000 = 136498162 \text{ Nmm}$$

Sulle piattabande abbiamo uno sforzo assiale pari a:

$$N_p = \frac{M_{xp}}{h - e} = \frac{763501838}{590 - 25} = 1351330 \text{ N}$$

$$N_{u,Rd} = \min\left\{\frac{300 \cdot 25 \cdot 355}{1{,}05} ; \frac{0{,}9 \cdot (300 \cdot 25 - 2 \cdot 26 \cdot 25) \, 510}{1{,}25}\right\} = 2276640 \text{ N}$$

$$\Rightarrow N_p = 1351330 \text{ N} < 2276640 \text{ N} = N_{u,Rd}$$

Bulloni della piattabanda:

$$V_{bp} = \frac{1351330}{10} = 135133 \text{ N} < 216960 \text{ N} = \frac{0{,}6 \cdot 1000 \cdot 452}{1{,}25} = F_{V,Rd}$$

Bullone più sollecitato dell'anima:

$$S_{V,i} = \frac{T_y}{n} = \frac{450000}{12} = 37500 \text{ N}$$

$$S_{H,max} = \frac{136498162 \cdot 191{,}2}{4 \cdot 191{,}2^2 + 4 \cdot 118{,}6^2 + 4 \cdot 53{,}0^2} = 122101 \text{ N}$$

Angolo e proiezioni:

$$\alpha = 11{,}31° \Rightarrow S_{Hmax,x} = 122101 \cdot \cos 11{,}31° = 119729{,}9 \text{ N}, \quad S_{Hmax,y} = 122101 \cdot \sin 11{,}31 = 23946{,}1 \text{ N}$$

$$\Rightarrow V_{ba,max} = \sqrt{(37500 + 23946{,}1)^2 + 119729{,}9^2} = 134576{,}6 \text{ N} < 150720 \text{ N}$$

Essendo $F_{V,Rd} = \dfrac{0{,}6 \cdot 1000 \cdot 314}{1{,}25} = 150720$ N

Rifollamento dei coprigiunti sulle piattabande:

$$\alpha_p = \min\left\{\frac{60}{3 \cdot 26} ; \frac{1000}{510} ; 1\right\} = 0{,}77 \quad k = \min\left\{\frac{2{,}8 \cdot 75}{22} - 1{,}7 ; 2{,}5\right\} = 2{,}5$$

$$\Rightarrow F_{b,Rd} = \frac{2{,}5 \cdot 0{,}77 \cdot 510 \cdot 24 \cdot 25}{1{,}25} = 471240 \text{ N} > 135133 \text{ N} = V_{bp}$$

Resistenza a flessione della HEA600:

$$\text{Classe 1} \Rightarrow M_{xc,Rd} = M_{xp,Rd} = \frac{Z_x f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{2 \cdot 2675000 \cdot 355}{1{,}05} = 1809 \text{ kNm}$$

$$\Rightarrow M_{x,Sd} = 900 \text{ kNm} < 1809 \text{ kNm} = M_{xc,Rd}$$

Resistenza a taglio:

$$A_{ty} = A - 2bt_f + (t_w + 2r)\, t_f = 22600 - 2 \cdot 300 \cdot 25 + (13 + 27 \cdot 2)\, 25 = 9275 \text{ mm}^2$$

$$\Rightarrow T_{yc,Rd} = \frac{A_{ty} \cdot f_{yk}}{\sqrt{3}\, \gamma_{M0}} = \frac{9275 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1{,}05} = 1810474{,}2 \text{ N}$$

Essendo $T_{y,Sd} = 450000 \text{ N} < 905237 \text{ N} = 0{,}5 \cdot 1810474{,}2 = 0{,}5\, T_{yc,Rd}$

Riferendoci ora alla figura del secondo esercizio svolto nella trattazione dei giunti base, sottoponia un tale giunto di continuità con saldatura a completa penetrazione a $T_y = 300$ kN e $M_x = 600$ kN·m (condizione di carico 1). Ciò per svolgere la seguente analisi lineare:

$$J_x = \frac{1}{12} \cdot 460^3 \cdot 13 + \frac{1}{12} \cdot 300 \cdot 25^3 + 2 \cdot 300 \cdot 25 \cdot 282{,}5^2 = 1302931708 \ mm^4$$

$$A_{anima} = 13 \cdot 460 = 5980 \ mm^2$$

All'estremità destra della parte superiore della saldatura della piattabanda superiore:

$$\sigma_z = \frac{M_x y}{J_x} = \frac{600000000 \cdot 295}{1302931708} = 135{,}8 \ N/mm^2 < 240 \ N/mm^2$$

Questa volta all'estremità destra superiore dell'anima

$$\sigma_z = \frac{600000000 \cdot 230}{1302931708} = 105{,}9 \ N/mm^2 \qquad \tau_{yz} = \frac{T_y}{A_{anima}} = \frac{300000}{13 \cdot 460} = 50{,}2 \ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{id} = \sqrt{105{,}9^2 + 50{,}2^2} = 117{,}2 \ N/mm^2 < 240 \ N/mm^2$$

Per il calcolo a rottura assumiamo $T_{y,Sd} = 450$ kN e $M_{x,Sd} = 900$ kN·m:

$$A_1 = A_2 = 230 \cdot 13 + 300 \cdot 25 = 10490 \ mm^2$$

$$S_1 = S_2 = 230 \cdot 13 \cdot 115 + 300 \cdot 25 \cdot 282{,}5 = 2462600 \ mm^3$$

$$Z_x = 2 S_1 = 2 S_2 = 4925200 \ mm^3$$

Ipotizzando che la sezione sia di classe 1:

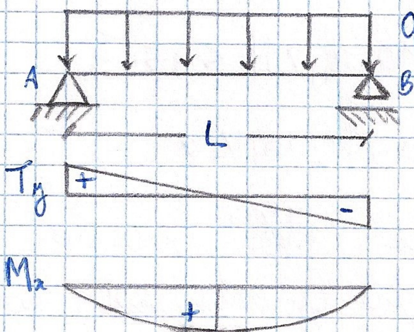
$$M_{x c,Rd} = \frac{4925200 \cdot 355}{1{,}05} = 1665{,}2 \ kN \cdot m > 600 \ kN \cdot m = M_x$$

$$T_{yc,Rd} = \frac{5980 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1{,}05} = 1167{,}3 \ kN > 300 \ kN = T_y$$

Le verifiche sono soddisfatte. Possiamo omettere la verifica a taglio-flessione poiché:

$$T_{y,Sd} = 450 \ kN < 583{,}6 \ kN = 0{,}5 \cdot 1167{,}3 = T_{yc,Rd}$$

Passiamo al giunto a cerniera di trave appoggiata, che trasferisce lo sforzo di taglio dall'anima di una trave secondaria a quella di una principale (o dall'anima di una trave a quella di una colonna) consentendo la rotazione. Vediamo come esempio un giunto a cerniera di trave realizzato con squadrette:

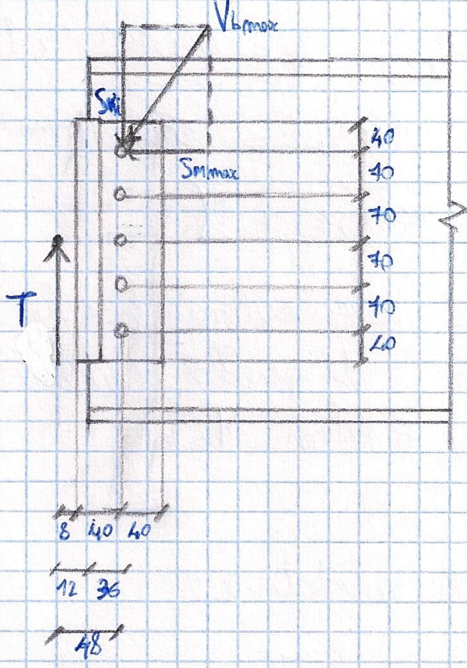


$q = 100$ kN/m $\qquad L = 4$ m

$R_A = R_B = 200$ kN

IPE 450 $\qquad$ S275

Squadrette L 80 x 80 x 8 in acciaio S275. Bulloni di diametro d = 16 mm di classe 5.6, fori di diametro $\phi = 17$ mm. I valori dei carichi indicati subito prima valgono in campo elastico lineare. Schema del giunto:



Equipariamo l'acciaio S275 all'acciaio Fe430 $\Rightarrow \sigma_{amm} = 190\ N/mm^2$

Partiamo dai bulloni:

$$S_{Vi} = \frac{200000}{5} = 40000\ N$$

Momento di trasporto sul bullone più sollecitato:

$$S_{M_{max}} = \frac{200000 \cdot 48 \cdot 140}{2 \cdot 70^2 + 2 \cdot 140^2} = 27428{,}6\ N$$

Risultante:

$$V_{b,max} = \sqrt{40000^2 + 27428{,}6^2} = 48500{,}8\ N$$

Quindi:

$$\tau_b = \frac{48500{,}8}{2 \cdot 201} = 120{,}6\ N/mm^2 \Rightarrow \sigma_{id} = \sqrt{2} \cdot 120{,}6 = 170{,}6\ N/mm^2$$

$$\sigma_{b\,amm} = \frac{1}{1{,}5} \min\{0{,}7 \cdot 500; 300\} = 200\ N/mm^2 > 170{,}6\ N/mm^2$$

Rifollamento trave:

$$\sigma_r = \frac{48500{,}8}{16 \cdot 9{,}4} = 322{,}5\ N/mm^2 < 475\ N/mm^2 = \frac{40}{16} \cdot 190 = \sigma_{r\,amm}$$

Squadretta:

$$J_{x} = \frac{1}{12} \cdot 2 \cdot 8 \cdot 360^3 - 4 \cdot 17 \cdot 8 \cdot 140^2 - 4 \cdot 17 \cdot 8 \cdot 70^2 = 48880000\ mm^4$$

$$A_{squadretta} = 2 \cdot 360 \cdot 8 - 10 \cdot 17 \cdot 8 = 4400\ mm^2$$

Al bordo superiore della squadretta la tensione normale è massima, ma la tensione tangenziale è nulla. Ammettiamo per semplicità che quest'ultima sia uniformemente distribuita sulla sezione:

$$\sigma_z = \frac{9600000 \cdot 180}{48880000} = 35{,}4\ N/mm^2 \qquad \tau_{yz} = \frac{200000}{4400} = 45{,}5\ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{id} = \sqrt{35{,}4^2 + 3 \cdot 45{,}5^2} = 86{,}3\ N/mm^2 < 190\ N/mm^2$$

Per l'analisi a rottura consideriamo $q_d = 150\ N/mm^2$. Quindi $T_{y,Ed} = 300$ kN. Sul bullone più sollecitato:

$$S_{Vi} = \frac{300000}{5} = 60000\ N \qquad S_{M_{max}} = \frac{300000 \cdot 48 \cdot 140}{2 \cdot 140^2 + 2 \cdot 70^2} = 41142{,}9\ N$$

$$\Rightarrow V_{b,max} = \sqrt{60000^2 + 41142{,}9^2} = 72751{,}2\ N$$

Resistenza di progetto per piano di scorrimento:

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 201}{1,25} = 48240\ N$$

$$\Rightarrow V_{b,max} = 72751,2 < 96480\ N = 2 \cdot 48240 = 2F_{V,Rd}$$

Flessione:

classe 1 $\Rightarrow M_{x,c,Rd} = M_{x,p,Rd} = \dfrac{2 \cdot 851000 \cdot 275}{1,05} = 445761905\ N \cdot mm$

$$A_{vy} = 9880 - 2 \cdot 190 \cdot 14,6 + (9,4 + 2 \cdot 21) \cdot 14,6 = 5082\ mm^2$$

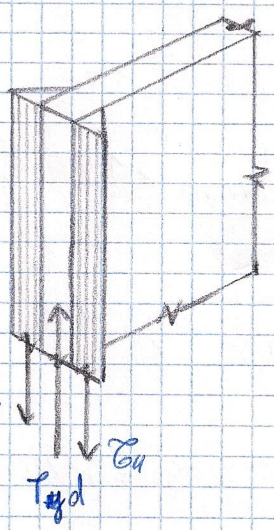
$$\Rightarrow T_{y,c,Rd} = \frac{5082 \cdot 275}{\sqrt{3} \cdot 1,05} = 768519,7\ N$$

Ci bastano le verifiche sulle singole sollecitazioni poiché il taglio di progetto è inferiore alla metà di quello resistente:

$$M_{x,Ed} = 300000 \cdot 48 = 14,4\ kNm < 44,6\ kNm = M_{x,c,Rd}$$

$$T_{y,Ed} = 300000\ N < 768519,7\ N = T_{y,c,Rd}$$

Sostituiamo le squadrette con le saldature:



IPE 450   S275

$L = 4\ m$ $q_d = 100\ kN/m$

Sull'appoggio A:

$M_{Ad} = 0$ $R_{Ad} = T_{Ad} = q_d \frac{L}{2} = 200\ kN$

$\Rightarrow T_{yd} = 200\ kN$

Cordoni d'angolo:

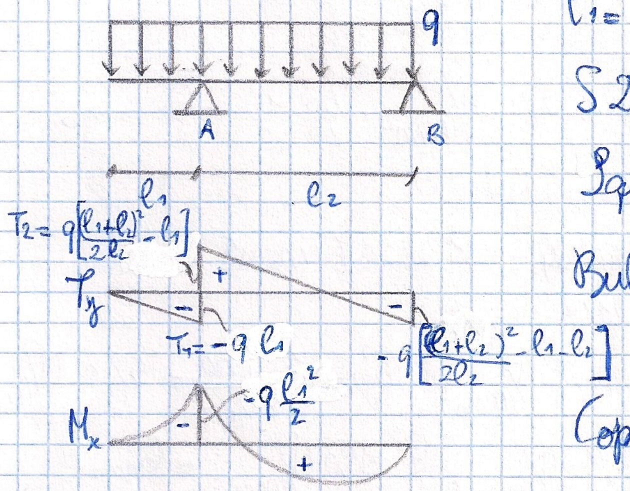
$h = 360\ mm$ $a = 5\ mm$

Tensione tangenziale e metodo dei coefficienti parziali:

$$\tau_\parallel = \frac{T_y}{2ah} = \frac{200000}{2 \cdot 5 \cdot 360} = 55,6\ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \sqrt{n_\perp^2 + t_\perp^2 + t_\parallel^2} = t_\parallel = 55,6\ N/mm^2 < 192,5\ N/mm^2 = 0,7 \cdot 275 = \beta_1 \cdot f_{yk} \\ |n_\perp| + |t_\perp| = 0 < 233,5\ N/mm^2 = 0,85 \cdot 275 = \beta_2 \cdot f_{yk} \end{cases}$$

Passiamo al giunto a cerniera di trave continua, che trasferisce lo sforzo di taglio dalle due travi secondarie (in particolare dalle loro anime) all'anima della trave principale.
Partiamo dal caso di giunto bullonato di una HEA300 appoggiata a una principale IPE400:



$l_1 = 3\,m \quad l_2 = 7\,m \quad l_1 + l_2 = L$

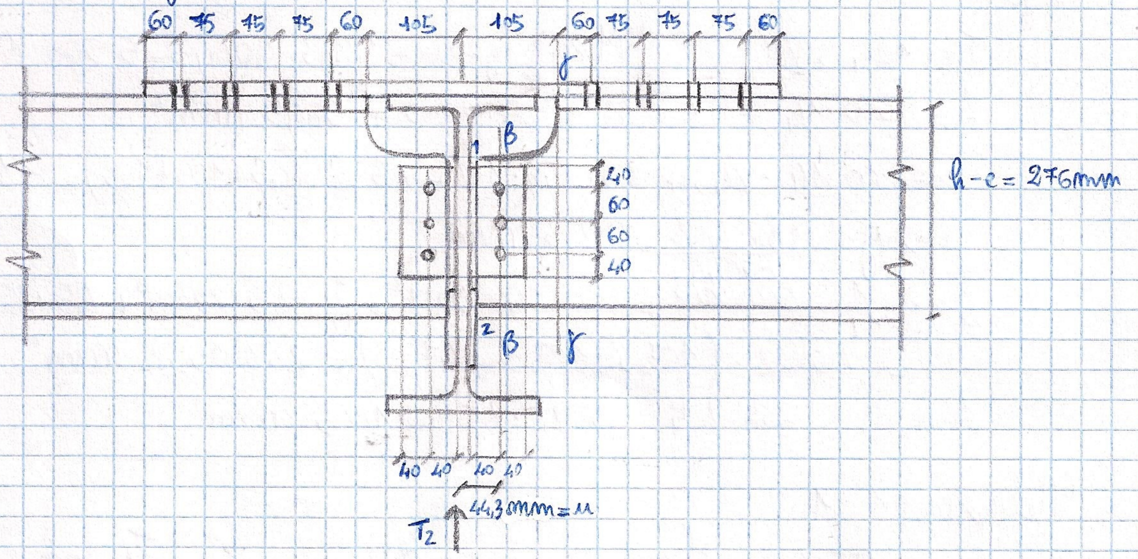
S275 (Fe430 $\Rightarrow \sigma_{amm} = 190\ N/mm^2$)

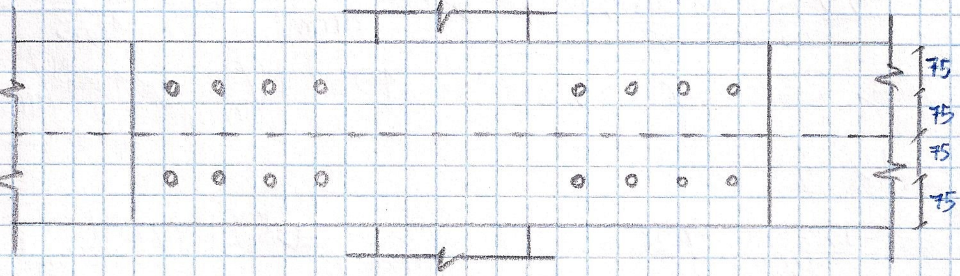
Squadrette L $80 \times 80 \times 8$.

Bulloni: $d = 20\ mm$ classe 5.6
$\phi = 22\ mm$

Coprigiunto 300×14 con bulloni:
$d = 24\ mm$ classe 5.6 $\phi = 26\ mm$

Schema del giunto:





Per il campo elastico lineare assumiamo $q = 30\ kN/m$, perciò:

$$T_1 = -q\, l_1 = -30 \cdot 3 = -90\ kN \qquad T_2 = q\left[\frac{(l_1+l_2)^2}{2l_2} - l_1\right] = 30\left[\frac{100}{14} - 3\right] = 124{,}3\ kN$$

$$\Rightarrow R_A = |T_1| + T_2 = 214{,}3\ kN$$

$$M_A = -30 \cdot \frac{9}{2} = 135\ kN \cdot m$$

Bulloni delle squadrette più sollecitati, a destra della IPE400:

$$S_{Vi} = \frac{124300}{3} = 41433\ N \qquad S_{H,max} = \frac{124300 \cdot 44{,}3 \cdot 60}{2 \cdot 60^2} = 45887\ N$$

$$\Rightarrow V_{B,max} = \sqrt{41433^2 + 45887^2} = 61825\ N$$

Otteniamo:

$$\tau_{B,max} = \frac{61825}{2 \cdot 314} = 98{,}4\ N/mm^2 \Rightarrow \sigma_{id} = \sqrt{2} \cdot 98{,}4 = 139{,}2\ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{id} = 139{,}2\ N/mm^2 < 200\ N/mm^2 = \sigma_{amm,b}$$

Rifollamento:

$$\sigma_r = \frac{61825}{20 \cdot 8{,}5} = 363{,}7\ N/mm^2 < 380\ N/mm^2 = \frac{40}{20} \cdot 190 = \sigma_{r,amm}$$

Analizziamo la sezione delle squadrette:

$$J_{xs} = \frac{1}{12} \cdot 2 \cdot 8 \cdot 200^3 - 22 \cdot 8 \cdot 60^2 \cdot 4 = 8132267\ mm^4$$

$$A_{sq} = 2 \cdot 200 \cdot 8 - 6 \cdot 22 \cdot 8 = 2144\ mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_z = \frac{124300 \cdot 44{,}3 \cdot 100}{8132267} = 67{,}7\ N/mm^2 \qquad \tau_{yz} = \frac{124300}{2144} = 58{,}0\ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{id} = \sqrt{67{,}7^2 + 3 \cdot 58{,}0^2} = 121{,}1\ N/mm^2 < 190\ N/mm^2 = \sigma_{amm}$$

Passiamo alla trave secondaria, nelle sezioni β-β e γ-γ:

- β-β:

$$T_y = 124{,}3\ kN \qquad M_x = T_y \cdot u = 124{,}3 \cdot 0{,}0443 = 5{,}506\ kNm$$

$$A \cong 300 \cdot 14 + 8{,}5 \cdot 236 - 8{,}5 \cdot 22 \cdot 3 = 5645\ mm^2$$

$$S_x \cong 300 \cdot 14 \cdot 243 + 8{,}5 \cdot 236 \cdot 118 - 8{,}5 \cdot 22 \cdot (45 + 105 + 165) = 1198403\ mm^3$$

$$\Rightarrow y_G = \frac{1198403}{5645} = 212{,}3\ mm$$

$$J_x = \frac{1}{12} \cdot 300 \cdot 14^3 + 300 \cdot 14 \cdot 30{,}7^2 + \frac{1}{12} \cdot 8{,}5 \cdot 236^3 + 8{,}5 \cdot 236 \cdot 94{,}3^2 +$$
$$- 8{,}5 \cdot 22 \cdot (167{,}3^2 + 107{,}3^2 + 47{,}3^2) = 23370552\ mm^2$$

$$A_{anima} = 236 \cdot 8{,}5 - 3 \cdot 22 \cdot 8{,}5 = 1445\ mm^2$$

Nel punto 1:

$$\sigma_z = \frac{(-5506000)(-212{,}3)}{23370552} = 50{,}0\ N/mm^2 \qquad \tau_{yz} = \frac{124300}{1445} = 86{,}0\ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{id} = \sqrt{50{,}0^2 + 3 \cdot 86{,}0^2} = 157{,}2\ N/mm^2 < 190\ N/mm^2 = \sigma_{amm}$$

Nel punto 2:

$$\sigma_z = \frac{(-5506000)\ 37{,}7}{23370552} = -8{,}88\ N/mm^2 \Rightarrow |\sigma_z| = 8{,}88\ N/mm^2 < 190\ N/mm^2 = \sigma_{amm}$$

- γ-γ:

$$T_y = 124{,}3\ kN \qquad M_x = 124{,}3 \cdot 0{,}105 = 13{,}05\ kNm$$

$$A \cong 300 \cdot 14 + 8{,}5 \cdot 236 = 6206\ mm^2$$

$$S_x \cong 300 \cdot 14 \cdot 243 + 236 \cdot 8{,}5 \cdot 118 = 1257308\ mm^3$$

$$\Rightarrow y_G = 1257308/6206 = 202{,}6\ mm$$

$J_x = \frac{1}{12}\, 300 \cdot 14^3 + 300 \cdot 14 \cdot 40,4^2 + 8,5 \cdot 236 \cdot 84,6^2 + \frac{1}{12}\, 8,5 \cdot 236^3 =$
$= 30591450 \ mm^4$

$A_{anima} = 8,5 \cdot 236 = 2006 \ mm^2$

Nel punto 1:

$$\sigma_z = \frac{(-13050000) \cdot (-202,6)}{30591450} = 86,4 \ N/mm^2$$

$$\tau_{yz} = \frac{124300}{2006} = 62,0 \ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{id} = \sqrt{3 \cdot 62,0^2 + 86,4^2} = 137,8 \ N/mm^2 < 190 \ N/mm^2 = \sigma_{amm}$$

Nel punto 2:

$$\sigma_z = \frac{(-1305000) \cdot 47,4}{30591450} = -20,2 \ N/mm^2 \Rightarrow |\sigma_z| = 20,2 \ N/mm^2 < 190 \ N/mm^2 = \sigma_{amm}$$

Assumendo che il momento $M_x = 135 \ kN/m$ sia assorbito dalla piattabanda superiore e dall'imbottitura inferiore analizziamo il collegamento delle piattabande:

$$N_p = \frac{M_x}{h-e} = \frac{135000000}{276} = 489,1 \ kN \Rightarrow V_b = \frac{489100}{8} = 61141 \ N$$

$$\Rightarrow \tau_b = \frac{61141}{1 \cdot 452} = 135,3 \ N/mm^2 \Rightarrow \sigma_{id} = \sqrt{2} \cdot 135,3 = 191,3 \ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{id} = 191,3 \ N/mm^2 < 200 \ N/mm^2 = \sigma_{amm\,b}$$

Rifollamento:

$$\sigma_r = \frac{61141}{24 \cdot 14} = 182,0 \ N/mm^2 < 475 \ N/mm^2 = \frac{60}{24}\, 190 = \sigma_{r,amm}$$

Sul coprigiunto la tensione normale è:

$$\sigma_{cp} = \frac{489100}{(300 - 2 \cdot 26)\, 14} = 140,9 \ N/mm^2 < 190 \ N/mm^2 = \sigma_{amm}$$

Per l'analisi a rottura consideriamo $q = 45 \ kN/m$, quindi:

$$T_1 = -45 \cdot 3 = -135 \ kN \qquad T_2 = 45 \left(\frac{100}{14} - 3\right) = 186,4 \ kN$$

$$M_A = -45 \cdot \frac{9}{2} = 202,5 \ kN \cdot m$$

Sul bullone più sollecitato dell'anima:

$$S_{Vi} = \frac{186400}{3} = 62133 \ N \qquad S_{m\,max} = \frac{186400 \cdot 44,3 \cdot 60}{2 \cdot 60^2} = 68813 \ N$$

$$\Rightarrow V_{b,max} = \sqrt{62133^2 + 68813^2} = 92713 \ N$$

Resistenza di progetto e verifica a taglio:

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 314}{1,25} = 75360 \ N \Rightarrow V_{b,max} = 92713 \ N < 150720 = 2 F_{V,Rd}$$

Rifollamento:

$$\alpha = \min\left\{\frac{40}{3 \cdot 22}; \frac{500}{430}; 1\right\} = 0,61 \qquad k = \min\left\{\frac{2,8 \cdot 40}{22} - 1,7; 2,5\right\} = 2,5$$

$$\Rightarrow F_{b,Rd} = \frac{0,61 \cdot 2,5 \cdot 430 \cdot 22 \cdot 8,5}{1,25} = 98100 \ N > 92713 \ N = V_{b,max}$$

Passiamo ai coprigiunti, partendo dai loro bulloni:

$$N_p = \frac{202500000}{290-14} = 733695\ N \Rightarrow V_b = \frac{733695}{8} = 91712\ N$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0{,}6 \cdot 500 \cdot 452}{1{,}25} = 108480\ N > 91712\ N = V_b$$

Trazione del coprigiunto della piattabanda superiore:

$$N_{t,Rd} = \min\left\{\frac{4200 \cdot 275}{1{,}05}; \frac{0{,}9 \cdot (300-2\cdot 26)\cdot 14 \cdot 430}{1{,}25}\right\} = \min\{1100000; 1074931\} =$$

$$= 1074931\ N > 733695\ N = N_p$$

La HEA 300 è di classe 1 nei confronti della flessione (zona integra):

$$M_{xc,Rd} = M_{xp,Rd} = \frac{2 \cdot 692000 \cdot 275}{1{,}05} = 362{,}5\ kNm > 19{,}6\ kNm = 186{,}45 \cdot 0{,}105 = T_y \cdot b_2$$

$$A_{ty} = 11200 - 2 \cdot 300 \cdot 14 + (8{,}5 + 2 \cdot 27)\, 14 = 3675\ mm^2$$

$$\Rightarrow T_{yc,Rd} = \frac{3675 \cdot 275}{\sqrt{3} \cdot 1{,}05} = 556\ kN$$

Avendo $T_{ySd} = 186{,}45\ kN < 227{,}85\ kN = 0{,}5\ T_{yc,Rd}$ si può omettere la verifica a taglio e flessione. Eseguiamo ora le verifiche a flessione sulle sezioni $\beta-\beta$ e $\gamma-\gamma$, che supponiamo sempre di classe 1. Partiamo dalla sezione $\gamma-\gamma$:

$$\frac{A}{2} \cong \frac{300 \cdot 14 + 8{,}5 \cdot 236}{2} = 3103\ mm^2 \Rightarrow y = \frac{3103}{300} = 10{,}34\ mm$$

$$\Rightarrow S_1 = 300 \cdot \frac{10{,}34^2}{2} = 16048\ mm^3 \quad S_2 = 300 \cdot \frac{3{,}66^2}{2} + 236 \cdot 8{,}5 \cdot 121{,}66 = 246059\ mm^3$$

$$\Rightarrow Z_x = S_1 + S_2 = 262107\ mm^3$$

$$\Rightarrow M_{xc,Rd} = M_{xp,Rd} = \frac{262107 \cdot 275}{1{,}05} = 68{,}6\ kNm > 15{,}7\ kNm = 186{,}45 \cdot 0{,}0843 = T_y \cdot u'$$

$$T_{yc,Rd} = \frac{236 \cdot 8{,}5 \cdot 275}{\sqrt{3} \cdot 1{,}05} = 303329\ N$$

Qui non si può omettere la verifica a taglio-flessione poiché $T_{ySd} = 186450\ N > 151665\ N = 0{,}5 \cdot T_{yc,Rd}$. La eseguiremo dopo.

Sezione $\beta-\beta$:

$$A \cong 300 \cdot 14 + 8{,}5 \cdot (236 - 3 \cdot 22) = 5645\ mm^2 \Rightarrow \frac{A}{2} = 2822{,}5\ mm^2$$

$$\Rightarrow y = \frac{2822{,}5}{300} = 9{,}41\ mm$$

$$S' = 236 \cdot 8{,}5 \cdot 118 - 8{,}5 \cdot 22\,(45 + 105 + 165) + (14 - 9{,}41) \cdot 300 \cdot \left(236 + \frac{14 - 9{,}41}{2}\right) =$$

$$= 505935\ mm^2 \Rightarrow y' = \frac{2S'}{A} = 179{,}3\ mm$$

In cui y' è il baricentro della parte superiore della sezione. Quindi:

$$S_1 = 300 \cdot \frac{9{,}41^2}{2} = 13282\ mm^3 \quad S_2 = 2822{,}5 \cdot (250 - 9{,}41 - 179{,}3) = 173130\ mm^3$$

$$\Rightarrow Z_x = S_1 + S_2 = 186412\ mm^3$$

$$\Rightarrow M_{xc,Rd} = M_{xp,Rd} = \frac{186412 \cdot 275}{1{,}05} = 48{,}8\ kNm > 8{,}3\ kNm = 186{,}45 \cdot 0{,}0443 = T_y \cdot u$$

$$T_{yc,Rd} = \frac{(236 \cdot 8{,}5 - 3 \cdot 22 \cdot 8{,}5) \cdot 275}{\sqrt{3} \cdot 1{,}05} = 218500\ N$$

Bisogna fare la verifica a taglio-flessione: $T_{ySd} = 186450 > 109250 = 0{,}5\ T_{yc,Rd}$

Verifiche a taglio - flessione:

- sezione γ-γ:

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot 186450}{303329} - 1\right)^2 = 0{,}053$$

$$\Rightarrow T_{y,c,Rd,\rho} = \frac{236 \cdot 8{,}5 \cdot (1-0{,}053) \, 275}{\sqrt{3} \cdot 1{,}05} = 287342 > 186450 \text{ N} = T_{yEd}$$

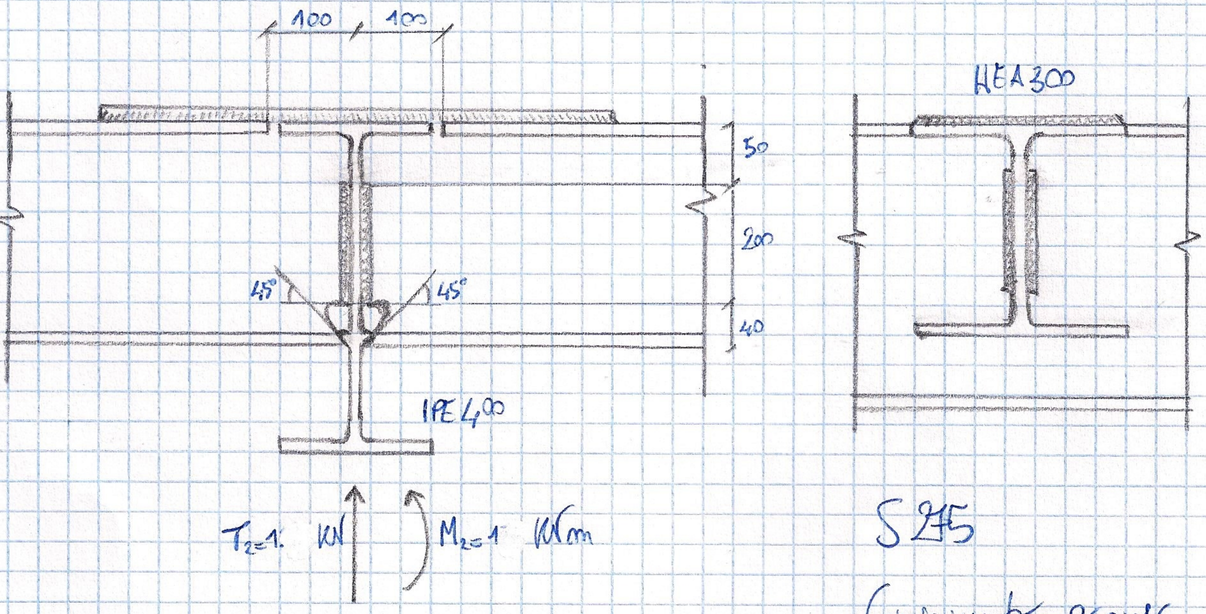
- sezione β-β:

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot 186450}{218500} - 1\right)^2 = 0{,}499$$

$$\Rightarrow T_{y,c,Rd,\rho} = \frac{(236 \cdot 8{,}5 - 3 \cdot 22 \cdot 8{,}5) \cdot 275 \, (1-0{,}499)}{\sqrt{3} \cdot 1{,}05} = 108335 \text{ N} < 186450 \text{ N} = T_{yEd}$$

L'ultima verifica non è soddisfatta.

Vediamo lo stesso giunto appena analizzato sostituendo alle bullonature le saldature:



S 275

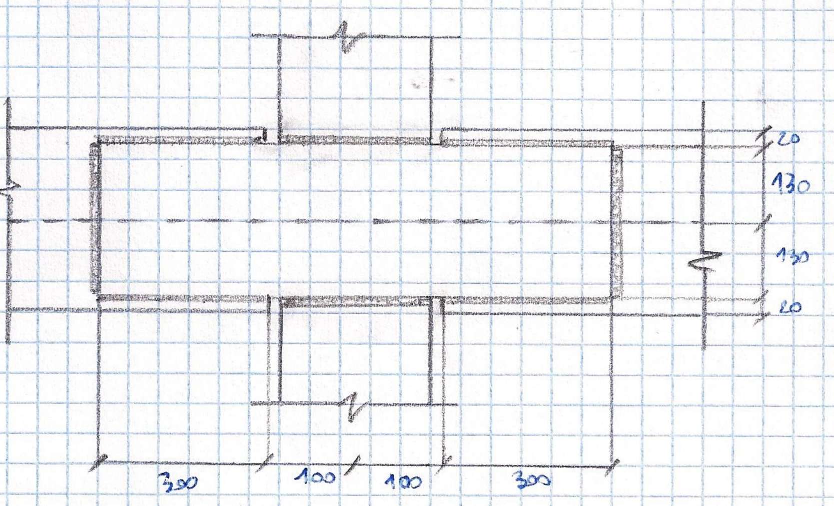
Coprigiunto 260x16

Cordoni d'angolo coprigiunto:

$l = 300$ mm $a = 10$ mm

Cordoni d'angolo anima:

$h = 200$ mm $a = 5$ mm



Valori di progetto: $T_{yd} = 175$ kN, $M_{xd} = 190$ kNm, quindi sull'anima:

$$\tau_{\parallel} = \frac{175000}{2 \cdot 5 \cdot 200} = 87{,}5 \text{ N/mm}^2$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \sqrt{n_\perp^2 + t_\perp^2 + t_\parallel^2} = t_\parallel = 87{,}5 \text{ N/mm}^2 < 192{,}5 \text{ N/mm}^2 = 0{,}7 \cdot f_{yk} \\ |n_\perp| + |t_\perp| = 0 < 233{,}75 \text{ N/mm}^2 = 0{,}85 \cdot f_{yk} \end{cases}$$

Cordoni della piattabanda superiore:

$$N_{pd} = \frac{190000000}{290-14} = 688406\ N \Rightarrow \tau_{\parallel} = \frac{688406}{2 \cdot 10 \cdot 300} = 114{,}7\ N/mm^2$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \sqrt{n_\perp^2 + t_\perp^2 + t_\parallel^2} = t_\parallel = 114{,}7\ N/mm^2 < 192{,}5\ N/mm^2 = 0{,}7\ f_{yk} \\ |n_\perp| + |t_\perp| = 0 < 233{,}75\ N/mm^2 = 0{,}85\ f_{yk} \end{cases}$$

In tutti gli esercizi svolti in questa parte le verifiche erano soddisfatte, esclusa quella a taglio-flessione della sezione β-β del penultimo esercizio.